

Технико-экономическое обоснование применения специальной схемы обработки притока с косвенным испарительным охлаждением

Топливо-энергетический комплекс является основой формирования доходов бюджетной системы России. Развитие российской энергетики оказывает содействие социально-экономическому развитию страны, а также влияет на сохранение и укрепление её позиций в мировой энергетике. Согласно Энергетической стратегии РФ на период до 2035 года, утверждённой распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 года №1523-р, энергоёмкость экономики страны снизилась, причём одним из основных факторов, повлиявших на это, является рост энергоэффективности энергопотребляющего оборудования.

Эксплуатационные затраты инженерных систем вентиляции и кондиционирования воздуха достигают 60–80 % от общих расходов на энергообеспечение здания [1–3]. При этом рост цен на электроэнергию за последние четыре года составил порядка 30 % (табл. 1).

Следует также отметить, что вопросы повышения эффективности климатического оборудования и оценки необходимых для их функционирования затрат являются актуальными и для других стран [4–7]. В связи с этими обстоятельствами в работе [8] авторами предложена конструкция энергосберегающей установки кондиционирования воздуха с применением косвенного испарительного охлаждения в пластинчатом рекуператоре.

Статистические данные утверждают, что эксплуатационные затраты инженерных систем вентиляции и кондиционирования воздуха достигают 60–80 % от общих расходов на энергообеспечение здания

Рассмотрим технико-экономические аспекты использования обработки приточного воздуха по данной схеме.

Для этого проведём её сопоставление с ближайшим аналогом, описанным в [9, 10] и других публикациях указанных авторов. По сравнению с ним новая конструкция предусматривает переключение потоков воздуха при переходе с летнего на зимний режим и обратно, что позволяет, с одной стороны, применять одну и ту же секцию увлажнения в течение всего года, как для увлажнения притока, так и для его косвенного испарительного охлаждения, а с другой — даёт возможность увеличить в тёплый период эффективность рекуператора за счёт скрытой теплоты испарения капель жидкой воды, унос которой из увлажнителя появляется вследствие изменения направления воздушного потока.

Можно заметить, что, с точки зрения капитальных единовременных затрат K [руб.], в предлагаемом варианте исключаются

Тарифы на электрическую энергию в городе Москве

табл. 1

Вид энергии	Потребители / цена (тариф)	2017	2018	2019	2020	2021 (6 мес.)
Электрическая	Население (стационарные электроплиты и/или электроотопительные установки), руб/кВт·ч	3,77	4,04	4,37	4,65	4,87
	Прочие, руб/кВт·ч	1,79	2,188	2,41	2,40	2,47

Источник: ПАО «Мосэнергосбыт».

Рецензия эксперта на статью получена 29.01.2021 [The expert review on the article received on January 29, 2021].

UDK 697.921.252:699.86. Номер научной специальности: 05.23.03.

Технико-экономическое обоснование применения специальной схемы обработки притока с косвенным испарительным охлаждением

О.Д. Самарин, к.т.н., доцент; Д.А. Кирушок, преподаватель, аспирант, кафедре теплогазоснабжения и вентиляции (ТГВ), Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Рассмотрен расчёт основных составляющих капитальных затрат и годовых эксплуатационных издержек при функционировании разработанной авторами приточно-вытяжной вентиляционной установки, оборудованной пластинчатым рекуператором для осуществления косвенного испарительного охлаждения в тёплый период и утилизации теплоты вытяжного воздуха в холодный с переключением потоков воздуха, позволяющим использовать одну секцию увлажнения. Выполнено технико-экономическое сравнение с существующим аналогом, включающим два увлажнителя без изменения направления воздушных потоков, выявлены преимущества и недостатки предлагаемого варианта и определён его дисконтированный срок окупаемости с учётом действующих цен на оборудование по данным производителей и актуальных тарифов на тепловую и электрическую энергию. Доказано, что применение разработанного авторами агрегата является экономически обоснованным и относится к малозатратным и быстрокупаемым энергосберегающим мероприятиям.

Ключевые слова: капитальные затраты, эксплуатационные издержки, срок окупаемости, дисконтирование, приточный воздух, испарительное охлаждение.

UDC 697.921.252:699.86. The number of scientific specialty: 05.23.03.

Feasibility study of the application of a special flow treatment scheme with indirect evaporative cooling

O. D. Samarin, PhD, Associate Professor; D. A. Kirushok, teacher, post-graduate student, the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGUSU)

The calculation of the main components of capital costs and annual operating costs for the operation of the supply and exhaust ventilation system developed by the authors, equipped with a plate recuperator for indirect evaporative cooling in the warm period and for heat utilization of the exhaust air in the cold period with switching of air flows, allowing the use of one section of humidification. A technical and economic comparison with the existing analog, which includes two humidifiers without changing the direction of air flow, is performed, the advantages and disadvantages of the proposed option are identified and its discounted payback period is determined, taking into account the current prices for equipment according to manufacturers and current tariffs for heat and electricity. It is proved that the use of the unit developed by the authors is economically justified and refers to low-cost and fast-paying energy-saving measures.

Key words: capital costs, operating costs, payback period, discounting, supply air, evaporative cooling.

ются расходы на второй увлажнитель, по необходимости присутствующий в схеме [9, 10] и её вариантах, и могут также уменьшиться затраты в целом на приточно-вытяжной агрегат из-за возможного сокращения его типоразмера вследствие снижения требуемого воздухообмена в помещении L [м³/ч] из-за роста коэффициента эффективности рекуператора $k_{эф}$.

В то же время появляются дополнительные затраты на добавляемые промежуточные секции, но, поскольку их стоимость существенно меньше, чем увлажнителя, в большинстве случаев мы должны получить снижение суммарной величины K . При этом расходы на автоматизацию, монтаж и наладку установки должны оставаться практически постоянными, поскольку клапаны в дополнительно устанавливаемых секциях переключаются вручную при переходе с зимнего на летний режим и обратно.

Что касается эксплуатационных издержек $\mathcal{E}$ [руб/год], можно отметить, что в случае сокращения L должны уменьшиться затраты на теплоту для нагрева притока в холодный период, а также расход электроэнергии на привод вентиляторов, так как обе эти величины пропорциональны L . Но даже если воздухообмен меняться не будет, по крайней мере, расход электрической энергии должен снижаться за счёт того, что аэродинамическое сопротивление добавляемых промежуточных секций пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением исключаемого второго увлажнителя. Таким образом, в большинстве случаев применение предлагаемой схемы по сравнению с аналогом должно давать снижение как K , так и $\mathcal{E}$, то есть иметь абсолютную окупаемость.

Точный учёт всех перечисленных обстоятельств и оценку их относительного вклада в суммарные капитальные и эксплуатационные затраты исследуем на следующем примере. Рассмотрим для начала простейший вариант, когда мы в первом приближении пренебрегаем возможным уменьшением воздухообмена, и, таким образом, типоразмеры приточно-вытяжных агрегатов обоих сравниваемых конструкций будут одинаковы.

В этом случае мы сможем выделить в чистом виде влияние на составляющие затрат именно со стороны изменения схемы обработки притока. В частности, затраты на теплоту для подогрева вентиляционного воздуха за отопительный период тогда можно считать в обоих вариантах совпадающими, и различаться будут только расходы на электроэнергию и амортизацию оборудования.

Для получения более обоснованных результатов значения K принимаем по данным нескольких различных производителей (ООО «ВЕЗА» и ООО «Европейская Климатехника»). Компоненты $\mathcal{E}$ при этом вычислялись по методике, приведённой в [3], в соответствии с выбранной величиной L , режимом работы установок и рассчитанным при подборе их элементов аэродинамическим сопротивлением.

Эксплуатационные затраты [руб/год], связанные с потреблением электроэнергии системами вентиляции или кондиционирования воздуха, вычисляются как:

$$\mathcal{E}_{эл} = Z_p N_{раб} N_{уст} C_{эл}, \quad (1)$$

где Z_p — продолжительность работы вентиляционного оборудования в течение суток, принимаемая равной 14 ч; $N_{раб}$ — число рабочих дней в году, определяемое по режиму работы объекта, в данном случае 360 сут.; $N_{уст}$ — установочная мощность оборудования (электродвигателей насосов, вентиляторов), кВт; $C_{эл}$ — стоимость электроэнергии, учитываемая в размере 2,47 руб/кВт·ч.



Годовые амортизационные отчисления на оборудование климатических систем [руб/год] определяются как:

$$\mathcal{E}_{\text{ам}} = \frac{1,5K}{T_{\text{ам}}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{ам}}$ — расчётный срок эксплуатации оборудования, принимаемый для систем вентиляции и кондиционирования на уровне 15 лет. Коэффициент 1,5 включает отчисления на полное восстановление оборудования, на его капитальный и текущий ремонт.

Суммарные годовые эксплуатационные затраты [руб/год] найдём по следующему выражению:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{эл}} + \mathcal{E}_{\text{ам}}. \quad (3)$$

Результаты расчётов по определению значений $\mathcal{E}_{\text{эл}}$, $\mathcal{E}_{\text{ам}}$ и суммарных эксплуатационных затрат $\mathcal{E}$ для наглядности представлены в табл. 2 и 3.

В условиях рыночной экономики общую оценку экономической эффективности принимаемых решений по энергосбережению наиболее целесообразно вести по величине совокупных дисконтированных затрат $СДЗ$, связанных с дополнительными капиталовложениями и уровнем годовых эксплуатационных издержек с учётом изменения цен и тарифов на энергоносители [3], тогда $СДЗ$ [руб.] можно определить по формуле:

$$СДЗ = K \left(1 + \frac{p}{100} \right)^T + \mathcal{E} \left[\left(1 + \frac{p}{100} \right)^T - 1 \right] \frac{100}{p}. \quad (4)$$

где T — расчётный срок, годы; p — норма дисконта, принятая в расчётах на уровне

6% годовых (при текущей ключевой ставке ЦБ РФ в 4,25%).

Результаты вычисления величины совокупных дисконтированных затрат $СДЗ$ для двух вариантов устройства системы кондиционирования воздуха представлены в табл. 4 и 5, соответственно, и для наглядности дополнительно в виде графиков на рис. 1 и 2.

Нетрудно видеть, что кривые на данных рисунках не пересекаются, что подтверждает сделанное ранее предположение об абсолютной окупаемости предлагаемой авторами конструкции.

Если же её сравнивать с другими способами обработки притока, можно отметить, что в рассматриваемой схеме расход притока будет выше, чем при использовании искусственного охлаждения в тёплый период, из-за более низкой располагаемой разности температур подаваемого в помещение и уходящего воздуха.

... Эксплуатационные затраты на СКВ фирмы ООО «ВЕЗА»

табл. 2

$Z_p, \text{ч}$	$N_{\text{раб}}, \text{сут.}$	$N_{\text{уст}}, \text{кВт}$	$C_{\text{эл}}, \text{руб/кВт-ч}$	$\mathcal{E}_{\text{эл}}, \text{руб/год}$	$T_{\text{ам}}, \text{лет}$	$K, \text{руб.}$	$\mathcal{E}_{\text{ам}}, \text{руб/год}$	$\mathcal{E}, \text{руб/год}$
Вариант 2 (ПВУ с двумя увлажнителями по схеме [9, 10])								
14	360	10,56	2,47	131 459,3	15	1 349 593	134 959	266 418,7
Вариант 1 (ПВУ с одним увлажнителем и дополнительными секциями с ручным управлением по схеме [8])								
14	360	10,28	2,47	127 973,7	15	1 156 790	115 679	243 652,6

... Эксплуатационные затраты на СКВ фирмы ООО «Европейская Климатехника»

табл. 3

$Z_p, \text{ч}$	$N_{\text{раб}}, \text{сут.}$	$N_{\text{уст}}, \text{кВт}$	$C_{\text{эл}}, \text{руб/кВт-ч}$	$\mathcal{E}_{\text{эл}}, \text{руб/год}$	$T_{\text{ам}}, \text{лет}$	$K, \text{руб.}$	$\mathcal{E}_{\text{ам}}, \text{руб/год}$	$\mathcal{E}, \text{руб/год}$
Вариант 2 (ПВУ с двумя увлажнителями по схеме [9, 10])								
14	360	11,1	2,47	138 181,7	15	1 452 336	145 234	283 415
Вариант 1 (ПВУ с одним увлажнителем и дополнительными секциями с ручным управлением по схеме [8])								
14	360	10,71	2,47	133 326,6	15	1 385 070	138 507	271 834

... Значения $СДЗ$ в зависимости от T для установок ООО «ВЕЗА»

табл. 4

$T, \text{лет}$	$СДЗ_1, \text{руб.}$	$СДЗ_2, \text{руб.}$	$T, \text{лет}$	$СДЗ_1, \text{руб.}$	$СДЗ_2, \text{руб.}$
1	1 696 988	1 469 850	9	5 341 611	4 754 261
2	2 065 226	1 801 693	10	5 928 526	5 283 169
3	2 455 558	2 153 448	11	6 550 656	5 843 812
4	2 869 310	2 526 307	12	7 210 114	6 438 094
5	3 307 887	2 921 538	13	7 909 140	7 068 032
6	3 772 779	3 340 483	14	8 650 107	7 735 766
7	4 265 565	3 784 565	15	9 435 532,013	8 443 565
8	4 787 917	4 255 291			

... Результаты $СДЗ$ в зависимости от T для установок ООО «Европейская Климатехника»

табл. 5

$T, \text{лет}$	$СДЗ_1, \text{руб.}$	$СДЗ_2, \text{руб.}$	$T, \text{лет}$	$СДЗ_1, \text{руб.}$	$СДЗ_2, \text{руб.}$
1	1 822 891	1 740 008	9	5 710 505	5 463 773
2	2 215 680	2 116 242	10	6 336 551	6 063 433
3	2 632 036	2 515 050	11	7 000 159	6 699 072
4	3 073 373	2 937 787	12	7 703 584	7 372 850
5	3 541 191	3 385 887	13	8 449 214	8 087 055
6	4 037 078	3 860 874	14	9 239 582	8 844 112
7	4 562 718	4 364 360	15	10 077 372	9 646 592
8	5 119 896	4 898 056			

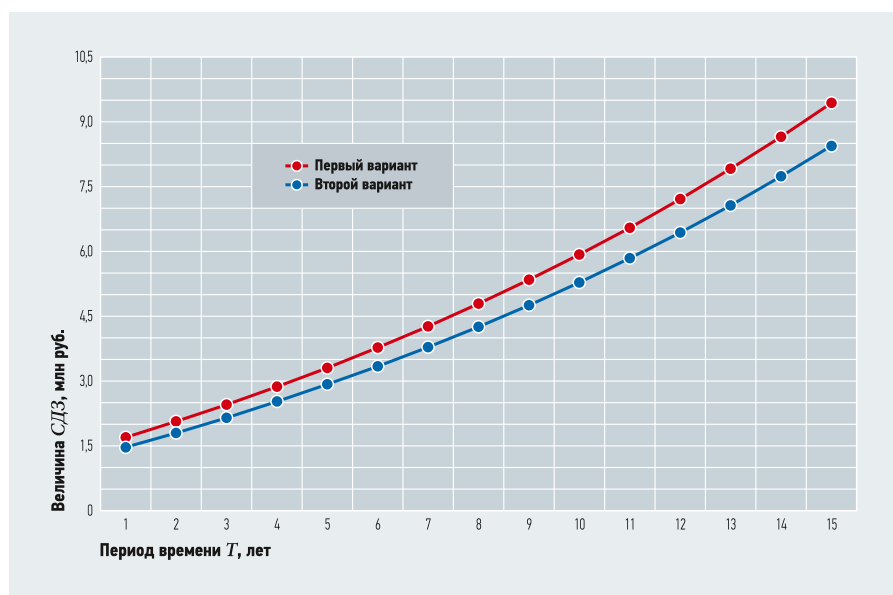


Рис. 1. График зависимости СДЗ от T (для установок ООО «ВЕЗА»)

Поэтому, при наличии значительных тепловыделений в помещении в холодный период, превышающих расчётные теплотери и, следовательно, остающихся даже при отключении отопительных приборов автоматическими терморегуляторами, значительно увеличивается вероятность того, что ассимиляцию этих теплоизбытков можно произвести только с помощью снижения температуры притока, без использования так называемого «свободного охлаждения». Тогда исключаются дополнительные капитальные затраты на устройство такого охлаждения и вообще на оборудование местных охладителей типа фанкойлов, доводчиков и сплит-систем, которые в предлагаемой схеме оказываются излишними как в тёплый, так и в холодный периоды года.

Это в значительной степени или даже полностью компенсирует повышение единовременных расходов на саму вентиляционную установку, воздуховоды и эксплуатационные издержки на привод вентиляторов, не говоря уже об отсут-

Разработанная авторами схема обработки приточного воздуха является экономически эффективной и пригодной для использования в практике проектирования и монтажа климатических систем большинства общественных зданий на преобладающей части территории Российской Федерации

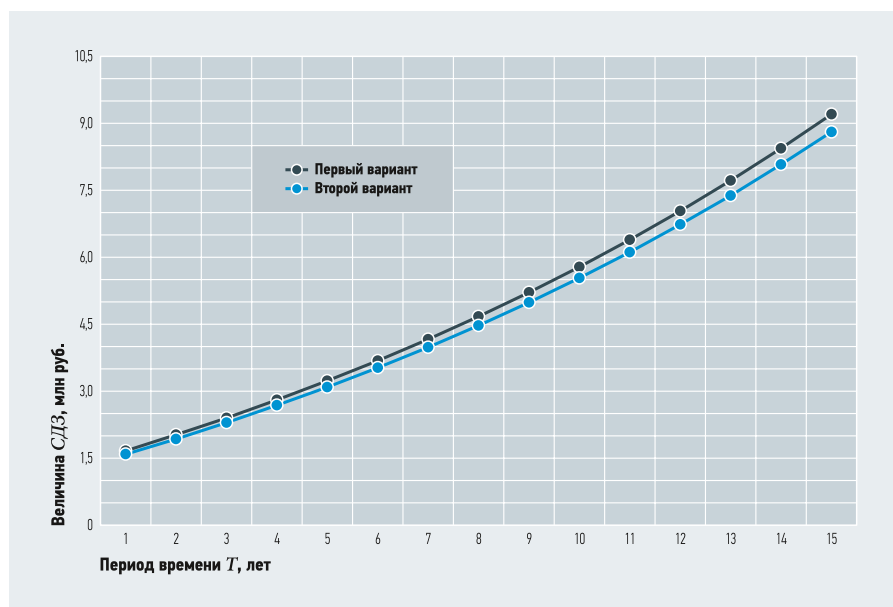


Рис. 2. График зависимости СДЗ от T (для установок ООО «Европейская Климатехника»)

ствии такой существенной составляющей стоимости, как затраты на холодильную машину и привод её компрессора.

Кроме того, снижение температуры притока в холодный период позволяет частично компенсировать и повышение затрат на подогрев притока из-за роста воздухообмена, особенно с учётом наличия утилизации теплоты в пластинчатом рекуператоре.

Более того, повышенный расход приточного воздуха обеспечивает лучшие санитарно-гигиенические условия с точки зрения концентрации вредных примесей в помещении и, следовательно, самочувствия находящихся в нём людей, а также частично в отношении организации воздухообмена, поскольку будет проще добиться допустимой температуры в точках входа приточных струй в рабочую зону.

Таким образом, разработанная авторами схема обработки притока является экономически эффективной и пригодной для использования в практике проектирования и монтажа климатических систем большинства общественных зданий на преобладающей части территории Российской Федерации. ●

1. Мурашко В.П. Системы кондиционирования воздуха. Теория и практика. — М.: Евроклимат, 2017. 627 с.
2. Мотрев А.А. Технические решения систем кондиционирования и отопления / Альманах научных работ молодых учёных: XLV научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО. Т. 3. Февраль 2016. — СПб.: Университет ИТМО, 2016. С. 295–298.
3. Самарин О.Д. Вопросы экономики в обеспечении микроклимата зданий. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Изд-во АСВ, 2015. 136 с.
4. De Angelis A., Saro O., Truant M. Evaporative cooling systems to improve internal comfort in industrial buildings. Proc. of the 72nd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association. September 6–8, 2017. Lecce, Italy. Pp. 313–320.
5. Meggers F., Guo H., Teitelbaum E. et al. The Thermoheiodome — “Air conditioning” without conditioning the air, using radiant cooling and indirect evaporation. Energy and Buildings. 2017. No. 157. Pp. 11–19.
6. 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.
7. De Rosa M., Bianco V., Scarpa F., Tagliafico L.A. Modeling of energy consumption in buildings: an assessment of static and dynamic models. Russian Journal of Construction Science and Technology. 2016. Vol. 2. No. 1. Pp. 12–24.
8. Самарин О.Д., Лушин К.И., Кирушок Д.А. Энергосберегающая схема обработки воздуха с косвенным испарительным охлаждением в пластинчатых рекуператорах // Жилищное строительство, 2018. №1–2. С. 43–45.
9. Королёва Н.А., Фокин В.М., Тарабанов М.Г. Разработка рекомендаций по устройству энергоэффективных схем систем вентиляции и кондиционирования // Вестник ВолГАСУ. Серия: Строительство и архитектура, 2015. Вып. 41. С. 53–62.
10. Королёва Н.А., Фокин В.М. Применение систем кондиционирования воздуха с испарительным охлаждением в современных зданиях // Вестник ВолГАСУ. Серия: Строительство и архитектура, 2015. Вып. 39. С. 173–182.

References — see page 79.

Feasibility study of the application of a special flow treatment scheme with indirect evaporative cooling. Pp. 66–70.

Oleg D. Samarin, PhD, Associate Professor; **Dmitry A. Kirushok**, lecturer, post-graduate student, the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

1. V.P. Murashko. *Sistemy kondicionirovaniya vozduha. Teorija i praktika* [Air conditioning systems. Theory and practice]. Moscow. Yevroklimat ["Euroclimat", LLC]. 2017. 627 p. [In Russian]
2. A.A. Motrev. *Tekhnicheskie reshenija sistem kondicionirovaniya i otoplenija* [Technical solutions for air conditioning and heating systems]. Al'manah nauchnyh rabot molodyh uchenykh: XLV nauchnaja i uchebno-metodicheskaja konferencija Universiteta ITMO [Almanac of scientific works of young scientists: XLV scientific and educational-methodical conference of the St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University)]. Vol. 3. February 2016. St. Petersburg. *Universitet ITMO* [ITMO University]. 2016. Pp. 295–298. [In Russian]
3. O.D. Samarin. *Voprosy jekonomiki v obespechenii mikroklimata zdaniy* [Economic issues in ensuring the microclimate of buildings]. 2th edition, rev. and exp. Moscow. *Izd-vo ASV* [Publishing House of the Association of Construction Universities ("ASV" Publishers)]. 2015. 136 p. [In Russian]
4. A. De Angelis, O. Saro, M. Truant. Evaporative cooling systems to improve internal comfort in industrial buildings. Proc. of the 72nd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association. September 6–8, 2017. Lecce, Italy. Pp. 313–320.
5. F. Meggers, H. Guo, E. Teitelbaum et al. The Thermoheliodome — "Air conditioning" without conditioning the air, using radiant cooling and indirect evaporation. *Energy and Buildings*. 2017. No. 157. Pp. 11–19.
6. S. Paiho, R. Abdurafikov, H. Hoang. Cost analyses of energy-efficient renovations of a Moscow residential district. *Sustainable Cities and Society*. 2015. Vol. 14. No. 1. Pp. 5–15.
7. M. De Rosa, V. Bianco, F. Scarpa, L.A. Tagliafico. Modelling of energy consumption in buildings: an assessment of static and dynamic models. *Russian Journal of Construction Science and Technology*. 2016. Vol. 2. No. 1. Pp. 12–24.
8. O.D. Samarin, K.I. Lushin, D.A. Kirushok. *Jenergoberegajushhaja shema obrabotki vozduha s kosvennym isparitel'nyim ohlazhdeniem v plastinchatyh rekuperatorah* [Energy-saving air treatment scheme with indirect evaporative cooling in plate recuperators]. *Zhilishhnoe stroitel'stvo* ["Housing construction" Magazine]. 2018. No. 1–2. Pp. 43–45. [In Russian]
9. N.A. Koroleva, V.M. Fokin, M.G. Tarabanov. *Razrabotka rekomendacij po ustrojstvu jenergojeffektivnyh shem sistem ventiljacii i kondicionirovaniya* [Development of recommendations for the design of energy efficient ventilation and air conditioning systems]. *Vestnik VolGASU. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and architecture]. 2015. Issue 41. Pp. 53–62. [In Russian]
10. N.A. Koroleva, V.M. Fokin. *Primenenie sistem kondicionirovaniya vozduha s isparitel'nyim ohlazhdeniem v sovremennyh zdaniyah* [Application of air conditioning systems with evaporative cooling in modern buildings]. *Vestnik VolGASU. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and architecture]. 2015. Issue 39. Pp. 173–182. [In Russian]