



Технико-экономические показатели автоматизированных климатических систем при оптимальном регулировании

Рецензия эксперта на статью получена 12.05.2018 [Expert review on the article was received on May 12, 2018].

Снижение энергозатрат при обеспечении необходимой комфортности микроклимата помещений является одной из основных задач при строительстве и эксплуатации здания. Особое значение данная тема приобретает в настоящее время, в условиях действия Федерального закона от 23 ноября 2009 года №261-ФЗ «Об энергосбережении...». При этом 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]. В работе [7] авторами было отмечено, что применение оптимального пропорционального закона регулирования теплообменного оборудования климатических систем позволяет уменьшить суммарное годовое потребление теплоты на обработку приточного воздуха примерно на 10 % по сравнению с используемыми обычно законами с интегральной составляющей.

Рассмотрим теперь технико-экономическое обоснование использования такого закона. В условиях рыночной экономики

сравнение вариантов целесообразно вести с использованием совокупных дисконтированных затрат $СДЗ$. Если считать, что эксплуатационные издержки за каждый год, выраженные в неизменных ценах, будут одинаковыми, тогда величина $СДЗ$ [руб.], приведённых к концу расчётного срока T , для каждого варианта определяется по следующей формуле [8–9]:

$$СДЗ = K \left(1 + \frac{p}{100} \right)^T + \Theta \left[\left(1 + \frac{p}{100} \right)^T - 1 \right] \frac{100}{p}, \quad (1)$$

где K — капитальные единовременные затраты, руб.; Θ — суммарные годовые эксплуатационные издержки для рассматриваемого варианта, руб/год; p — норма дисконта, %.

Применение оптимального пропорционального закона регулирования теплообменного оборудования климатических систем позволяет уменьшить суммарное годовое потребление теплоты примерно на 10 %

УДК 697.1

Технико-экономические показатели автоматизированных климатических систем при оптимальном регулировании

О. Д. Самарин, к.т.н., доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); **С. С. Азизская**, ведущий инженер, компания ООО «ГазпромТрансгазМосква»

Рассмотрена существующая ситуация с обеспечением снижения энергопотребления при поддержании требуемой комфортности внутреннего микроклимата общественных зданий в России. 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 использованием метода совокупных дисконтированных затрат 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 вентоборудования. Изложение проиллюстрировано численными расчётами и табличными данными.

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

UDC 697.1

Technical and economic indicators of automated climatic systems with optimal regulation

O. D. Samarina, PhD, Associate Professor, Moscow State National Research University of Civil Engineering (NRU MGSU); **S. S. Azivskaya**, Leading Engineer, GazpromTransgazMoskva, Ltd.

The article considers the existing situation with ensuring the reduction of energy consumption while maintaining the required comfort of the internal microclimate of public buildings in Russia. The basics of domestic and foreign proposals to reduce energy consumption in the operation of climatic systems of civil facilities for various purposes are presented. The estimation of the upper limit of the payback term of additional capital costs in the transition to the optimal proportional control algorithm of heat exchange equipment in mechanical ventilation and air conditioning systems of public buildings is carried out using the method of combined discounted costs and the analysis of the results is given. It is shown that for the vast majority of the analyzed buildings the estimated discounted payback term varies within rather narrow limits and in any case significantly less than the design life of the ventilation equipment. The presentation is illustrated by numerical calculations and tabular data.

Keywords: energy saving, control, proportional algorithm, combined discounted costs, payback term.



Если считать, что для приобретения дополнительного оборудования и материалов привлекаются собственные средства инвестора, тогда p учитывает упущенную выгоду от того, что эти средства вложены в энергосбережение вместо размещения под проценты в банке. В расчётах её можно принимать равной среднерыночной банковской ставке по кредитам или не ниже ставки рефинансирования ЦБ РФ. По состоянию на конец 2017 года эта ставка составляет 8,5 % годовых.

Величина p связана с текущей величиной данной ставки, а также с коммерческими рисками капиталовложений. Если оборудование приобретается с использованием заёмных средств, параметр p учитывает годовой процент за кредит, взятый в банке на осуществление данных затрат.

Норма дисконта учитывает упущенную выгоду от того, что эти средства вложены в энергосбережение вместо размещения под проценты в банке

Можно показать, что верхний предел дополнительных капитальных затрат на оборудование системы вентиляции или кондиционирования воздуха соответствующими устройствами автоматизации оценивается примерно в размере 30 % стоимости приточной установки в базовом исполнении (приёмная секция, фильтр, воздухонагреватель и вентиляторная секция) [9]. Если в качестве примера рассмотреть здание средней школы по типовому проекту 221-1-25-387, подробно исследованное в [9], можно прийти к следующим результатам.

При расходе приточного воздуха $L_{\text{п}} = 15\,200 \text{ м}^3/\text{ч}$ расходы на вентиляционное оборудование в типовой комплектации будут равны $45 \times 15\,200 = 684\,000 \text{ руб.}$, где 45 — удельная стоимость на $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ воздухопроизводительности (ориентировочные данные на начало 2018 года [10]). Отсюда капитальные затраты в первом варианте (при оптимальном регулировании) равны затратам на автоматизацию

$$K_1 = 0,3 \times 684\,000 = 205\,200 \text{ руб.},$$

а $\Delta_1 = 0$; во втором варианте, напротив, считаем $K_2 = 0$; $\Delta_2 = 26\,279 \text{ руб/год}$ — дополнительные затраты на теплоту за счёт превышения годового теплотребления $\Delta Q_{\text{г}}$ на 59,1 ГДж [7] при тарифе на тепловую энергию по данным ОАО «МОЭК» в размере 1863,76 руб/Гкал на вторую половину 2017 года. Строим графики зависимости СДЗ от расчётного срока T и показываем результаты на рис. 1. Сплошная

линия соответствует первому варианту, пунктирная — второму.

Графики пересекаются при T , примерно равном 13 годам, что и будет являться ориентировочным значением дисконтированного срока окупаемости дополнительных капитальных затрат $T_{\text{ок}}$.

Более точно величину $T_{\text{ок}}$ можно вычислить по формуле [8–9]:

$$T_{\text{ок}} = \frac{-\ln\left(1 - \frac{pT_0}{100}\right)}{\ln\left(1 + \frac{p}{100}\right)}, \quad (2)$$

где $T_0 = \frac{K_1 - K_2}{\Delta_2 - \Delta_1}$ — бездисконтный срок окупаемости, годы.

Формула для $T_{\text{ок}}$ будет корректной, когда аргумент логарифма в числителе оказывается положительным. Таким образом, критерием окупаемости дополнительных капитальных затрат при учёте дисконтирования служит неравенство:

$$\Delta_2 - \Delta_1 > \frac{(K_1 - K_2)p}{100},$$

смысл которого состоит в том, что годовая экономия эксплуатационных затрат по выбранному варианту должна быть больше, чем упущенная выгода.

В нашем случае:

$$T_0 = \frac{205\,200 - 0}{26\,279 - 0} = 7,8 \text{ лет, откуда}$$

$$T_{\text{от}} = \frac{-\ln\left(1 - \frac{8,5 \times 7,8}{100}\right)}{\ln\left(1 + \frac{8,5}{100}\right)} = 13,38 \text{ лет.}$$

Данное значение меньше расчётного срока службы как вентиляционного оборудования, так и технических средств автоматизации (обычно около 15–20 лет).

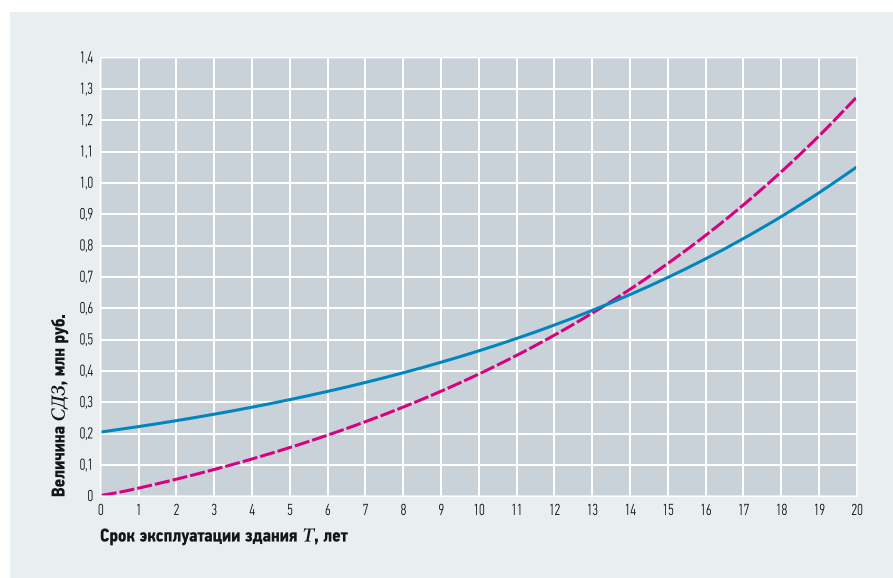


Рис. 1. Зависимость СДЗ от T для сравниваемых вариантов

Технико-экономические показатели вентиляционного оборудования зданий средних школ

табл. 1

Здание	Отапливаемый объём $V_{от}$, м³	$L_{п}$, м³/ч	K_1 , руб.	$\Delta Q_{п}$, ГДж	Δ_2 , руб/год	T_0 , годы	$T_{ок}$, годы
1	7732	11 436	156 000	44	19 784	7,89	13,60
2	11 830	27 942	409 500	109	48 341	8,47	15,61
3	15 359	18 661	238 980	73	32 284	7,40	12,16
4	5367	8024	56 238	31	13 881	4,05	5,17
5	8193	12 576	156 000	49	21 757	7,17	11,52
6	28 000	16 716	238 980	65	28 919	8,26	14,86
7	7591	11 409	156 000	44	19 738	7,90	13,66
8	31 370	46 584	624 000	181	80 592	7,74	13,16
9	14 500	12 282	156 000	48	21 247	7,34	11,99
10	11 690	7026	56 238	27	12 155	4,63	6,13
11	10 102	15 234	238 980	59	26 355	9,07	18,06
12	7076	9885	136 500	38	17 102	7,98	13,91
13	9773	3489	34 533	14	6036	5,72	8,17
14	9005	2170	14 547	8	3755	3,87	4,90
15	10 526	4295	26 445	17	7430	3,56	4,42
16	7611	10 876	136 500	42	18 816	7,25	11,75
17	9424	20 563	273 000	80	35 575	7,67	12,95
18	11 965	15 267	238 980	59	26 413	9,05	17,97
19	11 608	26 164	312 000	102	45 265	6,89	10,81
20	16 704	47 740	624 000	186	82 592	7,56	12,60
21	15 125	32 731	409 500	127	56 625	7,23	11,69
22	18 429	19 774	273 000	77	34 210	7,98	13,90
23	9141	20 083	273 000	78	34 744	7,86	13,51
24	9328	8778	56 238	34	15 186	3,70	4,63
25	10 943	23 298	393 180	91	40 306	9,75	21,66
26	23 350	37 804	468 000	147	65 401	7,16	11,49
Среднее						7,045	11,933

В табл. 1 приведены результаты расчётов по приведённым в данном разделе формулам для группы зданий средних школ по различным типовым проектам [11]. При этом стоимость вентиляционного оборудования, пропорционально которой определяются затраты на автоматизацию K , принималась более точно для конкретных вентиляционных установок соответствующей воздухопроизводительности по данным [10]. В случае $L_{п} \geq 20\,000$ м³/ч считалось, что в здании действуют две, три или четыре одинаковых установки. Уровень $\Delta Q_{п}$ рассчитывался, как было упомянуто ранее, исходя из положения о том, что оптимальное регулирование сокращает годовые затраты теплоты на 10 %, а сами эти затраты вычислялись для климатических условий Москвы при значении градусо-суток отопительного периода $ГСОП = 4515$ К·сут.

Необходимо заметить, что средние значения T_0 и $T_{ок}$ даже несколько ниже, чем для приведённого ранее примера, но в целом получаемые значения оказываются того же порядка величины и, во всяком случае, существенно меньше расчётного срока службы оборудования. На самом деле величина $T_{ок}$ будет ещё меньше, поскольку то или иное оборудование

для автоматизации будет присутствовать и во втором варианте, поэтому разница между капитальными затратами никогда не достигнет использованной в расчётах предельной величины.

Средние значения бездисконтного и дисконтированного сроков окупаемости допзатрат будут даже несколько ниже, чем для приведённого ранее примера, но в целом получаемые значения оказываются того же порядка величины

Итак, 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. Как было показано в [7] и других работах авторов, некоторое ухудшение качества поддержания внутренних метео-

параметров при этом не является критическим, и для большинства объектов им можно пренебречь. ●

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(85). С. 9–12.
4. Pailho 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 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. Влияние закона регулирования на годовой расход теплоты автоматизированными климатическими системами // Инженерно-строительный журнал, 2012. №2. С. 48–50.
8. Гагарин В.Г. Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий // Строительные материалы, 2010. №3. С. 8–16.
9. Самарин О.Д. Вопросы экономики в обеспечении микроклимата зданий: Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Изд-во «АСВ», 2015. 136 с.
10. Приточные вентиляционные установки 10000 м³/ч [Электр. ресурс]. Режим доступа: mircl.ru. Дата обращения: 22.04.2018.
11. Строительный каталог. Перечень типовой документации общественных зданий для строительства в городах и посёлках. — М.: ГУП ЦПП, 1994.

References — see page 95.

Technical and economic indicators of automated climatic systems with optimal regulation. Pp. 92–94.

O. D. Samarin, PhD, Associate Professor, Moscow State University of Civil Engineering National Research University (NRU MGSU); **S. S. Azivskaya**, Leading Engineer, GazpromTransgazMoskva, Ltd.

1. Malyavina E.G., Kryuchkova O.Yu. *Otsenka energopotrebleniya razlichnymi tsentral'nymi sistemami konditsionirovaniya vozdukh* [Estimation of the energy consumption of the different central air condition systems]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya* [Science and Technical News of the Volga Region]. 2014. No. 4. Pp. 149–152.
2. Rymarov A.G., Savichev V.V. *Osobennosti raboty regenerativnoy sistemy ventilyatsii administrativnogo zdaniya* [Features of operation of the regenerative ventilating system of the administrative building]. *Vestnik MGSU* [Papers of the MGSU]. 2013. No. 3. Pp. 174–177.
3. Sharapov V.I. *O nekotorykh aspektakh tekhnicheskoy politiki v teplosnabzhenii* [On some aspects of the technical policy in the heat supply]. *Energoberezheniye i vodopodgotovka* [“Energy saving and water treatment” Magazine]. 2013. Vol. 85. No. 5. Pp. 9–12.
4. Paiho S., Abdurafikov R., Hoang H. *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*. 2012. Vol. 3. No. 3. Pp. 231–238.
6. Jedinák Richard. *Energy Efficiency of Building Envelopes*. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 855. Pp. 39–42.
7. Samarin O.D., Azivskaya S.S. *Vliyaniye zakona regulirovaniya na godovoy raskhod teploty avtomatizirovannymi klimaticheskimi sistemami* [Influence of the control algorithm on the annual heat expenditure of the automated climatic systems]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering]. 2012. No. 2. Pp. 48–50.
8. Gagarin V.G. *Makroekonomicheskiye aspekty obosnovaniya energosberegayushchikh meropriyatiy pri povyshenii teplozashchity ograzhdayushchikh konstruktsiy zdaniy* [Macroeconomic features of justification of energy saving measures during increase of thermal performance of building enclosures]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 2010. No. 3. Pp. 8–16.
9. Samarin O.D. *Voprosy ekonomiki v obespechenii mikroklimata zdaniy* [Problems of economics in maintenance of a building microclimate]. 2nd ed., revised and exp. Moscow. *Izdatel'stvo “ASV”* [“ASV” Publishers]. 2015. 134 p.
10. *Pritochnye ventilatsionnye ustanovki 10000 m³/h* [Supply air ventilation systems with a flow rate of 10000 m³/h]. Web-source: mircli.ru. Access data: April 22, 2018.
11. *Stroitel'nyy katalog. Perechen' tipovoy dokumentatsii obshchestvennykh zdaniy dlya stroitel'stva v gorodakh i poselkakh gorodskogo tipa* [Building directory. The list of standard documentation of public buildings for construction in cities and urban settlements]. Moscow. *GUP CPP* [State Unitary Enterprise “Center for Design Products in Construction”]. 1994.