Экономическое сравнение электрических и водяных теплых полов

Е.П. Базунов, В.Ю. Кравчук

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение теплых полов для отопления помещений с постоянным пребыванием людей широко распространено в зарубежной проектной практике. Отечественные проектные организации тоже применяют это решение, так как оно положительно влияет на параметры микроклимата и тепловой комфорт людей. Напольное отопление также превосходит традиционные системы отопления по некоторым эксплуатационным характеристикам. Использование напольных систем отопления — актуальная задача, что подтверждается большим количеством публикаций, однако в основном внимание исследователей сосредоточено на определении теплоотдающей способности пола при различных конструктивных решениях. Цель исследования — провести экономический анализ систем водяного и электрического теплых полов.

Материалы и методы. Экономический анализ систем напольного отопления проводится методом совокупных затрат. Определяются капитальные затраты и эксплуатационные расходы, которые суммируются по годам. Рассматриваются помещения площадью 5, 10 и 20 м², в которых сравниваются системы водяного и электрического теплых полов. Региональным строительством является г. Москва. Тепловые потери помещений принимаются линейно зависимыми от площади.

Результаты. Приведены таблицы значений капитальных затрат и эксплуатационных расходов для рассмотренных условий. Построен график совокупных затрат по годам для трех помещений с двумя типами систем отопления.

Выводы. Несмотря на то что результаты представлены для частных случаев, из них можно получить более обобщенный вывод о том, что срок окупаемости напольной системы отопления зависит от площади помещения, а также, что для малых площадей целесообразнее применять электрический теплый пол. В качестве перспективы дальнейшего развития данной темы можно рассмотреть варианты расчетов, в которых будут учитываться другие способы раскладки труб; изменение потребления электроэнергии насоса в зависимости от длины контуров; прерывистое отопление.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теплый пол, отопление, совокупные затраты, сравнение, экономический анализ, электрический теплый пол, водяной теплый пол

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Базунов Е.П., Кравчук В.Ю. Экономическое сравнение электрических и водяных теплых полов // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. Вып. 1. Ст. 2. URL: <http://nso-journal.ru> DOI: 10.22227/2305-5502.2021.1.2

Comparing the economics of electric and water underfloor heating

Egor P. Bazunov, Valery Yu. Kravchuk

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

ABSTRACT

Introduction. Using underfloor heating to maintain warm temperature inside manned rooms is a widely spread international practice. Domestic design organizations also take advantage of this solution, as it makes a positive impact on the indoor microclimate and thermal comfort. Underfloor heating outperforms traditional heating systems in terms of particular operational characteristics. The application of underfloor heating is a relevant issue, addressed by numerous publications, however, researchers tend to focus on the heat emission capacity of floors that have different constructions. The goal of this research is to analyze the economics of electric and water underfloor heating systems.

Materials and methods. The aggregate cost method is employed to perform the economic analysis of underfloor heating systems. The co-authors have calculated capital and operating expenses, broken down by the years. The co-authors compare electric and water underfloor heating systems installed in the rooms having the floor area of 5, 10, and 20 sq. meters. The rooms are located in Moscow. Indoor heat losses are considered to be linearly dependent on the heated floor area.

Results. The co-authors have calculated capital and operating expenses incurred in the above rooms. They have also drawn an aggregate heating cost graph for three rooms having two types of heating systems installed. The costs are broken down by the years.

Conclusions. Although the research findings describe individual cases, they can serve as the basis for a general conclusion that the payback period of an underfloor heating system depends on the heated floor area and that electric underfloor heating systems are better for small rooms. Further studies can focus on alternative pipeline design systems, different power consumption modes of the pump depending on the circuit length, and non-continuous heating systems.

KEYWORDS: underfloor heating, heating, aggregate costs, comparison, economic analysis, electric underfloor heating, water underfloor heating

FOR CITATION: Bazunov E.P., Kravchuk V.Yu. Comparing the economics of electric and water underfloor heating. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2021; 11(1):2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.1.2 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Применение теплых полов для отопления помещений с постоянным пребыванием людей широко распространено в зарубежной проектной практике. Отечественные проектные организации тоже применяют это решение, так как оно положительно влияет на параметры микроклимата и тепловой комфорт людей. Напольное отопление также превосходит традиционные системы отопления по некоторым эксплуатационным характеристикам.

Система теплого пола — сложное инженерное изобретение, которое нуждается в исчерпывающих исследованиях. В настоящий момент российские и зарубежные ученые продолжают изучать эту область и публиковать статьи. В частности, влияние толщины слоя теплоизоляции на теплоотдающую способность пола рассмотрено в работе [1]; расчетам температурных полей в полу и определению теплоотдающей способности для различных конструктивных решений посвящены труды [2–11]; сравнение теплых полов по разным критериям приведено в публикациях [12–15]; другие общие исследования присутствуют в работах [16–21]. Такое количество разнонаправленных исследований свидетельствует об актуальности вопросов правильного проектирования напольных систем отопления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данная статья посвящена сравнению систем отопления с применением водяных и электрических теплых полов по капитальным и эксплуатационным затратам. Рассматриваются три варианта помещений, отличающихся по площади. Так как в работе будут учитываться затраты на закупку и монтаж систем, необходимо определиться с конкретными конструкциями полов, которые будут рассчитываться. Принятые конструкции приведены на рис. 1 и 2.

Рис. 1. Конструкция пола при водяном отоплении

Рис. 2. Конструкция пола при электрическом отоплении

Расчет эксплуатационных расходов для площади помещений 5, 10 и 20 м²

Анализируемые помещения находятся в коттедже, расположенном в г. Москве. Они являются жилыми комнатами, их тепловые потери составляют 250, 500 и 1000 Вт соответственно.

Водяная система отопления

Плотность теплового потока для системы напольного отопления определяем по формуле [19]:

$$q = 8,92 \cdot (t_{\text{пл.ср}} - t_{\text{в.р}})^{1,1} = 8,92 \cdot (26 - 20)^{1,1} = 64,02 \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

где $t_{\text{пл.ср}}$ — средняя температура поверхности пола, равная 26 °C; $t_{\text{в.р}}$ — расчетная температура воздуха в помещении, равная 20 °C; $A_{\text{пл}}$ — площадь поверхности пола, м².

Тепловой поток, передаваемый поверхностью пола к воздуху помещения, рассчитываем по выражению:

$$Q_{\text{пл}} = qA_{\text{пл}}, \text{ Вт.}$$

Полученные значения тепловых потоков на несколько процентов превышают теплопотери помещения по каждому варианту, поэтому при использовании водяного теплого пола не потребуется дополнительная установка радиаторов.

Годовые затраты теплоты на отопление вычисляем по формуле:

$$Q_{\text{год}} = 2,39 \cdot 10^{-10} \cdot 86 \cdot 400 \cdot z_{\text{оп}} Q_{\text{пл}} \frac{t_{\text{в.р}} - t_{\text{оп}}^{\text{ср}}}{t_{\text{в.р}} - t_{\text{н}}^5}, \text{ Гкал}, \quad (2)$$

где $z_{\text{оп}}$ — продолжительность периода со средней суточной температурой воздуха < 8 °C, равная 205 суткам; $t_{\text{оп}}^{\text{ср}}$ — средняя температура периода со средней суточной температурой воздуха < 8 °C, равная -2,2 °C; $t_{\text{н}}^5$ — температура воздуха наибо-

лее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92, равная -25°C .

Переводим $G_{\text{кал}}$ в кДж :

$$Q_{\text{год}}, \text{кДж} = 4,184 \cdot 10^6 \cdot Q_{\text{год}}, \text{Гкал}.$$

Годовое потребление газа находим по формуле:

$$G_m = \frac{Q_{\text{год}}}{Q_{\text{р.н}} \cdot \eta}, \text{ м}^3, \quad (3)$$

где $Q_{\text{р.н}}$ — рабочая низшая теплота сгорания газа, принимаемая равной 38 000 Вт; η — коэффициент полезного действия газового котла, принимаемый равным 0,89.

Годовые эксплуатационные затраты находим по формуле:

$$K_{\text{эсп}} = G_{\text{г}} C_{\text{газ}}, \text{ руб./год}, \quad (4)$$

где $C_{\text{газ}}$ — стоимость 1 м^3 газа, принимаемая для Москвы 7,04 руб.

К потреблению тепловой энергии уместно добавить также потребление электроэнергии насосом. При мощности 50 Вт и сезонной работе он потребит 438 $\text{кВт} \cdot \text{ч}$ электрической энергии в год.

Электрическая система отопления

Тепловыделения от электрического пола также с запасом покрывают тепловые потери помещения, поэтому устройство дополнительных источников теплоты не предусматривается. Приводим годовое потребление тепловой энергии к потреблению электроэнергии, необходимой для работы электрических матов:

$$Q_{\text{год}}^{\text{эл}} = 1,1622 \cdot Q_{\text{год}} \cdot 1000, \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Годовые эксплуатационные затраты на электроэнергию находим по формуле:

$$K_{\text{эсп}}^{\text{эл}} = Q_{\text{год}}^{\text{эл}} C_{\text{эл}}, \text{ руб.}, \quad (5)$$

где $C_{\text{эл}}$ — стоимость электроэнергии, принимается в размере 5,66 руб. за 1 $\text{кВт} \cdot \text{ч}$.

Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты расчета эксплуатационных расходов

$A, \text{ м}^2$	Теплопотери, Вт	Водяные теплые полы					Электрические теплые полы	
		$Q_{\text{пл}}, \text{ Вт}$	$Q_{\text{год}}, \text{ Гкал}$	$Q_{\text{год}}, \text{ кДж}$	$G_{\text{г}}, \text{ м}^3$	$K_{\text{эсп}}, \text{ руб.}$	$Q_{\text{год}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}$	$K_{\text{эсп}}, \text{ руб.}$
5	250	320,11	0,522	2 184 427,57	64,59	2933,79	606,77	3434,34
10	500	640,22	1,044	4 368 855,14	129,18	3388,50	1213,55	6868,68
20	1000	1280,45	2,088	8 737 710,29	258,36	4297,93	2427,10	13 737,36

Расчет капитальных затрат

Монтаж водяного теплого пола состоит из следующих этапов:

1. Демонтаж бетонной армированной стяжки толщиной 100 мм. Данная работа оценивается 650 руб./ м^2 .

2. Устройство грязного пола. Стоимость работ по обустройству сухой стяжки пола в квартире в среднем составляет 300–400 рублей за квадратный метр. Сами материалы — сухая засыпка, элементы покрытия пола, шурупы, кромочная лента, полиэтиленовая пленка — обойдутся примерно в 600–800 рублей за квадратный метр. Стоимость гидроизоляции пола принимается равной 500 руб./ м^2 . Стоимость арматурной сетки 100 × 100 мм d 2,5 мм 1 × 2 м — 95 руб.

3. Укладка труб. Средняя цена на рынке за укладку водяных теплых полов составляет 600 руб./ м^2 . Стоимость шумоизоляции 850 руб./ м^2 . Принят вариант укладки труб «Улиткой». При этом необходимая длина труб рассчитывается по формуле:

$$L = \frac{A_{\text{пл}}}{T}, \quad (6)$$

где $A_{\text{пл}}$ — площадь греющей поверхности пола, для рассматриваемого помещения; T — шаг укладки труб, м, равный 0,2 м. Стоимость труб принята равной 91,2 руб./м.

4. Покупка и монтаж насосно-смесительного узла. Стоимость насосно-смесительного узла с монтажом принята по данным открытых источников равной 37 500 руб.

Монтаж электрического теплого пола состоит из:

1. Разметки и подготовки основания. Стоимость работ оценивается 400 руб./ м^2 .

2. Покупки и установки терморегулятора и датчика температуры. Стоимость работ оценивается 6500 руб.

3. Покупки и установки нагревательных матов. Выбраны нагревательные маты в упаковках по 1 м^2 со стоимостью каждой 2050 руб. Стоимость работ по укладке и подключению принимается равной 500 руб./ м^2 .

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты расчета капитальных затрат по этапам

A, м ²	Водяные теплые полы					Итого	Электрические теплые полы			Итого
	L, м	1, руб.	2, руб.	3, руб.	4, руб.		1, руб.	2, руб.	3, руб.	
5	25	3250,00	7987,50	9530,00	37 500,00	58 267,50	2000,00	6500,00	12 750,00	21 250,00
10	50	6500,00	15 975,00	19 060,00	37 500,00	79 035,00	4000,00	6500,00	25 500,00	36 000,00
20	100	13 000,00	31 950,00	38 120,00	37 500,00	120 570,00	8000,00	6500,00	51 000,00	65 500,00

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты расчетов сведены в график, представленный на рис. 3.

Рис. 3. Распределение совокупных затрат по годам

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные расчеты показали, что целесообразность выбора между электрическими и водяными теплыми полами зависит от площади помещения, в котором планируется их применение. Расчетная методика имеет ряд загроублений, учитывая которые возможно более точно определить сроки окупаемости. Важно отметить, что не всегда тепловые потери помещений могут быть полностью покрыты мощностью как водяных, так и электрических теплых полов. В этом случае придется либо оборудовать помещение дополнительными источниками теплоты, либо полностью отказываться от напольной системы. В качестве перспективы дальнейшего развития данной темы можно рассмотреть варианты расчетов, в которых будут учитываться другие способы раскладки труб; изменение потребления электроэнергии насоса в зависимости от длины контуров; прерывистое отопление.

ЛИТЕРАТУРА

1. Basok B., Tkachenko M., Nedbailo A., Bozhko I. Исследование энергетической эффективности системы напольного отопления сухого монтажа // Technology Audit and Production Reserves. 2018. Vol. 3. Issue 1 (41). Pp. 52–57. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.135783
2. Liu Y., Wang D., Liu J. Study on heat transfer process for in-slab heating floor // Building and Environment. 2012. Vol. 54. Pp. 77–85. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.02.007
3. Jin X., Zhang X., Luo Y. A calculation method for the floor surface temperature in radiant floor system // Energy and Buildings. 2010. Vol. 42. Issue 10. Pp. 1753–1758. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.05.011
4. Кремнева А.А., Коровина Л.С., Полуэктова В.Г. Оптимальное применение теплоизоляции для теплых полов с учетом минимизации тепловпотерь в грунт на примере пеноплэкс // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2019. № 2 (15). С. 35–42.
5. Wu X., Zhao J., Olesen B.W., Fang L., Wang F. A new simplified model to calculate surface temperature and heat transfer of radiant floor heating and cooling systems // Energy and Buildings. 2015. Vol. 105. Pp. 285–293. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.07.056
6. Li Q., Chen C., Zhang Y., Lin J., Ling H. Simplified thermal calculation method for floor structure in radiant floor cooling system // Energy and Buildings. 2014. Vol. 74. Pp. 182–190. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.01.032
7. Wu X., Zhao J., Olesen B.W., Fang L., Wang F. A new simplified model to calculate surface temperature and heat transfer of radiant floor heating and cooling systems // Energy and Buildings. 2015. Vol. 105. Pp. 285–293. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.07.056
8. Cholewa T., Rosiński M., Spik Z., Dudzińska M.R., Siuta-Olcha A. On the heat transfer coefficients between heated/cooled radiant floor and room // Energy and Buildings. 2013. Vol. 166. Pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.07.065

9. Tye-Gingras M., Gosselin L. Investigation on heat transfer modeling assumptions for radiant panels with serpentine layout // *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. Pp. 1598–1608. DOI: 10.1016/J.ENBUILD.2011.03.004
10. Hernandez F.F., Lopez J.M.C., Gutierrez A.F., Munoz F.D. A new terminal unit combining a radiant floor with an underfloor air system: experimentation and numerical model // *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 133. Pp. 70–78. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.09.040
11. Li H., Xi C., Kong X., Lin Z., Wang L. A comparative experimental investigation on radiant floor heating system and stratum ventilation // *Sustainable Cities and Society*. 2020. Vol. 52. P. 101823. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101823
12. Ключева Н.А. Анализ систем водяного и электрического теплого пола // *Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: мат. IX Национальной конф. с Междунар. участием*. Саратов, 2019. С. 141–143.
13. Королева А.Н. Выбор оптимального теплого пола для жилых помещений // *Инновации природообустройства и защиты окружающей среды : мат. I Национальной науч.-практ. конф. с Междунар. участием*. Саратов, 2019. С. 48–51.
14. Кантаков Р.Г. Экономическое сравнение водяного и электрического панельного отопления для жилого помещения // *Дни студенческой науки: сб. докл. науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ студентов Института инженерно-экологического строительства и механизации НИУ МГСУ*. М., 2019. С. 354–358.
15. Бурмистрова С.Е., Кириллова А.А., Гаряев А.Б. Сравнение затрат на эксплуатацию водяного теплого пола и радиаторного отопления // *Синергия наук*. 2019. № 42. С. 501–510.
16. Низовцев М.И., Сахаров И.А. Определение тепловых и конструктивных параметров водяного теплого пола // *Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий : сб. науч.-практ. конф.* Новосибирск, 2013. С. 39–42.
17. Умеренкова Э.В., Умеренков Е.В., Насонова А.А., Голобоков А.С. Влияние системы «теплый пол» на параметры микроклимата помещения // *Современные проблемы в строительстве: постановка задач и пути их решения : сб. науч. статей Международной научно-практ. конф.* Курск, 2019. С. 180–182.
18. Юдаев И.В., Токарева А.Н., Грачева Н.Н., Панченко С.В., Даус Ю.В. Обоснование геометрических параметров системы отопления «теплый пол» в детских дошкольных учреждениях сельских территорий // *Известия НВ АУК*. 2019. № 4 (56). С. 290–300. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-04-34
19. Усталов Д.С. Теплые полы. Личный опыт // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. 2014. № 10. С. 46–52.
20. Causone F., Corgnati S.P., Filippi M., Olesen B.W. Solar radiation and cooling load calculation for radiant systems: Definition and evaluation of the Direct Solar Load // *Energy and Buildings*. 2010. Vol. 42. Issue 3. Pp. 305–314. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.09.008
21. Hajabdollahi F., Hajabdollahi Z., Hajabdollahi H. Thermo-economic modeling and optimization of underfloor heating using evolutionary algorithms // *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 47. Pp. 91–97. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.11.032

Поступила в редакцию 24 декабря 2020 г.

Принята в доработанном виде 15 марта 2021 г.

Одобрена для публикации 15 марта 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: Егор Павлович Базунов — студент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; mangust.bazunov@mail.ru;

Валерий Юрьевич Кравчук — преподаватель; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3147-0674; Valerik_kravchuk@mail.ru.

INTRODUCTION

Using underfloor heating to maintain warm temperature inside manned rooms is a widely spread international design practice. Domestic design organizations also apply this solution, as it makes a positive impact on the indoor microclimate and thermal comfort. Underfloor heating outperforms traditional heating systems in terms of particular operational characteristics.

An underfloor heating system is a complex engineering invention that needs comprehensive research. Presently, Russian and foreign researchers continue their studies in this area and publish their articles. In particular, the influence of thermal insulation on the heat emissivity of floors is considered in [1]; the analysis of temperature fields inside the floors and heat emissivity of various floor constructions are covered in [2–11]; underfloor heating is compared using

versatile criteria in [12–15]; other results generated by research projects are analyzed in [16–21]. Such an extensive amount of heterogeneous research has proven the relevance of underfloor heating design solutions.

MATERIALS AND METHODS

The co-authors compare electric and water underfloor heating systems in terms of capital and operating expenses. Three rooms, having different floor areas, are analyzed. The research will also take account of the cost of materials and installation, as well as the floor construction to be selected. Floor designs are shown in Fig. 1 and 2.

Fig. 1. Design of a water underfloor heating system

Fig. 2. Design of an electric underfloor heating system

Operating expenses for 5, 10 and 20 m² rooms

The rooms are located in a detached home in Moscow. Heat losses in these manned rooms reach 250, 500 and 1,000 W.

Water underfloor heating system

The heat flow density rate of an underfloor heating system is calculated using the following formula [19]:

$$q = 8.92 \cdot (t_{av} - t_{air})^{1.1} = 8.92 \cdot (26 - 20)^{1.1} = 64.02, \text{ W/m}^2, (1)$$

where t_{av} is the average floor surface temperature, equal to 26 °C; t_{air} is the design indoor temperature,

equal to 20 °C; A_{fl} is the floor surface area in square meters, m².

The heat flow, that moves from the floor surface to the indoor air, is calculated using the following formula:

$$Q_{hf} = qA_{fl}, \text{ W}.$$

The values of heat flows, thus calculated, exceed the indoor heat loss by several percent, therefore, no supplementary heaters need to be installed if the water underfloor heating system is installed.

The annual heat input, used to heat the rooms, is calculated using the following formula:

$$Q_{year} = 2.39 \cdot 10^{-10} \cdot 86,400 \cdot z_{heat} Q_{hf} \frac{t_{air}^{av} - t_{heat}^{av}}{t_{air} - t_n^5}, \text{ Gcal}, (2)$$

where z_{heat} is the number of days when the average daily temperature is < 8 °C, which is equal to 205 days; t_{heat}^{av} is the average temperature in a period when the average daily temperature is < 8 °C, which is equal to –2.2 °C; $t_{0,92}^5$ is the air temperature during the coldest days equal to –25 °C.

Further we convert Ccal into kJ:

$$Q_{year}, \text{ kJ} = 4.184 \cdot 10^6 \cdot Q_{year}, \text{ Ccal}.$$

Annual gas consumption is calculated according to the formula:

$$G_m = \frac{Q_{year}}{Q_{low} \eta}, \text{ m}^3, (3)$$

where Q_{low} is the lower gas combustion value, equal to 38,000 W; η is the gas boiler efficiency ratio, equal to 0.89.

Annual operating expenses are calculated as follows:

$$K_{oper} = G_m C_{gas}, \text{ RR/year}, (4)$$

where C_{gas} is the cost of 1 m³ of gas, equal to 7.04 RR in Moscow.

Thermal energy consumption must be coupled with electric energy consumption by the pump. If its capacity is equal to 50 W, it consumes 438 kW/h of electric energy a year, if it is in operation during the cold season.

Electric underfloor heating system

The amount of heat emitted by an electric underfloor heating system exceeds heat losses; therefore, no supplementary sources of heat are to be installed. Let's correlate the annual consumption of thermal energy and electric energy consumption by electric mats:

$$Q_{year}^{el} = 1.1622 \cdot Q_{year} \cdot 1000, \text{ kW/h}.$$

Annual operating expenses associated with energy consumption are calculated as follows:

Table 1. Operating costs incurred by both systems

A, m^2	Heat loss, W	Water underfloor heating					Electric underfloor heating	
		Q_{hf}, W	Q_{year}, GCal	Q_{year}, kJ	G_p, m^3	K_{oper}, RR	$Q_{year}, \text{kW/h}$	K_{oper}, RR
5	250	320.11	0.522	2,184,427.7	64.59	2,933.79	606.77	3,434.34
10	500	640.22	1.044	4,368,855.14	129.18	3,388.50	1,213.55	6,868.68
20	1,000	1,280.45	2.088	8,737,710.29	258.36	4,297.93	2,427.10	13,737.36

$$K_{oper}^{el} = Q_{year}^{el} C_{el}, \text{RR}, \quad (5)$$

where C_{el} is the cost of electric energy equal to 5.66 RR per 1 kW/hour.

Calculation results are summarized in Table 1.

Calculation of capital expenditures

The installation of a water underfloor heating system has several stages:

1. Dismantlement of the reinforced concrete underlayment which is 100 mm thick. The work costs 650 RR/m².

2. Construction of the floor cement screed which costs 300–400 RR per square meter on average. The materials, including the dry mixture, floor covering, screws, edge band, polyethylene film will cost about 600–800 RR per square meter. The cost of the floor water insulation is equal to 500 RR per square meter. The cost of the reinforcing mesh, having the diameter of 2.5 mm, is equal to 95 RR if each item has the size of 1 × 2 m.

3. Pipe laying. The average market rate for pipe laying is equal to 600 RR/m². Noise insulation costs 850 RR/m². The layout used is called spiral. The pipe length is calculated according to the following formula:

$$L = \frac{A_{area}}{T}, \quad (6)$$

where A_{area} is the area of the heated floor surface in a given room; T is the pipe laying increment in meters equal to 0.2 m. The cost of pipes is equal to 91.2 RR/m.

4. The pump costs 37,500 RR (including installation).

The installation of an electric underfloor heating system is composed of:

5. Setting out and arranging the bottom layer. The work costs 400 RR/m².

6. The purchase and installation of a heat controller and a temperature sensor that cost 6,500 RR.

7. The purchase and installation of heating mats. The mat having the size of 1 m² costs 2,050 RR. The cost of their laying and connection is equal to 500 RR/m².

Calculation results are provided in Table 2.

RESEARCH RESULTS

The research results are consolidated in the graph shown in Fig. 3.

Fig. 3. Consolidated costs broken down by years**Table 2.** Installation costs

A, m^2	Water underfloor heating					Total	Electric underfloor heating			Total
	L, m	1, RR	2, RR	3, RR	4, RR		1, RR	2, RR	3, RR	
5	25	3,250.00	7,987.50	9,530.00	37,500.00	58,267.50	2,000.00	6,500.00	12,750.00	21,250.00
10	50	6,500.00	15,975.00	19,060.00	37,500.00	79,035.00	4,000.00	6,500.00	25,500.00	36,000.00
20	100	13,000.00	31,950.00	38,120.00	37,500.00	120,570.00	8,000.00	6,500.00	51,000.00	65,500.00

CONCLUSION AND DISCUSSION

The calculations have shown that the choice of electric or water underfloor heating is driven by the floor area of a room where the heating system will be installed. The proposed methodology has several features that make it possible to identify the payback period more precisely. It is important that indoor heat

losses cannot be covered by water/electric underfloor heating systems in all instances, and, hence, some rooms need additional sources of heat or alternative heating systems. As a further research project, we can suggest studying alternative piping and pump power consumption pattern depending on the pipeline length, as well as interrupted modes of heating.

REFERENCES

1. Basok B., Tkachenko M., Nedbailo A., Bozhko I. Research into energy efficiency of the underfloor heating system, assembled dry. *Technology Audit and Production Reserves*. 2018; 3:1(41):52-57. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.135783
2. Liu Y., Wang D., Liu J. Study on heat transfer process for in-slab heating floor. *Building and Environment*. 2012; 54:77-85. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.02.007
3. Jin X., Zhang X., Luo Y. A calculation method for the floor surface temperature in radiant floor system. *Energy and Buildings*. 2010; 42(10):1753-1758. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.05.011
4. Kremneva A.A., Korovina L.S., Poluektova V.G. Optimal use of thermal insulation for warm floors, taking into account the minimization of heat loss into the ground on the example of Penoplex. *Urban planning. Infrastructure. Communications*. 2019; 2(15):35-42. (rus.).
5. Wu X., Zhao J., Olesen B.W., Fang L., Wang F. A new simplified model to calculate surface temperature and heat transfer of radiant floor heating and cooling systems. *Energy and Buildings*. 2015; 105:285-293. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.07.056
6. Li Q., Chen C., Zhang Y., Lin J., Ling H. Simplified thermal calculation method for floor structure in radiant floor cooling system. *Energy and Buildings*. 2014; 74:182-190. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.01.032
7. Wu X., Zhao J., Olesen B.W., Fang L., Wang F. A new simplified model to calculate surface temperature and heat transfer of radiant floor heating and cooling systems. *Energy and Buildings*. 2015; 105:285-293. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.07.056
8. Cholewa T., Rosiński M., Spik Z., Dudzińska M.R., Siuta-Olcha A. On the heat transfer coefficients between heated/cooled radiant floor and room. *Energy and Buildings*. 2013; 166:599-606. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.07.065
9. Tye-Gingras M., Gosselin L. Investigation on heat transfer modeling assumptions for radiant panels with serpentine layout. *Energy and Buildings*. 2011; 43:1598-1608. DOI: 10.1016/J.ENBUILD.2011.03.004
10. Hernandez F.F., Lopez J.M.C., Gutierrez A.F., Munoz F.D. A new terminal unit combining a radiant floor with an underfloor air system: experimentation and numerical model. *Energy and Buildings*. 2016; 133:70-78. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.09.040
11. Li H., Xi C., Kong X., Lin Z., Wang L. A comparative experimental investigation on radiant floor heating system and stratum ventilation. *Sustainable Cities and Society*. 2020; 52:101823. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101823
12. Klyueva N.A. Analysis of water and electric floor heating systems. *Modern problems and prospects for the development of construction, heat and gas supply and energy supply : materials of the IX National Conference with international participation*. Saratov, 2019; 141-143. (rus.).
13. Koroleva A.N. The choice of the optimal underfloor heating for residential premises. *Innovations in environmental engineering and environmental protection : materials of the I National scientific and practical conference with international participation*. Saratov, 2019; 48-51. (rus.).
14. Kantakov R.G. Economic comparison of water and electric panel heating for living quarters. *Days of student science : Collection of reports of a scientific and technical conference on the results of research work of students of the Institute of Environmental Engineering and Mechanization National Research University MGSU*. Moscow, 2019; 354-358.
15. Burmistrova S.E., Kirillova A.A., Garyaev A.B. Comparison of costs for operation of water heated floor and radiator heating. *Synergy of Sciences*. 2019; 42:501-510. (rus.).
16. Nizovtsev M.I., Sakharov I.A. Determination of thermal and design parameters of a water heat-insulated floor. *Energy and resource efficiency of low-rise residential buildings : collection of scientific and practical conference*. Novosibirsk, 2013; 39-42. (rus.).
17. Umerenkova E.V., Umerenkov E.V., Nasonova A.A., Golobokov A.S. Influence of the "warm floor" system on the parameters of the microclimate of the room. *Modern problems in construction: setting tasks and ways to solve them : collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference*. Kursk, 2019; 180-182. (rus.).
18. Yudaev I.V., Tokareva A.N., Gracheva N.N., Panchenko S.V., Daus Yu.V. Substantiation of the geometric parameters of the "warm floor" heating system in preschool institutions of rural areas. *Izvestia NV AUK*. 2019; 4(56):290-300. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-04-34 (rus.).

19. Ustalov D.S. Warm floors. Personal experience. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2014; 10:46-52. (rus.).
20. Causone F., Corgnati S.P., Filippi M., Olesen B.W. Solar radiation and cooling load calculation for radiant systems: Definition and evaluation of the Direct Solar Load. *Energy and Buildings*. 2010; 42(3):305-314. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.09.008
21. Hajabdollahi F., Hajabdollahi Z., Hajabdollahi H. Thermo-economic modeling and optimization of underfloor heating using evolutionary algorithms. *Energy and Buildings*. 2012; 47:91-97. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.11.032

Received December 24, 2020.

Adopted in revised form on March 15, 2021.

Approved for publication on March 15, 2021.

BIONOTES: Egor P. Bazunov — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; mangust.bazunov@mail.ru;

Valery Yu. Kravchuk — lecturer; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3147-0674; Valerik_kravchuk@mail.ru.