



Особенности расчёта технико-экономических показателей автоматизированных климатических систем

Рецензия эксперта на статью получена 15.10.2018 [Expert review on the article received October 15, 2018].

Технико-экономическое обоснование применения энергосберегающих мероприятий является неотъемлемой составляющей разработки проектов инженерных решений по уменьшению энергопотребления при эксплуатации зданий и их инженерных систем. Это объясняется в первую очередь тем обстоятельством, что энергосбережение является, строго говоря, не самоцелью, а средством для снижения капитальных затрат и эксплуатационных издержек в рамках полного жизненного цикла здания.

Для реализации энергосбережения в нашей стране и за рубежом предлагаются различные мероприятия, связанные как с ограждающими конструкциями, так и с применением соответствующего климатического оборудования, а также способов его тепло- и холодоснабжения и управления [1–6]. Одним из наиболее эффективных способов сокращения расхода энергии при обеспечении необходимой комфортности внутреннего микроклимата помещений является автоматизация обслуживающих их систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

В работе [7] авторами было показано, что оптимальное регулирование теплообменного оборудования таких систем по пропорциональному закону оказывается достаточно малозатратным и быстрокупаемым, и даже с учётом дисконтирования затрат расчётный срок окупаемости технических средств автоматизации для большой группы общественных зданий оказывается в пределах от восьми до 13 лет. Это заведомо меньше проектного срока службы рассматриваемых систем.

Коэффициент ассимиляции переменных теплопоступлений равен отношению расчётного значения теплоизбытков, используемого при вычислении расхода воздуха, к максимальному в течение суток. Данный параметр всегда меньше единицы за счёт управляющего воздействия систем автоматизации и собственной теплоустойчивости помещения

УДК 697.1. Научная специальность: 05.23.03.

Особенности расчёта технико-экономических показателей автоматизированных климатических систем

Олег Д. Самарин, к.т.н., доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); **Кирилл И. Лушин**, директор Института инженерно-экологического строительства и механизации (ИИЭСМ, НИУ МГСУ); **Светлана С. Азивская**, ведущий инженер (ООО «ГазпромТрансгазМосква»)

Изложены основы отечественных и зарубежных предложений по сокращению энергозатрат при эксплуатации климатических систем гражданских объектов различного назначения. Проведена оценка верхнего предела срока окупаемости дополнительных капитальных затрат при переходе на оптимальный пропорциональный закон регулирования теплообменного оборудования в системах механической вентиляции и кондиционирования воздуха общественных зданий, с учётом сокращения расчётного воздухообмена за счёт совместного влияния собственной теплоустойчивости помещений и управляющего воздействия систем автоматизации, и дан анализ полученных результатов. Показано, что для подавляющего большинства проанализированных зданий расчётный дисконтированный срок окупаемости изменяется в достаточно узких пределах и в любом случае значительно меньше проектного срока службы вентиляционного оборудования. Изложение проиллюстрировано численными расчётами и табличными данными.

Ключевые слова: энергосбережение, регулирование, пропорциональный закон, коэффициент ассимиляции, совокупные дисконтированные затраты, срок окупаемости.

UDC 697.1. Number of scientific specialty: 05.23.03.

Features of the calculation of technical and economic indicators of automated climate systems

Oleg D. Samarин, PhD, Associate Professor, National Research University Moscow State of Civil Engineering (NRU MGSU); **Kirill I. Lushin**, head of the Institute of Environmental Engineering and Mechanization (IEEM, NRU MGSU); **Svetlana S. Azivskaya**, leading engineer ("GazpromTransgazMoskva", LLC)

The paper presents the basics of domestic and foreign proposals to reduce energy consumption in the operation of climatic systems of civil objects for various purposes. The estimation of the upper limit of the payback period of additional capital costs in the transition to the optimal proportional law of regulation of heat exchange equipment in mechanical ventilation and air conditioning systems of public buildings, taking into account the reduction of the calculated air flow due to the combined effect of the own thermostability of the premises and the control action of automation systems and the analysis of the obtained results is given. It is shown that for the vast majority of the analyzed buildings the calculated discounted payback period varies within rather narrow limits and in any case is much less than the design life of the ventilation equipment. The presentation is illustrated by numerical calculations and tabular data.

Key words: energy saving, control, proportional algorithm, assimilation factor, combined discounted costs, payback term.



Однако данный результат можно ещё улучшить, если дополнительно учесть уменьшение расчётного воздухообмена помещений за счёт введения коэффициента ассимиляции переменных теплопоступлений K_{acc} [8]. По определению он равен отношению расчётного значения теплоизбытков, используемого при вычислении расхода воздуха, к максимальному в течение суток. Данный параметр всегда меньше единицы за счёт управляющего воздействия систем автоматизации и собственной теплоустойчивости помещения. В рассматриваемом примере для группы зданий средних школ по различным типовым проектам [9], использованной в [7], этот коэффициент можно оценить из следующих соображений.

Будем считать, что материалом слоя наружной стены, обращённого в помещения, является лёгкий бетон, покрытие по-

ла — это линолеум, плита перекрытия — из железобетона, а внутренние ограждающие конструкции покрыты сухой штукатуркой, что достаточно типично для зданий образовательных учреждений. Тогда, в соответствии с данными [8], отношение показателя теплоусвоения ограждений к показателю конвективного теплообмена на их поверхностях $\sum(YF)/\sum(\alpha F) = 4,1$, откуда по формуле (1) [8], при доле конвективной составляющей в переменных теплопоступлениях $q_k = 0,4$, находим составляющую K_{acc} , связанную с ассимиляцией лучистых теплоизбытков конвективным тепловым воздействием автоматизированной климатической системы:

$$B_o = \frac{1 + q_k \frac{\sum(YF)}{\sum(\alpha F)}}{1 + \frac{\sum(YF)}{\sum(\alpha F)}} = \frac{1 + 0,4 \times 4,1}{1 + 4,1} = 0,52. \quad (1)$$



Кроме того, из [2] определяем, что в рассматриваемых условиях удельная величина показателя теплопоглощения помещения, отнесённая к 1 м^2 площади всех ограждений, равна $P_{уд} = 1,61 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. В нашем случае удобно отнести её к 1 м^2 площади пола, поэтому, имея в виду, что поверхность потолка имеет такое же значение, а наружные стены и окна в исследуемой группе зданий в среднем имеют площадь, примерно в три раза меньшую [9], находим:

$$\bar{P}_{уд} = 1,61 \times (2 + 1/3) = 3,75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Удельные теплопоступления, также рассчитанные на 1 м^2 пола, можно оценить в размере $30 \text{ Вт}/\text{м}^2$ от солнечной радиации, $25 \text{ Вт}/\text{м}^2$ от искусственного освещения и $35 \text{ Вт}/\text{м}^2$ исходя из имеющегося коэффициента остекления, заполняемости учебных помещений и норм освещённости, в соответствии с действующими нормативными документами и данными справочной литературы, например [10]. Тогда суммарная величина возмущающего теплового воздействия

$$\bar{Q}_{возм} = 30 + 25 + 35 = 90 \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

а амплитуда его колебаний может быть принята примерно в два раза меньше [8], то есть $A_{Q_{возм}} = 90/2 = 45 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Если теперь принять допустимую амплитуду колебаний температуры внутреннего воздуха по ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» равной $A_{tв} = 2,5 \text{ К}$ (половина диапазона для помещений второй категории, к которым относятся учебные классы), по выражению (2) [8] можно вычислить среднее значение динамического коэффициента регулирования вентиляционных систем:

$$R_{дин} = \frac{A_{tв} P'_{пом}}{A_{Q_{возм}}} = \frac{2,5 \times 3,75}{45} = 0,21. \quad (2)$$

Из формулы для расчётного значения теплоизбытков с учётом коэффициента ассимиляции $Q_{расч} = A_{Q_{возм}}(1 + K_{acc})$ ([8], с изменениями) нетрудно получить, что отношение принятых воздухообменов L_2/L_1 для разных вариантов расчёта будет равно величине:

$$\frac{1 + K_{acc2}}{1 + K_{acc1}}.$$

Имея в виду, что при $R_{дин} = 0,21 < 0,75$ соотношение для коэффициента ассимиляции переменных теплопоступлений записывается как $K_{acc} = (1 - 0,9R_{дин})B_o$ [8], окончательно находим:

$$\begin{aligned} \frac{L_2}{L_1} &= \frac{1 + (1 - 0,9R_{дин})B_o}{1 + B_o} = \\ &= \frac{1 + (1 - 0,9 \times 0,21) \times 0,52}{1 + 0,52} = 0,93. \quad (3) \end{aligned}$$

Показатели вентиляционного оборудования зданий средних школ с учётом сокращения воздухообмена за счёт автоматизации

табл. 1

Здание	Отапливаемый объём $V_{от}$, м ³	$L_{п} = L_2$, м ³ /ч	K_1 , руб.	ΔQ_T , ГДж	$\Delta \mathcal{E}$, руб/год	T_0 , год	$T_{ок}$, год	$\bar{T}_{ок}$, год
1	7732	10 635	156 000	75,61	33 633	4,64	6,14	13,60
2	11 830	25 986	409 500	184,75	82 180	4,98	6,75	15,61
3	15 359	17 355	238 980	123,39	54 883	4,35	5,67	12,16
4	5367	7462	56 238	53,05	23 598	2,38	2,77	5,17
5	8193	11 696	156 000	83,15	36 987	4,22	5,44	11,52
6	28 000	15 546	238 980	110,52	49 163	4,86	6,53	14,86
7	7591	10 611	156 000	75,44	33 555	4,65	6,16	13,66
8	31 370	43 324	624 000	308,01	137 007	4,55	6,00	13,16
9	14 500	11 422	156 000	81,20	36 120	4,32	5,61	11,99
10	11 690	6534	56 238	46,45	20 663	2,72	3,23	6,13
11	10 102	14 167	238 980	100,72	44 803	5,33	7,40	18,06
12	7076	9193	136 500	65,36	29 073	4,70	6,24	13,91
13	9773	3245	34 533	23,07	10 261	3,37	4,13	8,17
14	9005	2018	14 547	14,35	6383	2,28	2,64	4,90
15	10526	3994	26 445	28,40	12 631	2,09	2,40	4,42
16	7611	10 115	136 500	71,91	31 987	4,27	5,52	11,75
17	9424	19 124	273 000	135,96	60 477	4,51	5,93	12,95
18	11 965	14 199	238 980	100,95	44 902	5,32	7,38	17,97
19	11 608	24 333	312 000	173,00	76 951	4,05	5,18	10,81
20	16 704	44 398	624 000	315,65	140 406	4,44	5,82	12,60
21	15 125	30 439	409 500	216,41	96 262	4,25	5,50	11,69
22	18 429	18 390	273 000	130,75	58 157	4,69	6,24	13,90
23	9141	18 677	273 000	132,79	59 064	4,62	6,12	13,51
24	9328	8163	56 238	58,04	25 815	2,18	2,51	4,63
25	10 943	21 667	393 180	154,04	68 519	5,74	8,20	21,66
26	23 350	35 157	468 000	249,95	111 182	4,21	5,43	11,49
Среднее						4,14	5,42	11,933

Видно, что в рассматриваемом случае это не слишком значительная величина, поэтому на типоразмеры вентиляционных установок и, следовательно, на капитальные затраты это не повлияет, однако пропорционально будут сокращаться эксплуатационные расходы $\mathcal{E}$ на обработку воздуха, поскольку вырастет параметр ΔQ_T — уменьшение годовых затрат теплоты на обработку приточного воздуха за счёт автоматизации теплообменного оборудования. Тогда результаты расчёта для исследуемой группы зданий можно свести в табл. 1.

В данной таблице: K_1 — стоимость технических средств автоматизации, которая, так же, как и в [7], принималась исходя из стоимости конкретных вентиляционных установок соответствующей воздухопроизводительности по данным [11]; T_0 и $T_{ок}$ — бездисконтный и дисконтированный срок окупаемости затрат на автоматизацию [8], соответственно. Уровень ΔQ_T рассчитывался исходя из положения о том, что оптимальное регулирование сокращает годовые затраты теплоты на 10 % [7], а сами эти затраты вычислялись для климатических условий Москвы при значении ГСОП (градусо-суток отопительного периода), равном 4515 К·сут.

Для сравнения в последней колонке таблицы приведены значения дисконтированного срока окупаемости $\bar{T}_{ок}$, полученного в [7] без учёта снижения расчётного воздухообмена. Видно, что такое снижение за счёт совместного воздействия автоматического регулирования и собственной теплоустойчивости помещений приводит к сокращению расчётного срока окупаемости примерно в два раза.

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что при действующем уровне цен и тарифов на оборудование и энергоносители применение оптимального, то есть пропорционального закона регулирования для систем обеспечения микроклимата общественных зданий по сравнению с законами, включающими

интегральную составляющую, не только упрощает конструкцию автоматики, но и позволяет добиться очевидного экономического эффекта. ●

По табл. 1 легко видеть, что снижение расчётного воздухообмена за счёт совместного воздействия автоматического регулирования и собственной теплоустойчивости помещений приводит к сокращению расчётного срока окупаемости примерно в два раза

1. Малявина Е.Г., Крючкова О.Ю. Оценка энергопотребления различными центральными системами кондиционирования воздуха // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. №4. С. 149–152.
2. Рымаров А.Г., Савичев В.В. Особенности работы регенеративной системы вентиляции административного здания // Вестник МГСУ. 2013. №3. С. 174–177.
3. Шарапов В.И. О некоторых аспектах технической политики в теплоснабжении // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. №5. С. 9–12.
4. Paiho S., Abdurafikov R., Hoang H. Cost analyses of energy-efficient renovations of a Moscow residential district. Sustainable Cities and Society. 2015. No. 1. Pp. 5–15.
5. Allan Hani, Teet-Andrus Koiv. Energy Consumption Monitoring Analysis for Residential, Educational and Public Buildings. Smart Grid and Renewable Energy. Vol. 3. No. 3. 2012. Pp. 231–238.
6. Jedinák Richard. Energy Efficiency of Building Envelopes. Advanced Materials Research. 2013. Vol. 855. Pp. 39–42.
7. Самарин О.Д., Азизская С.С. Техничко-экономические показатели автоматизированных климатических систем при оптимальном регулировании // Журнал С.О.К., 2018. №5. С. 92–94.
8. Самарин О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность. — М.: Изд-во АСВ, 2014. 296 с.
9. Перечень типовой документации общественных зданий для строительства в городах и посёлках городского типа. Строит. каталог. — М.: ГУП ЦПП, 1994.
10. Белова Е.М. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях. — М.: Евроклимат, 2006. 640 с.
11. Приточные вентиляционные установки производительностью 10000 м³/ч [Электр. ресурс]. Климатическая компания «MirCli». Режим доступа: mircli.ru. Дата обращ.: 22.04.2018.

References — see page 94.

Account of an assimilation factor of variable heat ingress in the calculation of technical and economic parameters of automated climatic systems. Pp. 86–88.

Oleg D. Samarin, PhD, Associate Professor, National Research University Moscow State of Civil Engineering (NRU MGSU); **Kirill I. Lushin**, head of the Institute of Environmental Engineering and Mechanization (IEEM, NRU MGSU); **Svetlana S. Azivskaya**, leading engineer ("GazpromTransgazMoskva", LLC)

1. Maljavina E.G., Krjuchkova O.Ju. *Ocenka jenergopotreblenija razlichnymi central'nymi sistemami kondicionirovanija vozduha* [Assessment of energy consumption by various central air conditioning systems]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga region]. 2014. No. 4. Pp. 149–152.
2. Rymarov A.G., Savichev V.V. *Osobennosti raboty regenerativnoj sistemy ventiljacii administrativnogo zdanija* [Features of the regenerative ventilation system of an administrative building]. *Vestnik MGSU* [Papers of the National Research University Moscow State of Civil Engineering (NRU MGSU)]. 2013. No. 3. Pp. 174–177.
3. Sharapov V.I. *O nekotoryh aspektah tehnichejskoj politiki v teplosnabzhenii* [On some aspects of technical policy in heat supply]. *Jenergoberezhenie i vodopodgotovka* ["Energy saving and water treatment" Magazine]. 2013. No. 5. Pp. 9–12.
4. Paiho S., Abdurafikov R., Hoang H. Cost analyses of energy-efficient renovations of a Moscow residential district. *Sustainable Cities and Society*. 2015. Vol. 14. No. 1. Pp. 5–15.
5. Allan Hani, Teet-Andrus Koiv. Energy Consumption Monitoring Analysis for Residential, Educational and Public Buildings. *Smart Grid and Renewable Energy*. Vol. 3. No. 3. 2012. Pp. 231–238.
6. Jedinák Richard. Energy Efficiency of Building Envelopes. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 855. Pp. 39–42.
7. Samarin O.D., Azivskaja S.S. *Tehniko-jekonomicheskie pokazateli avtomatizirovannyh klimaticheskikh sistem pri optimal'nom regulirovanii* [Technical and economic indicators of automated climate systems with optimal regulation]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (S.O.K.)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2018. No. 5. Pp. 92–94.
8. Samarin O.D. *Teplofizika. Jenergoberezhenie. Jenergojeffektivnost'* [Thermophysics. Energy saving. Energy efficiency]. Moscow. *Izd-vo ASV* [Publishing House of the Association of Construction Universities]. 2014. 296 p.
9. *Stroitel'nyj katalog. Perechen' tipovoj dokumentacii obshhestvennyh zdanij dlja stroitel'stva v gorodah i poselkakh gorodskogo tipa* [Building directory. The list of standard documentation of public buildings for construction in cities and urban-type settlements]. Moscow. *GUP CPP* [State Unitary Enterprise "Centre of Construction Design Products"]. 1994.
10. Belova E.M. *Central'nye sistemy kondicionirovanija vozduha v zdanijah* [Central air conditioning systems in buildings]. Moscow. *Evroklimat* ["Euroclimate", LLC]. 2006. 640 p.
11. *Pritochnye ventiljacionnye ustanovki proizvoditel'nost'ju 10000 m³/ch* [Air handling units with capacity of 10,000 m³/h]. *Klimaticheskaja kompanija "MirCli"* ["MirCli" Climate Company]. Web-source: mircli.ru. Access data: April 22, 2018.