

УДК 697.94

**УГЛУБЛЕННЫЙ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПСИХРОМЕТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА**

*канд. техн. наук, доц. А.В. ЗАДОЯННИЙ, Ю.Н. ЕВДОКИМЕНКО*  
(Киевский национальный университет строительства и архитектуры)  
e-mail: zadoiannyi.ov@knuba.edu.ua

*Приведены результаты расчетов относительной эксергетической эффективности основных психрометрических процессов в центральных системах кондиционирования воздуха. Расчеты проведены по оригинальной методике, которая базируется на современной теории эксергетического анализа с учетом составляющих эксергии влажного воздуха и энергоносителей. В методике учтены отдельные составляющие эксергии воздуха – термическая, химическая концентрационная (влажностная) и механическая, что дает возможность учитывать и анализировать их термодинамические потенциалы отдельно и определять показатели относительной эффективности процессов нагревания, охлаждения, увлажнения и осушки воздуха. Эта отличительная от традиционной методики особенность является корректным инструментом для сравнительной оценки энергоэффективности каждого отдельного процесса. Углубленность эксергетического анализа приведенной в работе методики заключается в учете всех составляющих эксергии влажного воздуха. Термодинамические потенциалы составляющих в процессах обработки воздуха соизмеримы друг с другом, что позволяет их корректно сравнивать при анализе энергоэффективности. В работе показана возможность определения эксергетической эффективности отдельно по составляющим процессам при комбинированной обработке воздуха с учетом весомости каждого отдельного процесса. Результаты приведенных расчетов демонстрируют уровень энергетической эффективности основных психрометрических процессов и дают возможность корректного сравнения каждого из них. Представленные в работе научно-методологические положения углубленного эксергетического анализа процессов обработки воздуха в центральных кондиционерах могут служить базовой методикой для оценки, оптимизации и корректировки схемных решений по критерию эксергетической эффективности систем кондиционирования воздуха на всех стадиях их жизненного цикла и при разработке новых систем и функциональных элементов.*

**Ключевые слова:** системы кондиционирования воздуха, психрометрические процессы; эксергетический анализ; эксергетический коэффициент полезного действия.

**Введение.** Системы обеспечения микроклимата в крупных коммерческих и промышленных зданиях являются крупнейшими потребителями энергии, доля которых по данным [1] достигает 70%. Среди них доминируют системы кондиционирования воздуха (далее – СКВ).

Повышение уровня энергосбережения в указанных системах обеспечения микроклимата зданий и сооружений невозможно без корректной оценки их эффективности. Эксергетический анализ технических систем является совершенным и перспективным методом для оценки энергетических потерь и широко используется при оценке эффективности систем кондиционирования воздуха [2]. Однако используемые отдельными исследователями в рамках эксергетического метода оценки эффективности СКВ не всегда дают корректные результаты. В работе [3] нами было указано на некорректность результатов при оценке эксергетической эффективности отдельных процессов центральных СКВ и сплит-систем, где для первого случая было получено значение эксергетического КПД меньше нуля, а для второго – больше единицы. Указанные результаты были получены при использовании традиционной методики эксергетического анализа, который приемлем для объектов, где энергетические потоки имеют достаточно высокие термодинамические потенциалы. К ним относятся тепловые и атомные станции, химические, металлургические комбинаты и другие подобные предприятия, где значения основных физических параметров состояния – давления и температуры – в различных процессах составляют десятки мегапаскаль и тысячи градусов Цельсия. В СКВ указанные параметры в процессах обработки воздуха имеют ощутимо меньшие значения и варьируются в пределах не более 3...5 кПа для давления воздуха, не более 100 кПа – для энергоносителей в системах тепло- и холодоснабжения. Значения температуры в СКВ не превышают регламентированных температурными графиками для систем коммунального теплоснабжения, а для воздуха, обрабатываемого в СКВ, – не более и не менее значений окружающей среды для соответствующих периодов года.

Традиционный метод эксергетического анализа не в полной мере может быть приемлемым для СКВ ввиду того, что оперирует потенциалами тепломеханической эксергии, которые, как уже указывалось выше, дают достаточно корректную оценку для соответствующих объектов анализа с высокими энергетическими потенциалами. В случае СКВ интерес представляют составляющие полной эксергии влажного воздуха – термическая, механическая и химическая концентрационная (влажностная) – для воздуха, а для энергоносителей – горячей и холодной воды – механическая и термическая составляющие.

В работе [4] нами было показано, какие виды эксергии и их потенциалы приемлемы и могут корректно отображать процессы обработки влажного воздуха в СКВ. Там же приведены соответствующие формулы для их расчета, апробированные в проектной и учебной практике, а также при эксплуатации систем.

Следует заметить, что эксергетические потенциалы составляющих эксергии влажного воздуха в СКВ соизмеримы, что дает основание утверждать о целесообразности учета при анализе всех составляющих.

**Основная часть.** Эксергетический метод предусматривает анализ термодинамических систем с целью их дальнейшей оптимизации по одному из основных параметров – эксергетической эффективности или эксергетическому КПД (ЭКПД). Указанный параметр как результат эксергетического анализа определяют как отношение полезного эффекта к подведенной эксергии от энергоносителей. В СКВ для общественных и административных зданий в целом и в их отдельных функциональных элементах к полезным эффектам следует отнести психрометрические процессы, которые последовательно проходят обработку воздуха перед подачей в обслуживаемое помещение. К основным из них следует отнести нагревание, охлаждение, осушку и увлажнение воздуха. Психрометрические процессы в СКВ характеризуются изменением следующих параметров: температуры, энтальпии, влагосодержания (характеризуется значением парциального давления водяных паров) и относительной влажности воздуха.

Значения эксергии в указанных процессах определялись по известным зависимостям удельно на килограмм сухого воздуха и для воздушного потока в каждой конечной и начальной точках [2]. Разность эксергетических потенциалов и потоков каждого отдельного процесса рассматривалась как полезная часть эксергии, полученная воздухом от энергоносителя. Эксергетические потенциалы в характерных точках процессов определялись для каждой составляющей эксергии воздуха отдельно.

Расчетные зависимости для определения эксергетических потоков воздуха следующие, кДж/с: для термической составляющей

$$E_{a,h}^{cs} = G_a^{cs} \left[ T_a^{ext} \left( c_{p,d,a} + d_a^{cs} c_{p,w,v} \right) \left( \frac{T_a^{cs}}{T_a^{ext}} - 1 - \ln \frac{T_a^{cs}}{T_a^{ext}} \right) \right]; \quad (1)$$

для влажностной составляющей

$$E_{a,ch,cn,w}^{cs} = G_a^{cs} \left[ T_a^{ext} R_v \left( \left( 0,622 + d_a^{cs} \right) \ln \frac{0,622 + d_a^{ext}}{0,622 + d_a^{cs}} + d_a^{cs} \ln \frac{d_a^{cs}}{d_a^{ext}} \right) \right]; \quad (2)$$

для механической составляющей

$$E_{a,m}^{cs} = G_a^{cs} \left[ \left( T_a^{ext} R_v \left( 0,622 + d_a^{cs} \right) \ln \frac{P_a^{cs}}{P_a^{ext}} \right) \right], \quad (3)$$

где  $G$  – массовый поток воздуха, кг/с;

$T$  – абсолютная температура, °К;

$c$  – массовая теплоемкость, кДж/кг°К;

$d$  – влагосодержание, кг/кг;

$P$  – абсолютное давление воздуха, кПа;

$R$  – газовая постоянная водяного пара, кДж/кг°К;

Индексы:  $a$  – воздух;  $h$  – теплота;  $cs$  – текущее состояние;  $ext$  – наружный;  $p$  – изобарный;  $d$  – сухой;  $w$  – влажный;  $v$  – пар;  $cn$  – концентрация;  $ch$  – химический.

Удельные значения эксергии воздуха определялись по приведенным зависимостям без множителя  $G$ . Начальные и конечные параметры психрометрических процессов определялись на основании паспортных данных соответствующего оборудования отечественных и зарубежных производителей, а также по результатам лабораторных и натурных замеров.

Расчетные зависимости для определения эксергетических потоков энергоносителей следующие, кДж/с: поток физической (термической и механической) эксергии энергоносителя – горячая и холодная вода:

$$E_{w,i,ph} = g_{w,i,m} \left[ \left\{ c_{p,w,i} \left( T_{w,i}^{cs} - T_a^{ext} \right) - T_a^{ext} \ln \frac{T_{w,i}^{cs}}{T_a^{ext}} \right\} + v_{w,i}^{cs} \left( P_{w,i}^{cs} - P_a^{ext} \right) \right], \quad (4)$$

где  $g_{w,i,m}$  – массовый поток воды, кг/с;

$c_{p,w,i}$  – изобарная теплоемкость воды, кДж/кг°К;

$T_{w,i}^{cs}$  и  $T_a^{ext}$  – абсолютная температура, соответственно, теплоносителя и наружного воздуха, °К;

$v_{w,i}^{cs}$  – удельный объем воды, м<sup>3</sup>/кг;

$P_{w,i}^{cs}$  и  $P_a^{ext}$  – абсолютное давление, соответственно, теплоносителя и наружного воздуха, кПа.

В формуле (4) в фигурных скобках – термическая составляющая эксергии воды, а второе слагаемое в квадратных скобках – механическая.

Эксергию потока хладагента в состоянии насыщенного пара определяли по формуле, кДж/с

$$E_{cl,r,v,sat,ph} = g_{cl,r,m} \left[ c_{p,r,sat,v} \left\{ (T_{cl,r,sat,v}^{cs} - T_a^{ext}) - T_a^{ext} \ln \left( \frac{T_{cl,r,sat,v}^{cs}}{T_a^{ext}} \right) \right\} + v_{cl,r,sat,v} (P_{cl,r,sat,v}^{cs} - P_a^{ext}) \right] \quad (5)$$

а в состоянии жидкости по формуле

$$E_{cl,r,l,ph} = g_{cl,r,m} \left[ c_{p,r,l} \left\{ (T_{cl,r,l} - T_a^{ext}) - T_a^{ext} \ln \left( \frac{T_{cl,r,l}}{T_a^{ext}} \right) \right\} + v_{cl,r,l} (P_{cl,r,l} - P_a^{ext}) \right], \quad (6)$$

где индексы *cl* – хладагент; *m* – массовый; *sat* – насыщенный; *v* – объем; *r* – хладагент; *l* – жидкость;

Эксергетическую эффективность ЭКПД процессов определяли как для процесса отдельно с несколькими эффектами (общая эффективность), например – охлаждение и увлажнение, так и отдельно для увлажнения или охлаждения (функциональная эффективность) воздуха. При этом использовали следующие расчетные зависимости:

– функциональная эффективность

$$\eta_f^{ex} = \frac{\Delta E_{a,us,i}}{\Delta E_{e,t,wast}}; \quad (7)$$

– общая эффективность

$$\eta_o^{ex} = \frac{\Sigma \Delta E_{a,us,i}}{\Delta E_{e,t,wast}}, \quad (8)$$

где  $\Delta E_{a,us,i}$  – разница эксергетических потоков воздуха *i*-ой полезной составляющей, кВт;

$\Delta E_{e,t,wast}$  – использованная эксергия энергоносителя на реализацию процесса;

$\Sigma \Delta E_{a,us,i}$  – сумма разницы эксергетических потоков воздуха полезных составляющих эксергии.

Психрометрические процессы, по которым были проведены расчеты эксергетической эффективности, представлены на I-d-диаграммах рисунка 1.

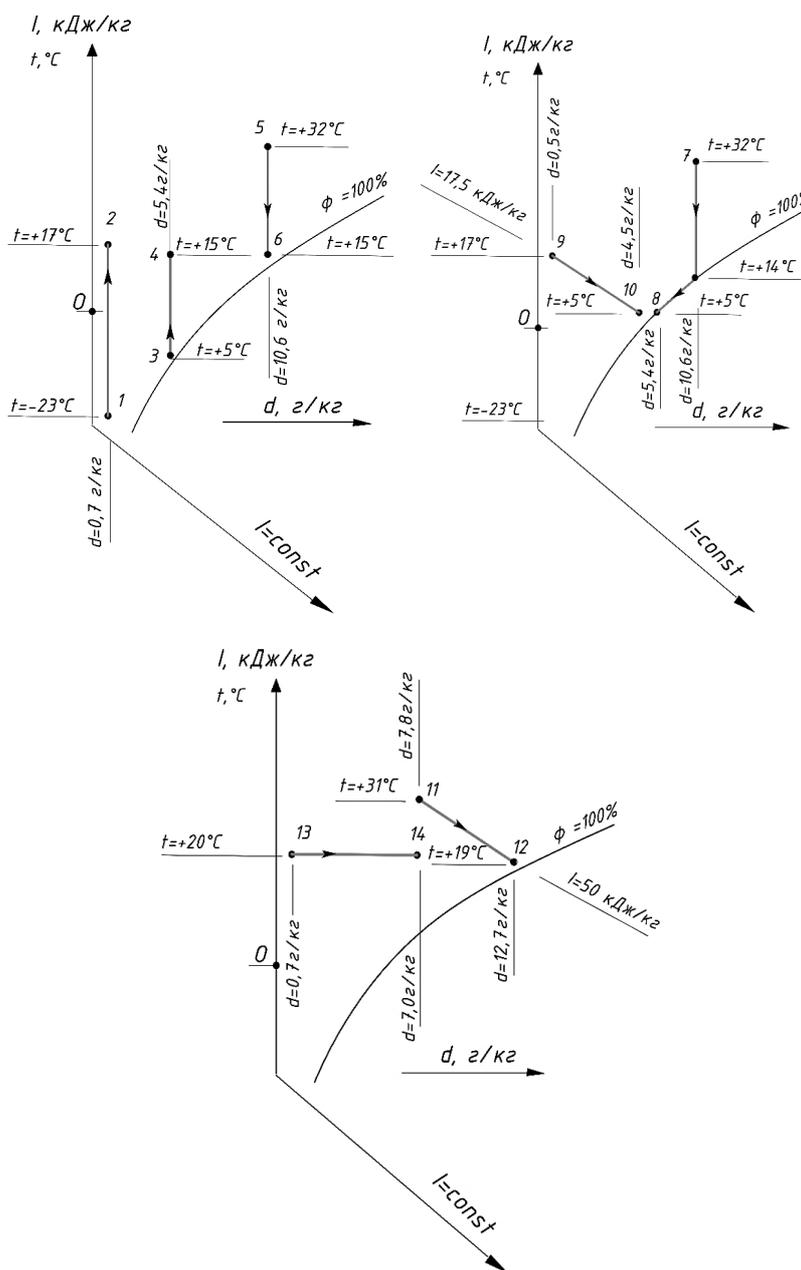
Результаты расчетов эксергетических потенциалов и ЭКПД приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты расчетов эксергетических потенциалов и эксергетической эффективности основных психрометрических процессов в СКВ

Психрометрический процесс	Разность эксергетических потенциалов и потоков воздуха в психрометрическом процессе по составляющим				Использованная эксергия энергоносителя на реализацию процесса, кВт	Эксергетическая эффективность процесса, %	
	Термическая удельная, кДж/кг/ абсолютная, кВт	Влажностная удельная, кДж/кг/ абсолютная, кВт	Механическая удельная, кДж/кг/ абсолютная, кВт	Полная абсолютная, кВт		Функциональная	Общая
1	2	3	4	5	6	7	8
Нагревание (процесс 1-2)	2,77	–	0,13	6,62	32,4	8,5	19,5
	6,32	–	0,3				
Нагревание (процесс 3-4)	0,796	–	0,049	1,92	3,279	24,2	58,5
	1,813	–	0,111				
Охлаждение (процесс 5-6)	0,509	–	0,049	1,271	2,64	19,2	48,1
	1,159	–	0,112				
Охлаждение и осушка с конденсацией влаги (процесс 7-8)	1,307	0,216	0,397	4,375	9,79	15,5	44,6
	2,978	0,492	0,905				

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
Адиабатное увлажнение (процесс 9-10)	1,186	0,677	0,042	4,345	6,32	10,7	68,7
	2,7	1,549	0,096				
Адиабатное охлаждение (процесс 11-12)	0,25	0,338	0,178	1,743	11,59	2,1	15,08
	0,569	0,769	0,405				
Изотермическое увлажнение (процесс 13-14)	0,038	1,128	0,0149	2,69	5,61	20,1	47,9
	0,086	2,56	0,033				



1–2, 3–4 – нагревание; 5–6 – сухое охлаждение; 7–8 – охлаждение и осушка с конденсацией влаги;  
9–10 – адиабатическое увлажнение; 11–12 – адиабатное охлаждение; 13–14 – изотермическое увлажнение

Рисунок. – I-d-диаграммы основных психрометрических процессов обработки воздуха  
в системах кондиционирования воздуха

Результаты расчетов показывают достаточно корректные показатели, которые позволяют численно определить значения эксергетических потенциалов и потоков каждого отдельного процесса обработки воздуха в СКВ. Полученные значения эксергетической эффективности психрометрических процессов демон-

стрируют уровни использования эксергии потоков различных энергоносителей для реализации соответствующих процессов обработки воздуха. Наибольшие значения ЭКПД отмечаются в процессах нагревания воздуха в холодный период года (процесс 3-4) и адиабатного увлажнения (процесс 9-10). В случае нагрева относительно высокий показатель ЭКПД, равный 58,5%, можно объяснить небольшой разницей температур нагреваемого воздуха (от 5 до 15 °С), положительным значением начальной температуры и небольшими эксергетическими затратами энергоносителя. Сравнение процесса нагрева 3-4 с процессом нагрева 1-2 для холодного периода года от расчетной температуры для Киева –22°С показывает значительную разницу как по показателю ЭКПД, так и по эксергетическим затратам энергоносителя, отличие в значениях которого составляет более, чем в десять раз. Что касается адиабатического увлажнения в процессе 9-10, то относительно высокое значение ЭКПД, равное 68,7%, характерно для подобных процессов, которые осуществляются без подвода энергоносителя за счет испарения влаги при орошении воздуха в форсуночных камерах кондиционеров. Наименьшее значение ЭКПД получено для процесса адиабатического охлаждения воздуха 11-12, что говорит о низкой эффективности его использования для охлаждения.

**Заключение.** Представленные в статье результаты эксергетического анализа основных психрометрических процессов в СКВ получены впервые с использованием оригинальной методики авторов. Методика позволяет получать достоверные численные значения и корректно оценивать показатели эксергетического анализа процессов обработки воздуха в СКВ с учетом всех составляющих эксергии влажного воздуха. Методика может быть использована для оценки показателей энергоэффективности процессов в СКВ при проектировании и обследовании систем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Задоянний, О.В. Методологічні питання задоволення основної вимоги «Економія енергії»/ О.В. Задоянний, Ю.М. Євдокименко // Енергоефективність в будівництві та архітектурі : наук.-техн. зб. ; Відповід. ред. П.М. Куліков. – Київ : КНУБА, 2017. – Вип. 9. – С. 84–88.
2. Эксергетические расчеты технических систем : справ. пособие / В.М. Бродянский [и др.] ; под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского / АН УССР. Ин-т техн. теплофизики. – Киев : Наук. Думка, 1991. – 360 с.
3. Обґрунтування поглибленого ексергоекономічного аналізу систем кондиціонування повітря // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. збір. – Київ : КНУБіА, 2019. – Вип. 31. – С. 24–32.
4. Задоянний, О.В. Види ексергії в системах кондиціонування повітря та їх визначення / О.В. Задоянний, Ю.М. Євдокименко // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. – Київ : КНУБіА, 2016. – Вип. 19. – С. 3–15.

Поступила 10.12.2020

#### IN-DEPTH EXERGETIC ANALYSIS OF THE MAIN PSYCHROMETRIC PROCESSES IN AIR CONDITIONING SYSTEMS

A. ZADOYANNY, Y. YEVDOKIMENKO

*The article presents the results of calculations of the relative exergy efficiency of the main psychrometric processes in central air conditioning systems. The calculations were carried out according to the original method, which is based on the modern theory of exergy analysis, taking into account the components of the exergy of moist air and energy carriers. The method takes into account the individual components of the exergy of air - thermal, chemical concentration (moisture) and mechanical, which makes it possible to take into account and analyze their thermodynamic potentials separately and determine the indicators of the relative efficiency of the processes of heating, cooling, humidification and air drying. This distinctive feature from the traditional methodology is the correct tool for comparative assessment of the energy efficiency of each individual process. The depth of the exergy analysis of the method presented in the work consists in taking into account all the components of moist air exergy. The thermodynamic potentials of the components in air handling processes are comparable to each other, which allows them to be correctly compared when analyzing energy efficiency. The paper shows the possibility of determining the exergetic efficiency separately by the components of the processes in combined air treatment, taking into account the weight of each individual process. The results of the above calculations show the level of energy efficiency of the main psychrometric processes and make it possible to correctly compare each of them. The scientific and methodological provisions of in-depth exergy analysis of air handling processes in central air conditioners presented in the work can serve as a basic method for assessing, optimizing and adjusting circuit solutions according to the criterion of exergy efficiency of air conditioning systems at all stages of their life cycle and also in the development of new systems and functional elements.*

**Keywords:** air conditioning systems; psychrometric processes; exergetic analysis; exergetic efficiency.