

Малявина Е.Г., канд. тех. наук, проф.,
Фролова А.А., аспирант

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОЗАЩИТЫ ОФИСНОГО ЗДАНИЯ

email@list.ru

На энергопотребление здания большое влияние оказывают тепловыделения в нем. При отоплении теплопоступления играют положительную роль. В течение рабочего дня они компенсируют часть или все теплопотери. Расчет нестационарного теплового режима помещений позволяет проследить за изменением потребности помещения в теплоте и холоде для поддержания температуры помещения в течение рабочего дня в заданных пределах. Анализ показал, что в зданиях со значительными внутренними тепловыделениями в одни и те же сутки в рабочее время может требоваться охлаждение, а в нерабочее отопление. Для экономической оценки вариантов утепления здания выбраны совокупные дисконтированные затраты (СДЗ). Значения СДЗ приняты на горизонте 10 лет. Были исследованы зависимости СДЗ от ряда факторов. Результатом исследования явилось определение области сочетаний геометрических параметров утепляемых зданий и стоимостных характеристик отдельных составляющих капитальных и эксплуатационных затрат, в которых целесообразно различное утепление офисных зданий.

Ключевые слова. Стоимость утеплителя, стоимость систем поддержания микроклимата, стоимость присоединения к энергосетям, стоимость энергоносителей, теплозащита.

Введение. Большой интерес к требуемому уровню теплозащиты зданий проявляется во всем мире [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], особенно потому, что с одной стороны от теплозащиты зависит энергопотребление на отопление и охлаждение зданий, а с другой нормативные документы большинства стран мира требуют окупаемости усиленного утепления зданий.

В нашей стране традиционно [9, 10] экономический анализ результатов различного утепления здания выполняется сравнением затрат на теплозащиту и тепловую энергию, необходимую для отопления различно утепленных зданий. На недостаточность такого подхода указывается в [11]. В предлагаемой работе экономический анализ выполнялся сравнением совокупных дисконтированных затрат (СДЗ), руб., на круглогодичное поддержание заданного микроклимата помещений при различных вариантах теплозащиты здания. Экономическая оценка теплозащиты зданий опирается на выявленные в [12] мощности

систем отопления и охлаждения помещений и годовое энергопотребление этими системами. Представленное экономическое сравнение трех вариантов теплозащиты выполнено с точки зрения финансирующего строительство здания инвестора, принимающего во внимание имеющиеся на рынке диапазоны цен утепления зданий, оборудования и систем, обслуживающих круглогодичное поддержание микроклимата офисных помещений.

Исходные данные для расчетов. Размеры здания отличались друг от друга длиной и этажностью. Ширина здания принята во всех случаях одинаковой и равной 20,2 м по наружному обмеру. Все торцевые стены - глухие (без окон). Рассматривались здания в 3-х (варианты здания 1–3) и 12-ти (варианты здания 4–6) этажей. Доля остекления продольных стен представлена в двух вариантах: 0,25; 0,55. Окна достаточно плотные, чтобы не учитывать инфильтрацию. Некоторые характеристики здания приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные геометрические показатели здания

Наименование величины	Вариант здания					
	1	2	3	4	5	6
Длина здания, м	20,4	40,8	61,2	20,4	40,8	61,2
Общая площадь здания, м ²	1 236	2 472	3709	4 945	9 890	14835
Площадь наружных ограждений, м ²	1 362	2 252	3 141	4 212	6 533	8 855
Объем здания, м ³	4 821	9 643	14 464	19 285	38 571	57856
Коэффициент компактности	0,368	0,319	0,303	0,240	0,191	0,174

В зданиях находятся офисные помещения одинаковых размеров $6,8 \times 10,1 \times 3,9$ (h) м. Причем рассматривались помещения четырех видов: рядовые промежуточных этажей, рядовые верхнего этажа, угловые на промежуточных этажах, угловые на верхнем этаже. Помещения имеют большую глубину (10,1 м), что приводит к значительному разбросу тепловыделений, приходящихся на единицу площади наружных ограждающих конструкций. Например, в рядовых помещениях среднего этажа наружные ограждения имеют суммарную площадь 26,5 м, а в угловых верхнего – 134,6 м.

Было рассмотрено три варианта теплозащиты здания, отличающихся друг от друга сопротивлением теплопередаче наружной стены и покрытия. Для варианта 1 сопротивление теплопередаче наружной стены и покрытия приближаются к нормируемым формулой (5.4) СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» по санитарно-гигиеническим условиям. Вариант 3 теплозащиты соответствует нормам исходя из энергосбережения по табл. 3 того же СП. Для варианта 2 сопротивления теплопередаче наружных стен и покрытий рассчитаны по формуле (5.1) того же СП с применением понижающего коэффициента 0,63 для стен и 0,8 для покрытия по отношению к варианту 3. Величины сопротивлений теплопередаче, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$, для наружных ограждающих конструкций, соответствующие вариантам 1, 2 и 3 по нормативам г. Москвы следующие: – для стен: 1,254; 1,754; 2,629; – для покрытий: 1,3709; 2,871; 3,621. Сопротивление теплопередаче окон во всех вариантах принято равным $0,54 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$.

Теплопоступления в офисные помещения выбраны на трех уровнях: $30 \text{ Вт} / \text{м}^2$, $50 \text{ Вт} / \text{м}^2$ и $70 \text{ Вт} / \text{м}^2$. Причем в эту величину входит и проникающая через окна солнечная радиация.

Считается, что центральная система кондиционирования подает приточный воздух с расходом по минимальной норме наружного при температуре, равной требуемой для воздуха помещения. Все теплоизбытки снимаются вентиляторными теплообменниками (фанкойлами). Применение охлаждения помещений за счет недогрева приточного воздуха в офисных зданиях исключается. Во-первых, это многокомнатные здания, в помещениях которых в одно и то же время могут наблюдаться различные теплоизбытки, и, во-вторых, тепловыделения офисных помещений слишком велики для того, чтобы при принятом по минимальным нормам расходе наружного воздуха можно было его подавать в помещения общепринятыми воздухораспределителями. Применение специальных рассеивателей, которые будут эффективны в короткую часть года, не рентабельно.

Принято, что конденсаторы холодильной машины охлаждаются 40 %-ным раствором этиленгликоля, циркулирующего через установленную во дворе здания или на его кровле сухую градирню (драйкулер). В отдельные периоды года охлаждение осуществляется путем машинного или свободного охлаждения. Причем, свободное охлаждение понимается как применение в фанкойлах воды, охлажденной в драйкулере.

Обращается внимание на то, что в расчет принималась только потребность зданий в теплоте и холоде на поддержание заданного теплового микроклимата помещений. Никакие потери из-за неэффективности работы и дополнительные затраты энергии на приготовление требуемых теплоносителей систем отопления и охлаждения не рассматривались. При расчетах принималось, что свободное охлаждение применяется при температуре наружного воздуха не выше $+5 \text{ °C}$.

Методика исследования. При расчете СДЗ норма дисконта в работе принята равной ставке рефинансирования Центробанка РФ $p=10 \%$. СДЗ приняты на горизонте $T=10$ лет, так как срок службы холодильного оборудования равен приблизительно этому промежутку времени. Кроме того, если окупаемость вложенных средств не укладывается в 10 лет, то вариант нельзя считать выгодным.

Единовременные капитальные затраты, руб., для каждого варианта утепления здания учтены в виде стоимости дополнительного (по сравнению с вариантом 1) утепления наружных ограждений, руб.; стоимости системы отопления, руб., и свободного, руб., и машинного, руб., охлаждения помещений, а так же стоимости присоединения систем отопления и охлаждения к теплосети, руб., и электросети, руб., города Москвы. В формулу расчета СДЗ капитальные затраты входят в виде обезличенной денежной массы, не акцентирующей внимание на том, какая составляющая затрат: на утепление здания, на системы, поддерживающие заданный микроклимат в помещениях здания, на присоединение к сетям энергообеспечивающих организаций, является доминирующей. Однако следует заранее выяснить связь между ними. Анализ энергозатрат показал, что чем выше утепление здания, тем меньше системы отопления и стоимость присоединения к теплосетям. А вот про стоимость систем охлаждения такого сказать нельзя. Наоборот, с усилением теплозащиты необходимы более мощные системы охлаждения. Поэтому, каждая составляющая капитальных затрат отнесена к единице мощности системы, которая ранее [12] выявлена в процессе расчета энергозатрат на отопление и охлаждение каждого помещения здания в течение года.

Эксплуатационные затраты, руб./год, на поддержание микроклимата здания складываются из стоимости годовых затрат теплоты, руб./год, и электроэнергии, руб./год, потребленной циркуляционными насосами отопления и компрессором, и насосными группами системы охлаждения, а также амортизационных отчислений на эксплуатацию оборудования, руб./год.

Амортизационные отчисления, определялись [13] исходя из капитальных затрат и числа лет, в течение которых возвращаются капитальные расходы, принятых равными 10 годам.

Понятно, что потенциально стоимость дополнительного утепления увеличивается от варианта 1 к варианту 3, а стоимости оборудования и условий присоединения к энергосетям при этом уменьшаются. Однако цены на каждую составляющую капитальных и эксплуатационных затрат приняты в некоторых диапазонах, которые диктуются практикой строительства, что делает задачу не столь однозначной. Дополнительные затраты на утепление зданий определяются по сравнению с вариантом утепления 1. При этом был принят наиболее ходовой утеплитель с теплопроводностью $0,045 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$. С учетом элементов крепежа, пронизывающего слой утеплителя, в расчете учитывалась эквивалентная теплопроводность $0,052 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$. В различных по расположению помещениях требуются следующие дополнительные объемы, м^3 , минераловатных плит: в здании с остекленностью 0,25 – для помещения рядового промежуточного этажа 0,551/1,532; рядового верхнего этажа 6,320/10,186; углового промежуточного этажа 1,654/4,565; углового верхнего этажа 7,423/13,219; в здании с остекленностью 0,55 – для помещения рядового промежуточного этажа 0,333/0,926; рядового верхнего этажа 6,102/9,580; углового промежуточного этажа 1,436/3,959; углового верхнего этажа 7,205/12,613 (над чертой показан объем утеплителя, м^3 , для варианта утепления здания 2, под чертой – для варианта 3).

Связь стоимости утепления здания с теплопроводностью утеплителя в дальнейшем не учитывалась, так как она многофакторна. Кроме того, так как рассмотрен диапазон стоимости утепления, не учитывалась связь толщины утеплителя с необходимостью усиления его крепления на фасаде здания, вызывающего удорожание утепления. При использовании результатов экономического сравнения, есть возможность выбора значения стоимости, соответствующей конкретному случаю.

Стоимость утепления здания рассматривалась в диапазоне от 9 000 руб./ м^3 до 22 000 руб./ м^3 . В эту цену входят стоимости самого утеплителя, крепежных элементов и монтажа.

Стоимость оборудования системы отопления принималась исходя из анализа реальных проектных смет ряда гражданских зданий [14]. Стоимость системы включает в себя стоимость всех ее элементов: отопительных приборов, запорной и регулирующей арматуры, труб, циркуляционных насосов, сетчатого фильтра, теплообменника, автоматики. Она отнесена к тепловой мощности системы отопления и принята в диапазоне от 15 000 руб./кВт до 100 000 руб./кВт.

Стоимость холодильного оборудования также принята по сметам [15]. Она включает в себя стоимость фанкойлов, труб, запорно-регулирующей арматуры, насосной группы циркуляции воды по трубам и фанкойлам через испаритель холодильной машины при машинном охлаждении и через теплообменник при свободном, насосной группы циркуляции этиленгликоля через драйкулер и конденсатор холодильной машины при машинном охлаждении и через теплообменник – при свободном, холодильной машины, драйкулера, теплообменника, средств автоматики.

Стоимость системы охлаждения также отнесена к холодильной мощности системы охлаждения. Диапазоном принятых к рассмотрению стоимостей охватываются стоимости от 40 000 руб./кВт до 80 000 руб./кВт. То, что верхняя граница стоимости холодильного оборудования ниже верхней границы стоимости системы отопления, объясняется тем, что в офисных зданиях с принятыми теплоизбытками холодильная мощность системы охлаждения больше тепловой мощности системы отопления.

В расчете принята стоимость присоединения объекта к сетям теплоснабжения и электроснабжения. Учтена электроэнергия, идущая на работу циркуляционных насосов отопления, насосов системы охлаждения и компрессора холодильной машины. В Москве стоимость присоединения к теплосети принята от 550 руб./кВт до 50 000 руб./кВт; к электрическим сетям от 550 руб./кВт до 100 000 руб./кВт. Этот разброс цен объясняется объявленной соответствующими энергоснабжающими организациями минимальными стоимостями и дополнительными затратами на оборудование присоединения в зависимости от удаленности от источника и сложности прокладки сети от него до объекта.

Стоимость тепловой энергии принята от 1,81 руб./кВт·ч до 3,5 руб./кВт·ч, а электрической энергии от 3,61 руб./кВт·ч до 5,68 руб./кВт·ч. Цены на электрическую энергию приняты по различным условиям напряженности (низкое, высокое) и тарифа (одноставочного, трехставочного) по данным ОАО «Мосэнергосбыт».

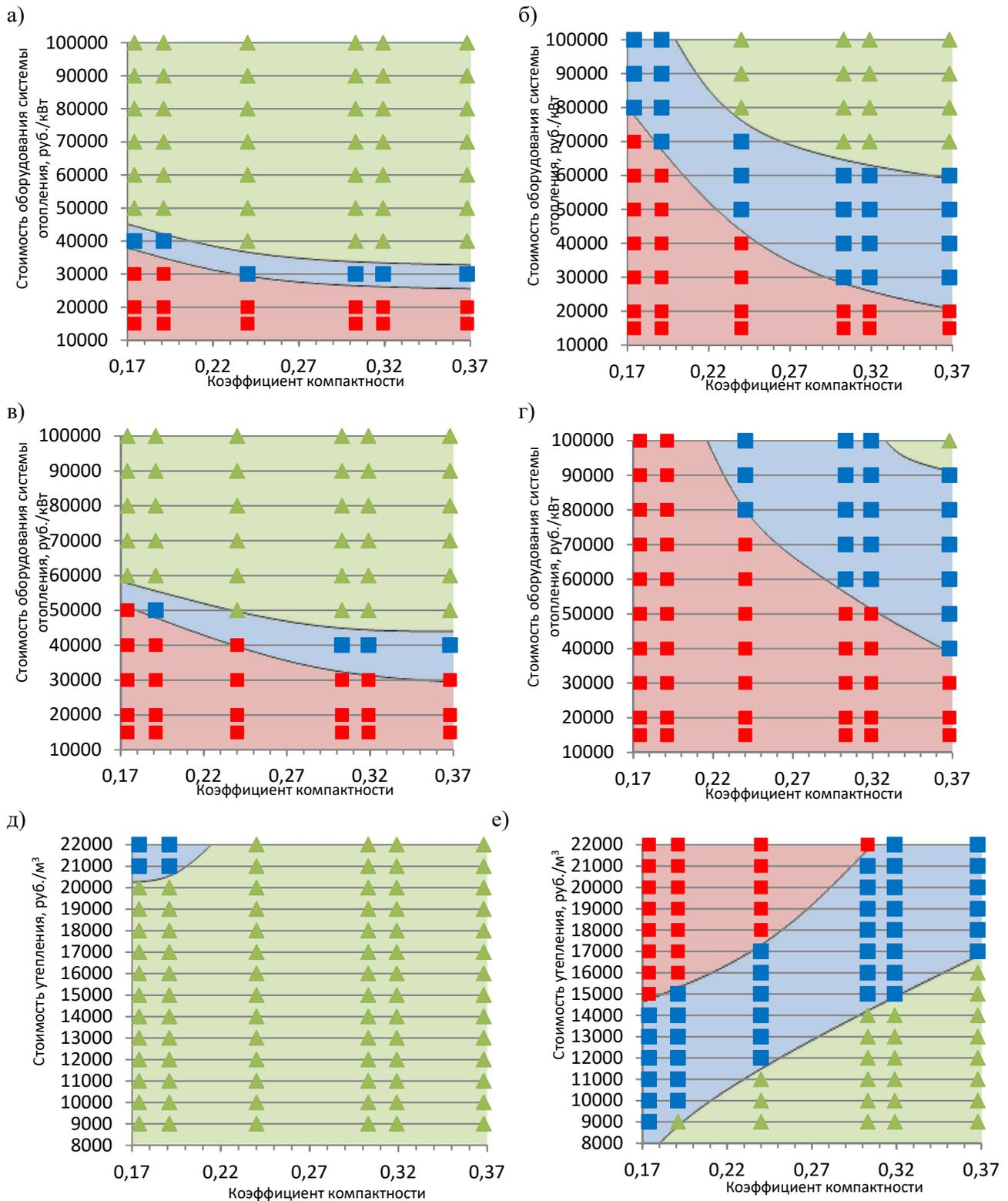


Рис. 1. Экономически целесообразные варианты утепления зданий (красное – вариант 1, синее – вариант 2, зеленое – вариант 3) при изменении: а, б, в, г стоимости оборудования отопления и охлаждения здания при максимальных стоимостях на все остальное, д, е – при изменении стоимости утепления здания при средних стоимостях на все остальное. Здания с остекленностью фасада: а, в, д – 0,25; б, г, е – 0,55; при внутренних теплопоступлениях а, б, д, е – 30 Вт/м²; в, г – 70 Вт/м²

Результаты расчетов. Понятно, что чем выше капитальные или эксплуатационные за-

траты на обслуживание здания, тем больше значение СДЗ. Но так как все компоненты этих за-

трат меняются в разных пределах и влияют на капитальные или эксплуатационные затраты через мощность и годовые затраты энергии, то при одних и тех же значениях цены за один и тот же ресурс, влияние изменения цены каждого ресурса по-разному отражается на окончательном значении СДЗ для здания. СДЗ были рассчитаны на основе данных о мощностях систем отопления и охлаждения зданий и годовом потреблении энергии этими системами, которые приведены в [9].

Для выявления влияния на СДЗ отдельных составляющих стоимостей, входящих в капитальные и эксплуатационные затраты, выбран параметр, в зависимости от которого при определенной остекленности фасада здания обозначаются поля сочетаний отдельной составляющей стоимости и СДЗ при определенных значениях остальных затрат. Этим параметром является коэффициент компактности здания. На рис. 1 а–е ниже приведены примеры таких полей.

Как видно из приведенных графиков для зданий, в которых обслуживающие его системы работают круглый год, увеличение остекленности фасада от 0,25 до 0,55 приводит к увеличению поля выгодного применения утепления здания по варианту 1 (красное поле) – то есть по санитарно-гигиеническим требованиям. Причем, это происходит и при максимальных, и при средних, и при минимальных (не показано) из рассматриваемых диапазонов цен на все. Понятно, что поле выгодного утепления по варианту 3 (зеленое поле), соответствующему табл. 3 СП 50.13330.2012, относится к зданиям с большими значениями коэффициента компактности, т.е. в том числе и малоэтажные здания. Чем дороже утепление здания, тем более выгодно утеплять его по варианту 1, чем дороже стоимость обслуживающих здание систем, тем выгоднее утеплять здание по варианту 3.

Расчеты также показали, что увеличение стоимости на присоединение систем к теплосети и электросети приводит к выгоде утепления по варианту 3, но при минимальных и средних ценах на все остальное имеются большие поля выгодного утепления по вариантам 2 и 1. Возрастание стоимости теплоты и электроэнергии также приводит к выгоде усиления утепления, но при не самых высоких стоимостях всего остального целесообразно утепление по вариантам 2 и 1.

Увеличение теплопоступлений в помещении приводит к выгоде утепления по варианту 1. Это происходит потому, что при отоплении тепловыделения замещают часть отопительной нагрузки, а при охлаждении здания теплоизбытки легче

уходят через менее утепленные стены и большие окна, что отмечалось и в [16].

Выводы. Из вышесказанного ясно, что для зданий, в которых круглогодично поддерживаются требуемые параметры микроклимата, выяснять экономически целесообразный вариант теплозащиты только по сравнению затрат на утепление здания и на его отопление, по меньшей мере, некорректно. Следует учитывать все составляющие капитальных и эксплуатационных затрат.

Анализ совокупных дисконтированных затрат на поддержание заданного микроклимата в офисных помещениях с теплопоступлениями на уровне 30, 50, 70 Вт/м² показал, что увеличение теплопоступлений в помещениях работает на снижение теплозащиты, во-первых, потому, что в отопительный период внутренние теплопоступления покрывают часть теплопотерь, и в большую часть года требуется дорогостоящее охлаждение, во-вторых, так как охлаждение необходимо при температуре наружного воздуха ниже температуры внутреннего, то усиленная теплозащита работает на увеличение холодильной нагрузки. По этой причине в зданиях с большей остекленностью окна помогают «сбрасывать» часть тепловой нагрузки на охлаждение.

При стоимостях, отдельных составляющих капитальных и эксплуатационных затрат, приближающихся к верхней границе рассмотренных интервалов цен, большое число офисных зданий по экономическим соображениям следует утеплять по санитарно-гигиеническим нормам, так как соотношение цен на оборудование и энергоносители в РФ таково, что относительно дешевые энергоносители не могут окупить дорогих утепления, оборудования и присоединения к энергообеспечивающим сетям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tianzhen Hong, Le Yang, David Hill, et al. Data and analytics to inform energy retrofit of high performance buildings, *Applied Energy* 126(2014) 90–106.
2. Orr H., Wang J., Fetsch D., Dumont R. Technical note: Airtightness of older-generation energy-efficient houses in Saskatoon // *Journal of Building Physics*. 2013. Vol. 36. Pp. 294–307.
3. D’Orazio M., Perna C. Di., Giuseppe E. Di., Morodo M... Thermal performance of an insulated roof with reflective insulation: Field tests under hot climatic conditions // *Journal of Building Physics*. 2013. Vol. 36. Pp. 229–246.
4. Asadi S, Hassan M. M., Beheshti A. Performance evaluation of an attic radiant barrier system using threedimensional transient finite element method // *Journal of Building Physics*. 2013. Vol. 36. Pp. 247–264.

5. Cheng Y., Nin J., Gao N. Thermal comfort models: A review and numerical investigation // *Building and Environment*. 2012. Vol. 47. P. 13–22.
6. Alajmi A. Energy audit of an educational building in a hot summer climate // *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 47. P. 122–130.
7. Денисова Ю.В. Выбор эффективного утеплителя в конструкции навесных вентилируемых фасадов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2013. №4. С. 26–30.
8. Семенов А.С. Организация капитального ремонта зданий на основе системного подхода // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. №8. С. 64–66.
9. Петров П.В., Шерстобитов М.С., Резанов Е.М., Ведрученко В.Р. Методика эффективного расчёта утепления наружных ограждающих конструкций стен зданий при проведении капитального ремонта // *Омский научный вестник*. 2016. №6(150). С. 109–113.
10. Псаров С.А., Шумилин Е.В., Зарецкая М.А. Окупаемость энергосберегающих мероприятий в теплопотребляющих системах зданий // *Ученые заметки ТОГУ*. 2013. №4. С. 1628–1633.
11. Косухин М.М., Шарапов О.Н., Богачева М.А., Косухин А.М. Вопросы энергосбережения в условиях устойчивого функционирования, модернизации и развития жилищного фонда // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. №10. С. 51–61.
12. Малявина Е. Г., Фролова А. А. Анализ годового энергопотребления на отопление и охлаждение офисного здания // *АВОК*. 2017. №1. С. 18–23.
13. Самарин О.Д. Вопросы экономики в обеспечении микроклимата зданий. Изд-во АСВ. М., 2011. 128 с.
14. Фролова А.А., Савина А.В., Астанина О.В., Барбарова А.Н. Определение усредненных стоимостных показателей системы отопления. // *Успехи современной науки и образования*. 2016. №12. Том 5. С. 62–64.
15. Малявина Е. Г., Фролова А. А. Экономическое сравнение вариантов перехода на свободное охлаждение кондиционируемых помещений // *Известия вузов. Строительство*. 2013. №4. С. 78–83.
16. Табунщиков Ю.А. О противоречивости требований к теплозащите зданий в летних и зимних условиях // *АВОК*. 2013. №3. С. 48–50.

Malyavina E.G., Frolova A.A.

ENERGY AND ECONOMIC ASSESSMENT OF THERMAL PROTECTION OF AN OFFICE BUILDING

On the building's energy consumption is greatly influenced by heat dissipation in it. When heating teplopostupleniya play a positive role. During the working day, they compensate for some or all of the heat loss. Calculation of non-stationary thermal regime of the premises allows us to trace the changing needs of the room in the heat and cold to maintain the temperature of the room during the working day within the specified limits. The analysis showed that in buildings with significant internal heat in the same day during business hours may require cooling and the outside heating. Cumulated Discount Expenses (CDE) have been chosen to provide economic estimation of the building heating. Values of CDE adopted on the horizon 10 years. Were investigated according to CDE from a number of factors. The result of the study was to determine the scope of combinations of geometrical parameters of buildings insulated and cost characteristics of individual components of capital and operating costs, which can be various insulation of office buildings.

Key words: heating agent price, price of the micro-climate provision systems, price for connection to power lines, power medium price, thermal protection.

Малявина Елена Георгиевна, профессор, кандидат технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.
Адрес: Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.
E-mail: emal@list.ru

Фролова Анастасия Анатольевна, аспирантка кафедры теплогазоснабжения. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.
Адрес: Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.
E-mail: privalova-a@mail.ru