

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 697.9

DOI: 10.22227/2305-5502.2022.1.8

Экономическое обоснование выбора системы кондиционирования воздуха для административно-торгового центра

Анастасия Анатольевна Фролова^{1,2}, Павел Игоревич Лухменев¹

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;*

² *Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова (МГОТУ); г. Королев, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Основной экономически затратной инженерной системой в административно-торговом центре является система кондиционирования воздуха. Здания такого типа имеют внутренние тепlopоступления в течение всего года. Эти тепlopоступления значительны из-за наличия большого количества людей, высокого уровня искусственного освещения, наличия различного оборудования и поступления теплоты за счет солнечной радиации. Представляет интерес система кондиционирования воздуха, называемая свободным охлаждением. Она не новая, энергетическая оценка такой системы ранее показала хорошие результаты. Рассматривается эта же система, но оценка проводится с экономической точки зрения для цен 2021 г. в г. Москве.

Материалы и методы. Задача решается расчетным путем на примере 35-этажного административно-офисного здания в г. Москве. Изучаются различные варианты температуры наружного воздуха для перехода на свободное охлаждение. Сравниваются разные варианты установки сухих охладителей, что влияет на длину трассировки холодильных контуров. Для всех рассматриваемых вариантов выполняется расчет экономических затрат.

Результаты. Некоторые результаты представлены в виде рисунков экономических затрат вариантов системы охлаждения воздуха.

Выводы. Установлено, что расположение сухих охладителей сильно влияет на стоимость насосных установок. При сравнении вариантов 1 а, 1 б, 1 в с установкой сухих охладителей на кровле здания выявлено, что экономически выгоден вариант 1 в при дисконте 10 %. При сравнении вариантов 2 а, 2 б, 2 в, в случае, когда сухие охладители установлены возле здания, получено, что вариант 2 в с температурой перехода от свободного к машинному охлаждению $t_n = 8$ °С экономически более выгоден, чем переход при $t_n = 5$ °С варианта 2 б и при $t_n = 0$ °С варианта 2 а.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: свободное охлаждение, кондиционирование воздуха, машинное охлаждение, экономическая оценка, совокупные дисконтированные затраты, капитальные затраты, эксплуатационные затраты, окупаемость, энергосберегающее мероприятие, энергоэффективность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Фролова А.А., Лухменев П.И. Экономическое обоснование выбора системы кондиционирования воздуха для административно-торгового центра // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. Вып. 1. Ст. 8. URL: <http://inso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.1.8

Автор, ответственный за переписку: Анастасия Анатольевна Фролова, FrolovaAA@mgsu.ru.

The economic feasibility of the choice of an air conditioning system for a shopping and office centre

Anastasiya A. Frolova^{1,2}, Pavel I. Lukhmenev¹

¹ *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)
(MGSU); Moscow, Russian Federation;*

² *Leonov Moscow Region University of Technology; Korolev, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. An air conditioning system is the costliest engineering system in shopping and office centres. Buildings of this type have internal heat gains throughout the year. These heat gains are substantial because of the large number of people, the high level of artificial lighting, the availability of various items of equipment, and the heat gain from solar radiation. An air conditioning system known as ventilation cooling is of interest. It is not new; its energy assessment is quite high. The same system is under consideration, but it is evaluated from the economic perspective in the Moscow prices of 2021.

Materials and methods. The problem is solved by applying a computational method to the case of a 35-storey office building in Moscow. Different values of the outdoor air temperature are studied to implement transition to ventilation cooling. Alternative options for the installation of dry coolers are compared, since they affect the length of routing of cooling circuits.

Costs are calculated for all options under consideration.

Results. Some results are presented as figures showing the costs of alternative air cooling systems.

Conclusions. It is found that the location of dry coolers greatly affects the cost of pumping units. When comparing options 1 a, 1 b, and 1 c with the option that implies the installation of dry coolers on the building roof, the authors found that option 1 c is economically profitable at the 10 % discount. If options 2 a, 2 b, 2 c, are compared for the case when dry coolers are installed beside the building, option 2 c, that implies the transition from ventilation cooling to machine cooling at $t_n = 8 \text{ }^\circ\text{C}$, is more economically profitable than option 2 b, when the transition occurs at $t_n = 5 \text{ }^\circ\text{C}$, and option 2 a when the transition is triggered at $t_n = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

KEYWORDS: ventilation cooling, air conditioning, machine cooling, economic evaluation, total discounted costs, capital costs, operating costs, payback, energy saving measure, energy efficiency

FOR CITATION: Frolova A.A., Lukhmenev P.I. The economic feasibility of the choice of an air conditioning system for a shopping and office centre. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2022; 12(1):8. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.1.8

Corresponding author: Anastasia A. Frolova, FrolovaAA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время глобальной проблемой в мире является истощение энергоресурсов. Сейчас не имеется ни одного безграничного источника энергии, который бы обеспечивал сегодняшние потребности людей, а также будущих поколений. Некоторые ресурсы в дефиците, отсюда постоянный рост цен на энергоносители. В таких реалиях эффективное и рациональное потребление ресурсной базы и при этом осуществление энергосберегающих мероприятий стали мировой тенденцией. Важный вопрос — поиск и развитие путей энергосбережения. В итоге имеется большой потенциал разработки и применения ресурсосберегающих технологических процессов для возможности снизить энергопотребление в целом.

На строительство и эксплуатацию зданий сегодня приходится свыше трети мирового потребления электроэнергии. Спрос на электроэнергию в строительстве не перестанет расти в ближайшем времени. С целью улучшения экологической ситуации в мире необходимо в разы уменьшить потребление электроэнергии во всех сферах деятельности человека, включая строительство. Совершенствование методик расчета и повышение энергетической эффективности инженерных систем при выборе более выгодных экономических вариантов системы определяет актуальность данной темы.

Основной экономически затратной инженерной системой в административно-торговом центре служит система кондиционирования воздуха. Здания такого типа имеют внутренние теплопоступления в течение всего года. И эти теплопоступления, существенные из-за наличия большого количества людей, высокого уровня искусственного освещения, наличия различного оборудования и поступления теплоты за счет солнечной радиации. Для борьбы с этими теплопоступлениями традиционно применяется машинный холод, что с экономической точки зрения достаточно затратно. Заслуживает внимания система кондиционирования воздуха, называемая свободным охлаждением. Она — не новая, энергетическая оценка такой системы ранее [1] показала хорошие результаты. В настоящей работе исследуется

эта же система, но оценка выполнялась с экономической точки зрения для цен 2021 г. в г. Москве.

Система кондиционирования воздуха на основе свободного охлаждения часто и эффективно используется в зданиях со значительными теплопоступлениями [2] для экономии затрачиваемой электроэнергии. Принято считать, что энергозатраты на свободное охлаждение равны нулю [3–10]. Однако это не так, и сведения, приведенные в работах [11–20], это доказывают. Полная экономическая оценка системы свободного охлаждения проводилась давно [11–14] и представляет интерес осуществить экономическую оценку системы по ценам 2021 г. для московского региона страны.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель данного исследования — провести экономическую оценку системы кондиционирования воздуха, в состав которой входит контур свободного охлаждения, и выбрать наиболее выгодный вариант перехода от свободного охлаждения к машинному при разных температурах наружного воздуха. Рассматриваются цены 2021 г. для московского региона страны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В проекте реализована система холодоснабжения, что и в работе [1], с двумя внутренними контурами холодоснабжения и одним наружным контуром охлаждения с интегрированной системой зимнего холода (свободное охлаждение), возможностью последовательного охлаждения холодоносителя в теплообменниках свободного охлаждения и испарителях холодильных машин (ХМ). Подробное описание системы в этой статье не приводится, поскольку оно полностью соответствует описанию в труде [1].

Принятая схема холодоснабжения позволяет применять режим полного свободного охлаждения в целях снижения затрат электроэнергии в зимний период года.

Компоненты контура холодоснабжения: холодильные машины (ХМ-1–ХМ-2), охладители венту-

станок. Холодоноситель контура холодоснабжения — вода с параметрами для варианта 1: 6/14 °С, для вариантов 2 и 3: 14/19 °С. Компоненты контура охлаждения: сухие охладители (СО-1–СО-3), холодильные машины (ХМ-1–ХМ-2). Теплоноситель контура охлаждения: водный раствор этиленгликоля 40 % с параметрами для летнего режима 40/47 °С, для зимнего режима для варианта 1: 4/12 °С, для вариантов 2 и 3: 12/17 °С. Внутренний контур холодоснабжения потребителей разделен на две части — контур холодильных машин (первичный контур) и контур потребителей (вторичный контур). Контуры холодоснабжения разделены линией гидравлического разделителя с баком-аккумулятором. Циркуляция воды в первичном контуре холодоснабжения осуществляется насосной группой. Расход воды в первичном контуре холодоснабжения — переменный. Предусмотренные в проекте ХМ допускают изменение расхода на испарителе со скоростью не более 8 %/мин. Минимально допустимый расход составляет 10 л/с, максимально допустимый — 20 л/с. Циркуляция воды во вторичном контуре производится насосной группой. Расход воды во вторичном контуре определяется показанием датчика дифференциального давления, которое меняется в зависимости от положения регулирующих клапанов потребителей. Все потребители оснащены двухходовыми регулирующими клапанами. Циркуляция раствора этиленгликоля в контуре охлаждения выполняется насосами. Расход воды в контуре охлаждения изменяется ступенчато.

Режимы работы системы холодоснабжения:

1. Летний режим: работают ХМ-1–ХМ-2. Проток холодоносителя через теплообменные аппараты (ТО-1, ТО-2) свободного охлаждения перекрыт. Проток теплоносителя контура охлаждения через теплообменные аппараты свободного охлаждения перекрыт.
2. Зимний режим: работают сухие охладители и теплообменные аппараты свободного охлаждения. Проток холодоносителя и теплоносителя через ХМ-1 – ХМ-2 перекрыт.

Здания разделяются на три типа, зависящие от величины теплопоступлений на 1 м² площади офиса, а также от длительности рабочей недели. К первому типу относятся здания с тепловыделениями 40–60 Вт/м² и длительностью работы 40–60 ч в неделю. Ко второму типу — здания с тепловыделениями 60–80 Вт/м², длительностью работы — 50–60 ч в неделю. Третьим типом являются здания, имеющие тепловыделения 80–100 Вт/м² и длительность работы 50–60 ч в неделю.

Даже при достаточно низких температурах наружного воздуха помещения административно-торговых зданий нуждаются в охлаждении при довольно больших тепловыделениях, в таких помещениях круглый год поддерживают температуру внутреннего воздуха 18–24 °С. В зависимости от теплопоступлений изнутри, а также от графика рабочего времени

такого типа помещений в течение суток определяется нагрузка систем отопления и охлаждения.

В работе предполагается максимальное использование внутренних тепловыделений и холода наружного воздуха, чтобы обслуживать внутренние зоны зданий в зимний период. Ведь зимой также можно наблюдать тепловыделения, превышающие трансмиссионные теплопотери, во время рабочих часов в помещениях.

Первоначально были установлены теплоизбытки в охлаждаемых помещениях:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6,$$

где Q_1 — теплопоступления от искусственного освещения; Q_2 — от солнечной радиации; Q_3 — от находящихся в помещении людей; Q_4 — от компьютеров; Q_5 — от офисного оборудования и прочей бытовой техники; Q_6 — от горячих блюд.

С целью экономической оценки наиболее выгодного варианта системы охлаждения воздуха использовались сравнения рассчитанных совокупных дисконтированных затрат (СДЗ), руб.:

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

где K — капитальные затраты, руб., для соответствующего варианта; p — норма дисконта, %, равная среднерыночной банковской ставке по кредитам; T — годы; Э — годовые эксплуатационные затраты по вариантам.

Эксплуатационные затраты на охлаждение здания рассчитываются по стоимости электроэнергии. Рассмотрены четыре варианта стоимости электроэнергии для потребителей с максимальной мощностью энергопринимающих устройств от 670 до 1000 кВт ОАО «Мосэнергосбыт», апрель 2021 г.: от 3,933 до 6,16 руб./кВт·ч в зависимости от типа тарифа.

Для вариантов машинного и свободного охлаждения здания единовременные капитальные затраты K , руб., складываются из стоимости условий присоединения системы охлаждения к электросети Москвы ($K_{\text{пр}}$) и стоимости оборудования на охлаждение помещений ($K_{\text{ог}}$), руб.

Важно отметить, что в стоимости оборудования для свободного охлаждения в отличие от стоимости холода учитывался только теплообменник, так как остальное оборудование необходимо и для машинного охлаждения.

Норма дисконта равна среднерыночной банковской ставке по кредитам и принята 10 %.

На рис. 1 представлена диаграмма капитальных затрат на оборудование различных вариантов систем.

Экономический анализ затрат на поддержание микроклимата в административно-торговом здании выполнялся на основе сравнения величины СДЗ для каждого варианта за 15 лет. На рис. 2, 3 приведены графики данных расчетов СДЗ.

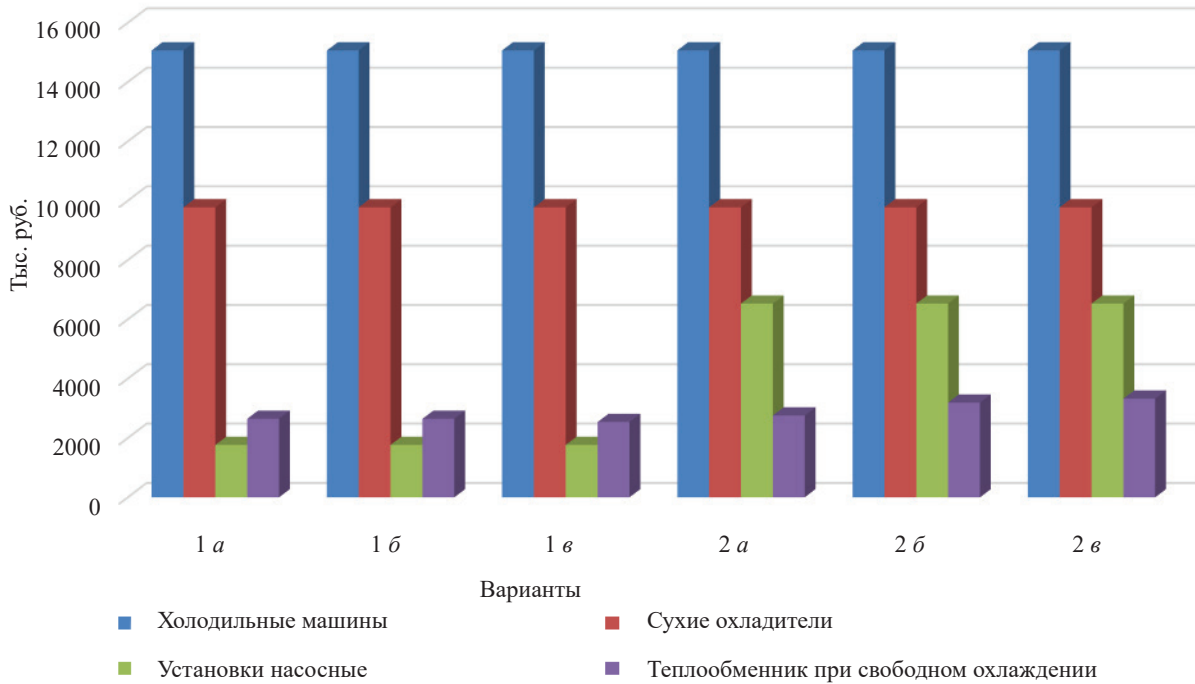


Рис. 1. Диаграмма капитальных затрат на оборудование различных вариантов систем

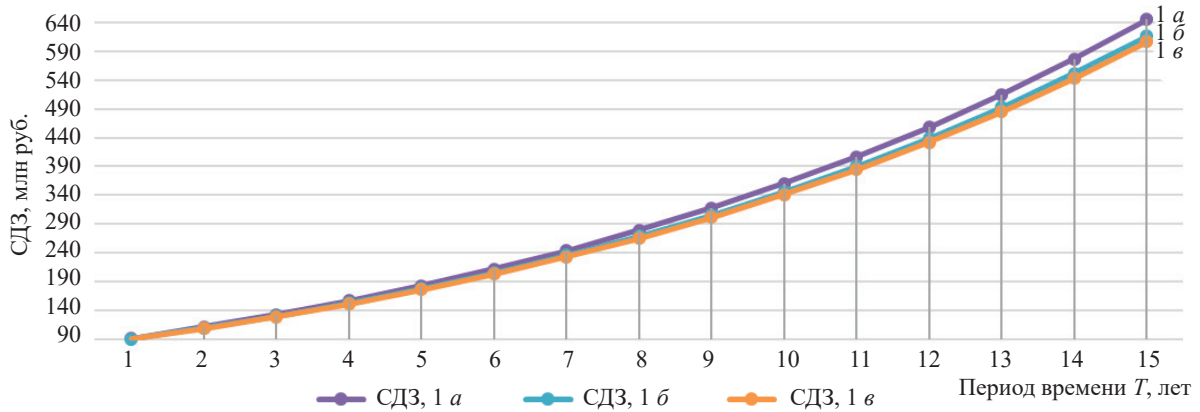


Рис. 2. Изменение СДЗ в течение 15 лет при работе в режиме свободного и машинного охлаждения (для вариантов 1 а, 1 б, 1 в) с дисконтом 10 %

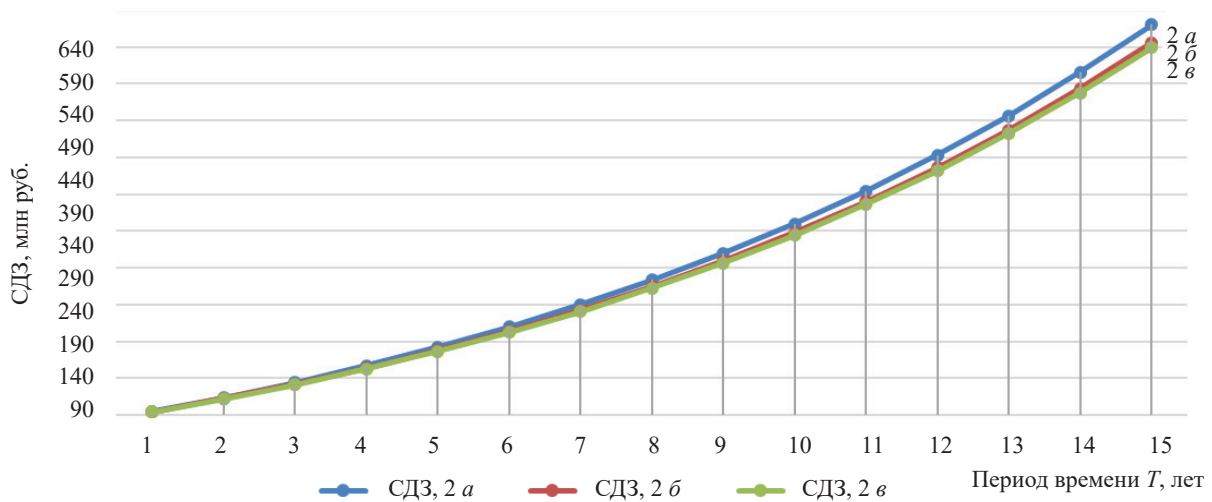


Рис. 3. Изменение СДЗ в течение 15 лет при работе в режиме свободного и машинного охлаждения (для вариантов 2 а, 2 б, 2 в) с дисконтом 10 %

Как можно видеть на диаграммах, значения величины СДЗ при первоначальных затратах, где учитываются только капитальные затраты, практически одинаковы для всех вариантов. Выгодность энергосберегающего мероприятия наблюдается только при добавлении эксплуатационных затрат по годам, причем, чем больше расчетный период, тем более выгоден становится соответствующий вариант.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проделанной работы позволяют сделать следующие выводы:

- установлено, что расположение сухих охладителей сильно влияет на стоимость насосных установок;
- при сравнении вариантов 1 а, 1 б, 1 в с установкой сухих охладителей на кровле здания выявлено, что экономически выгоден вариант 1 в при дисконте 10 %;
- при сравнении вариантов 2 а, 2 б, 2 в, в случае, когда сухие охладители установлены возле здания, получено, что вариант 2 в с температурой перехода от свободного к машинному охлаждению $t_{\text{н}} = 8^{\circ}\text{C}$ экономически более выгоден, чем переход при $t_{\text{н}} = 5^{\circ}\text{C}$ варианта 2 б и при $t_{\text{н}} = 0^{\circ}\text{C}$ варианта 2 а.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фролова А.А., Лухменев П.И. Энергетическое обоснование выбора системы кондиционирования воздуха для административно-торгового центра // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. № 2. С. 38–45. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.3
2. Frolova A. Determination of the amount of internal heat input in the office space // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. P. 012061. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012061
3. Hani A., Koiv T.A. Energy consumption monitoring analysis for residential, educational and public buildings // Smart Grid and Renewable Energy. 2012. Vol. 3. Pp. 231–238. DOI: 10.4236/sgre.2012.33032
4. Цыганов А.И. Обоснование возможности строительства пассивных многоэтажных жилых зданий в климатических условиях Центральной России // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. № 3. С. 58–78. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.3.4
5. Daraghmeh H., Wang C.C. A review of current status of free cooling in datacenters // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 114. Pp. 1224–1239. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.093
6. Yang Y., Wang B., Zhou Q. Energy saving analysis of free cooling system in the data center // Procedia Engineering. 2017. Vol. 205. Pp. 1815–1819. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.239
7. Ma Y., Ma G., Zhang S., Zhou F. Cooling performance of a pump-driven two phase cooling system for free cooling in data centers // Applied Thermal Engineering. 2015. Vol. 95. Pp. 143–149. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.11.002
8. Суханкин В.П., Финкельштейн Б.И. Как увеличить энергоэффективность климат-контроля телекоммуникационных объектов // Главный энергетик. 2017. № 5–6. С. 83–87.
9. Panchabikesan K., Velraj R. Passive cooling potential in buildings under various climatic conditions in India // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 78С. Pp. 1236–1252. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.030
10. Бройда В.А., Дорофеенко Н.С. Эффективность прямого естественного охлаждения в системе кондиционирования воздуха для помещений со значительными поступлениями тепла // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 4 (50). С. 279–287.
11. Малявина Е.Г., Фролова А.А. Выбор энергетически целесообразной теплозащиты офисных зданий с круглогодичным поддержанием теплового микроклимата // Жилищное строительство. 2019. № 1–2. С. 63–68. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-1-2-63-68
12. Малявина Е.Г., Фролова А.А. Энергетическая и экономическая оценка теплозащиты офисного здания // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 8. С. 64–69. DOI: 10.12737/article_5968b4502ace93.00925434
13. Малявина Е.Г., Фролова А.А., Силаев А.С. Энергетическая и экономическая оценка систем свободного и машинного охлаждения для кондиционируемых помещений офисов // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, тепло-снабжение и строительная теплофизика. 2014. № 1. С. 42–46.
14. Малявина Е.Г., Фролова А.А., Силаев А.С. Энергетическая и экономическая оценка систем свободного и машинного охлаждения для кондиционируемых помещений офисов // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, тепло-снабжение и строительная теплофизика. 2014. № 2. С. 68–72.
15. Цой А.П., Бараненко А.В., Грановский А.С., Цой Д.А., Корецкий Д.А., Джамашева Р.А. Компьютерное моделирование годового цикла работы комбинированной системы хладоснабжения с использованием ночного радиационного охлаждения // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное

и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4. № 3. С. 28–37. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-3-28-37

16. *Гаряев А.Б., Коротке Ю.В.* Оценка масштабов и перспектив использования холода окружающей среды для экономии энергии // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 58–70. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-58-70

17. *Paiho S., Abdurafikov R., Hoang H.* Cost analyses of energy-efficient renovations of a Moscow residential district // Sustainable Cities and Society. 2014. Vol. 14. Issue 1. Pp. 5–15. DOI: 10.1016/j.scs.2014.07.001

18. *Ермолов Д.А.* Использование естественного холода в качестве нетрадиционного источника холодообеспечения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 12–1. С. 223–225.

19. *Серегин А.И.* Энергоэффективные решения для торговых центров // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2019. № 1. С. 30–37.

20. *Евушкин А.И., Шереметьев С.С.* Энергоэффективные решения кондиционирования серверных помещений // Наука, техника и образование. 2017. № 3 (33). С. 61–63.

Поступила в редакцию 27 января 2022 г.

Принята в доработанном виде 28 февраля 2022 г.

Одобрена для публикации 28 февраля 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: **Анастасия Анатольевна Фролова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; преподаватель кафедры техники и технологии; **Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова (МГОТУ);** 141074, Московская обл., г. Королев, ул. Гагарина, д. 42; FrolovaAA@mgsu.ru;

Павел Игоревич Лухменев — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; luhmenev@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Nowadays depletion of energy resources is a global problem. Neither inexhaustive source of energy can meet current or future human needs. Some resources are in short supply due to the ongoing rise in energy prices. Against this background, the efficient and rational consumption of resources and energy-saving actions have become a global trend. An important challenge is to find and develop ways of energy saving. As a result, there is a great potential for the development and application of resource-saving technologies focused on reducing energy consumption.

Presently, construction and operation of buildings are responsible for over one third of global energy consumption. The demand for electricity in the construction industry will keep growing in the near future. It is necessary to reduce electricity consumption in all spheres of human activities, including construction, to improve the ecological situation in the world. More sophisticated calculation methods and higher energy efficiency of engineering systems pre-determine the relevance of this issue.

An air conditioning system is the most expensive engineering system in an office and retail building. Buildings of this type have internal heat gains all over the year. And these heat gains are significant due to the presence of a large number of people, artificial lighting, the availability of various types of equipment, and solar radiation. Machine cooling is traditionally used to prevent these heat gains, and this process is quite costly from the economic standpoint. A free air conditioning and cooling system deserves particular attention. It is not a new one, and the energy assessment of such a system has proven its efficient performance [1]. In this article the same system is studied, although the assessment is made from the standpoint of the prices that were typical for Moscow in 2021.

An air conditioning system that takes advantage of the ventilation cooling principle, is often effectively used in buildings having high heat gains [2]. The purpose of the system is to save energy. It is commonly assumed that the cost of ventilation cooling is equal to zero [3–10]. However, it is not true, and the information provided in works [11–20] serves as a proof. The comprehensive economic assessment of a ventilation cooling system was made long ago

[11–14], and it's necessary to make a reappraisal of the system for the Moscow region in the prices of 2021.

MATERIALS AND METHODS

The purpose of this study is to conduct an economic assessment of an air conditioning system, having a free-cooling circuit, and choose the most profitable pattern of transition from ventilation cooling to machine cooling at different outdoor air temperatures. The 2021 prices typical for the Moscow region are used for this purpose.

RESEARCH RESULTS

The project has a refrigeration system similar to the one mentioned in [1]. It has two internal refrigeration circuits and one external refrigeration circuit with an integrated winter refrigeration system (ventilation cooling). It can consecutively refrigerate the coolant in ventilation cooling heat exchangers and evaporators of refrigerating machines (RM). The detailed description of the system is not provided in this article, because it is available in a different work [1].

The current refrigeration supply pattern allows applying a complete free-cooling mode to reduce energy costs in the winter period.

Components of the cooling circuit include refrigeration machines (RM-1–RM-2) and coolers of ventilation units. Water, used as the coolant for the cooling circuit has the following parameters: 6/14 °C for Option 1, and 14/19 °C for Options 2 and 3. Cooling circuit components include dry coolers (DC-1 to DC-3), and refrigerating machines (RM-1 to RM-2). The coolant of the cooling circuit is the 40 % solution of aqueous ethylene glycol having the following summer mode parameters: 40/47 °C, and winter mode parameters: 4/12 °C for Option 1; it has the following parameters for Options 2 and 3: 12/17 °C. The internal circuit of refrigeration supply to consumers is divided into two parts: the circuit of refrigerating machines (the primary circuit) and the circuit of consumers (the secondary circuit). Refrigeration supply circuits are separated by a hydraulic separator line with a storage tank. Water circulation is performed by a pumping group in the primary refrigeration circuit. The water flow rate in the primary refrigeration supply circuit is variable. Design refrigeration machines allow the evaporator flow rate to vary within 8 %/min. The minimum acceptable flow rate is 10 l/s; the maximum rate is 20 l/s. Water is pumped through the secondary circuit by the pump group. Its water flow rate is determined by the readings of the differential pressure sensor, which vary depending on the position of the two-way control valves. The ethylene glycol solution is pumped

through the cooling circuit. The water flow rate varies stepwise in the refrigeration circuit.

The refrigeration system has the following modes of operation:

1. The summer mode: RM-1–RM-2 are in operation. No coolant flows through ventilation-cooling heat exchangers (HE-1, HE-2). No coolant of the refrigeration circuit flows through ventilation-cooling heat exchangers.

2. The winter mode: dry coolers and ventilation cooling heat exchangers are in operation. No heat carrying medium or coolant flow through RM-1 and RM-2.

Buildings are divided into three types, depending on the heat gain value per 1 m² of the office area, as well as on the duration of the working week. The first type includes buildings having heat emissions of 40–60 W/m² and 40–60 working hours per week. The second type encompasses buildings having heat emissions of 60–80 W/m² and 50–60 working hours a week. Buildings having heat emissions of 80–100 W/m² and 50–60 hours of operation per week represent the third type.

Even if outdoor temperature is rather low, premises of office buildings need cooling at rather high heat emission, in such premises the indoor air temperature of 18–24 °C is maintained all the year round. Depending on the heat gains from inside, as well as the schedule of working hours in this type of premises during the day, the load on heating and cooling systems is determined.

The work assumes the maximum use of internal heat emissions and the refrigeration capacity of the outdoor air for the benefit of the building premises in winter. After all, in winter, heat emissions, exceeding heat transmission losses, can also be observed during indoor working hours.

Initially, the following heat surplus was identified in the rooms to be refrigerated:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6,$$

where Q_1 is the heat gain from artificial lighting; Q_2 is the heat gain from solar radiation; Q_3 is the heat gain from people in the room; Q_4 is the heat gain from computers; Q_5 is the heat gain from office equipment and other appliances; Q_6 is the heat gain from hot meals.

Total discounted costs (TDC) were used to identify the most profitable air refrigeration option for the air cooling system, RR:

$$\text{TDC} = C \left(1 + \frac{p}{100} \right)^T + Y \left[\left(1 + \frac{p}{100} \right)^T - 1 \right] \cdot \left(\frac{100}{p} \right),$$

where p is the discount rate, %, equal to the average bank loan interest rate; C stands for capital expenses, RR, in respect of the chose option; T is the years; Y stands for annual operating costs.

The costs of cooling the building are calculated using the cost of electricity. The authors use four electricity rates (as of April 2021) from 3.933 to 6.16 rubles/kWh, depending on the type of tariff, to calculate the cost of electricity.

For machine and ventilation cooling of a building, non-recurrent capital costs C , in RR, are made up of the cost of connecting the cooling system to the Moscow power grid (C_{con}) and the cost of equipment used for cooling premises (C_{eq}), in RR.

The discount rate was equal to the average interest rate of 10 %.

Fig. 1 shows a diagram of the capital costs of equipment for alternative options.

The economic analysis of the cost of maintaining the microclimate in an office building was conducted by comparing the value of TDC for each option during 15 years. Fig. 2, 3 show the diagrams for these calculations.

As it can be seen from the diagrams, the values of TDC at initial stages, when only capital costs are considered, are almost the same for all options. The energy-saving measure is only profitable if annual operating costs are added each year, and the longer the calculation period, the more profitable the corresponding option becomes.

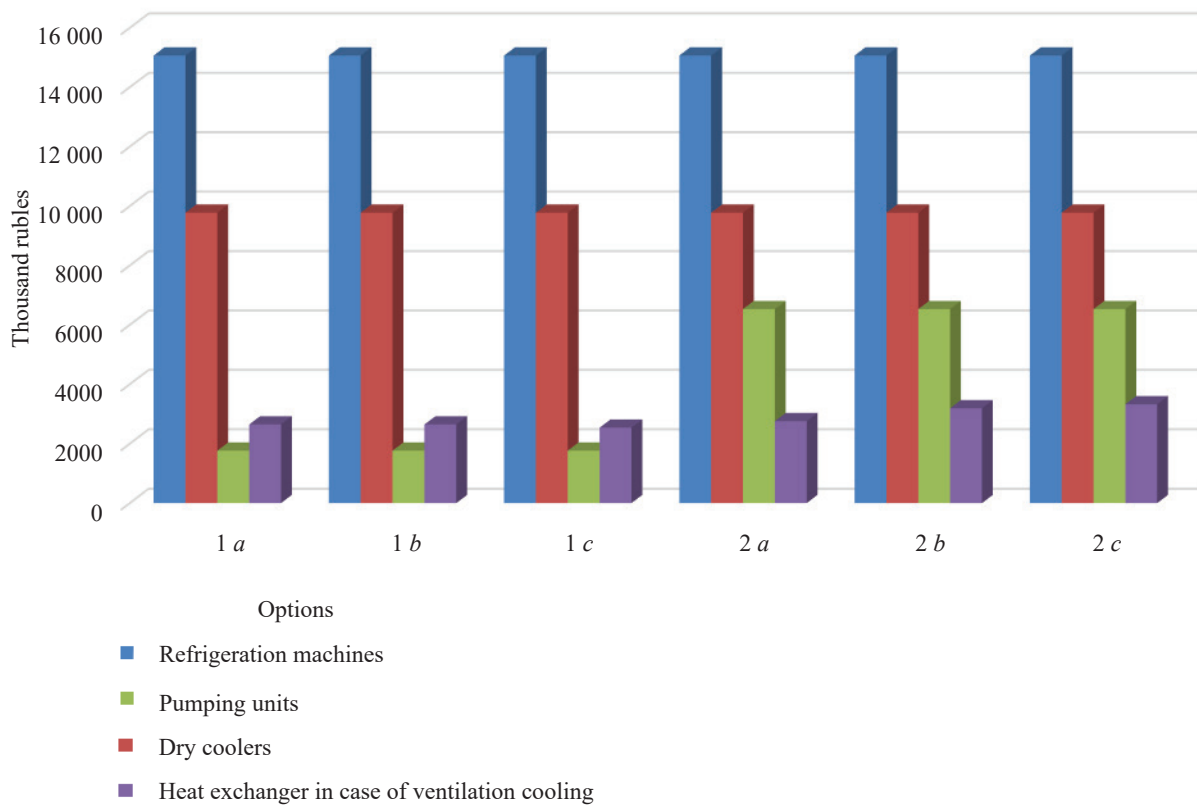


Fig. 1. Capital costs for equipment for alternative options

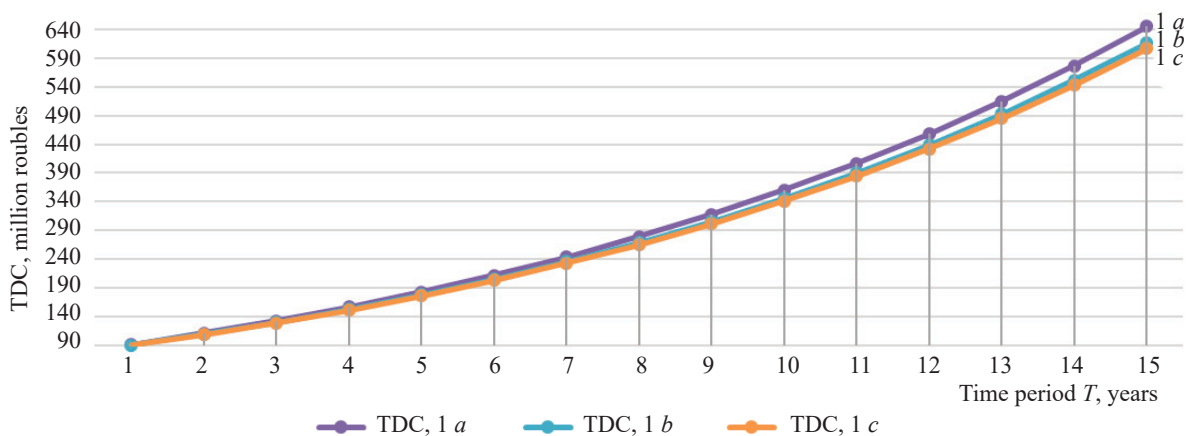


Fig. 2. A 15-year change in TDC for free-cooling and machine operation (for Options 1 a, 1 b, 1 c) with a 10 % discount

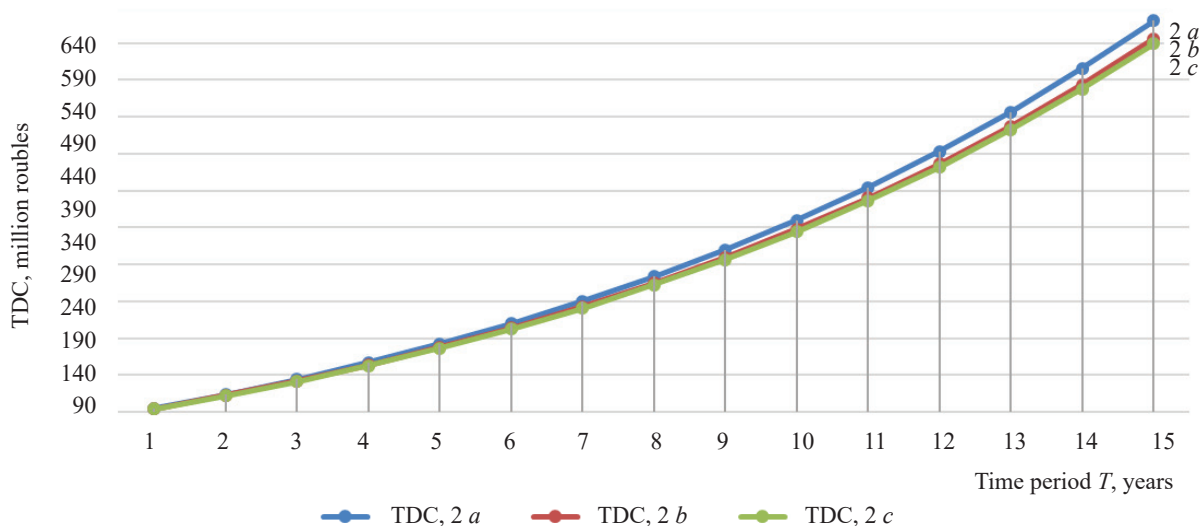


Fig. 3. A 15-year change in TDC for free-cooling and machine operation (for Options 2 a, 2 b, 2 c) with a discount of 10 %

CONCLUSION AND DISCUSSION

The results of this work allow making the following conclusions:

- it is found that the location of dry coolers strongly affects the cost of pumping units;
- having compared options 1 a, 1 b, 1 c with the option encompassing the installation of dry coolers

on the building roof, the authors found that Option 1 b was economically profitable at the 10 % discount;

- having compared options 1 a, 1 b, 1 c, when dry coolers were installed near the building, it was found out that Option 2 c, featuring the temperature of transition from ventilation cooling to machine cooling $t_c = 8^\circ\text{C}$, was more profitable than the transition at $t_n = 5^\circ\text{C}$ in Option 2 b and at $t_c = 0^\circ\text{C}$ in Option 2 a.

REFERENCES

1. Frolova A.A., Lukhmenov P.I. Energy-focused substantiation of the choice of an air conditioning system for an office and shopping building. *Construction: Science and Education*. 2021; 11(2):3. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.2.3 (rus.).
2. Frolova A. Determination of the amount of internal heat input in the office space. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 012061. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012061
3. Hani A., Koiv T.A. Energy consumption monitoring analysis for residential, educational and public buildings. *Smart Grid and Renewable Energy*. 2012; 3:231-238. DOI: 10.4236/sgre.2012.33032
4. Tsyganov A.I. Justification of the possibility of constructing passive multi-story residential buildings in the climatic conditions of central Russia. *Construction: Science and Education*. 2021; 11(3):58-78. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.3.4 (rus.).
5. Daraghmeh H., Wang C.C. A review of current status of free cooling in datacenters. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 114:1224-1239. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.093
6. Yang Y., Wang B., Zhou Q. Energy saving analysis of free cooling system in the data center. *Procedia Engineering*. 2017; 205:1815-1819. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.239
7. Ma Y., Ma G., Zhang S., Zhou F. Cooling performance of a pump-driven two phase cooling system for free cooling in data centers. *Applied Thermal Engineering*. 2015; 95:143-149. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.11.002
8. Sukhankin V.P., Finkelshtein B.I. The ways to increase power efficiency of climate control of telecommunication facilities. *Chief Power Engineer*. 2017; 5-6:83-87. (rus.).
9. Panchabikesan K., Velraj R. Passive cooling potential in buildings under various climatic conditions in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 78C:1236-1252. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.030
10. Broyda V.A., Dorofeenko N.S. Efficiency of direct free cooling in an air conditioning system for rooms with significant heat input. *Izvestiya Kazan State Architectural and Construction University*. 2019; 4(50):279-287. (rus.).
11. Malyavina E.G., Frolova A.A. Selection of energy-reasonable thermal protection of office buildings with year-round maintenance of the thermal microclimate. *Housing Construction*. 2019; 1-2:63-68. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-1-2-63-68 (rus.).
12. Malyavina E.G., Frolova A.A. Energy and economic assessment of heat protection of office building. *Bulletin of the Belgorod State Technological Uni-*

versity. V.G. Shukhov. 2017. 8:64-69. DOI: 10.12737/article_5968b4502ace93.00925434 (rus.).

13. Malyavina E.G., Frolova A.A., Silaev A.S. Power and economic assessment of systems to free and machine cooling for conditioned office rooms. *AVOK*. 2014; 1:42-46. (rus.).

14. Malyavina E.G., Frolova A.A., Silaev A.S. Power and economic assessment of systems to free and machine cooling for conditioned office rooms. *AVOK*. 2014; 2:68-72. (rus.).

15. Tsoy A.P., Baranenko A.V., Granovskiy A.S., Tsoy D.A., Koretskiy D.A., Jamasheva R.A. Computer simulation of annual work cycle of combined refrigeration system using night radiative cooling. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020; 4(3):28-37. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-3-28-37 (rus.).

16. Garyaev A.B., Korotke Y.V. Assessing the scales and prospects of using the environmental cold for energy saving purposes. *Vestnik MEI. Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2018; 4:58-70. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-58-70 (rus.).

17. Paiho S., Abdurafikov R., Hoang H. Cost analyses of energy-efficient renovations of a Moscow residential district. *Sustainable Cities and Society*. 2014; 14(1):5-15. DOI: 10.1016/j.scs.2014.07.001

18. Ermolov D.A. The natural cold as unconventional source of cooling. *Bulletin of the Tula State University. Technical science*. 2017; 12-1:223-225. (rus.).

19. Seregin A.I. Energy efficient solutions for shopping centers. *AVOK*. 2019; 1:30-37. (rus.).

20. Evushkin A.I., Sheremetyev S.S. Energy-efficient air conditioning solutions for server rooms. *Science, Technology and Education*. 2017; 3(33):61-63. (rus.).

Поступила в редакцию 27 января 2022 г.

Принята в доработанном виде 28 февраля 2022 г.

Одобрена для публикации 28 февраля 2022 г.

B I O N O T E S: **Anastasiya A. Frolova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Lecturer of the Department of Engineering and Technology; **Leonov Moscow Region University of Technology**; 42 Gagarina st., 141070, Moscow region, Korolev, Russian Federation; FrolovaAA@mgsu.ru;

Pavel I. Lukhmenev — postgraduate; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; lukhmenev@yandex.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Conflict of the interests: the authors declare no conflict of interest.