

Формула энергоэффективности

The energy saving formula

к.т.н., доцент Горшков Александр Сергеевич

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
+7 (921) 388 4315; alsgor@yandex.ru
Санкт-Петербург
Российская Федерация

Ph. D., Associate Professor Alexander Sergeevich Gorshkov

Saint-Petersburg State Polytechnical University
+7 (921) 388 4315; alsgor@yandex.ru
Saint-Petersburg
Russian Federation

инженер Немова Дарья Викторовна

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
+7 (921) 890 0267, darya.nemova@gmail.com
Санкт-Петербург
Российская Федерация

Engineer Darya Viktorovna Nemova

Saint-Petersburg State Polytechnical University
+7 (921) 890 0267, darya.nemova@gmail.com
Saint-Petersburg
Russian Federation

д.т.н., профессор Ватин Николай Иванович

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
директор Инженерно-строительного института
+7 (921) 964 3762; vatin@mail.ru
Санкт-Петербург
Российская Федерация

D. Sc, Professor Nikolay Ivanovich Vatin

Saint-Petersburg State Polytechnical University
Director of Institute of Civil Engineering
+7 (921) 964 3762; vatin@mail.ru
Saint-Petersburg
Russian Federation

Ключевые слова: энергосбережение; энергетическая эффективность зданий; здания с низким потреблением тепловой энергии на отопление; здания с потреблением энергии, близким к нулевому; энергопассивные здания; показатель компактности здания; теплоизоляция.

В статье в концептуальной форме рассмотрены основные архитектурно-планировочные, объемно-пространственные и конструктивные решения, направленные на энергосбережение и обеспечение энергетической эффективности жилых зданий.

Для высотных многоквартирных зданий и частных многоквартирных домов эти решения могут отличаться. Рассмотрено как влияют размеры и форма здания, уровень теплоизоляции наружных ограждающих конструкций, а также герметичность наружной оболочки здания на параметры потребляемой в зданиях тепловой энергии на отопление. Представлен сравнительный анализ затрат тепловой энергии на отопление в течение отопительного периода для частного многоквартирного дома, спроектированного согласно минимально-допустимым нормативным требованиям к уровню теплоизоляции по стандартам России и Финляндии.

Показано, что определяющими факторами для обеспечения низкого уровня потребляемой в зданиях тепловой энергии на отопление являются: высокий уровень теплоизоляции наружных ограждающих конструкций (стен, окон, покрытий и др.), герметичность наружной оболочки здания и его компактность (низкий коэффициент компактности).

Key words: energy saving; energy efficiency in buildings; low energy buildings; zero energy buildings; Passive house; building compactness ratio; insulation.

The article presents in conceptual form the basic architectural planning, three-dimensional and constructive solutions to save energy and ensure energy efficiency of residential buildings. It is shown that for a high-rise apartment buildings and private single family houses, these solutions may vary .

The article analyses the effect of the size and shape of the building, the level of thermal insulation of external walling and sealing the outer shell of the building on the parameters of consumption in buildings thermal energy for heating. The article also provides a comparative analysis of the costs of thermal energy for heating during the heating season for a private single-family house, designed according to the minimally acceptable level of regulatory requirements for thermal insulation standards Russia and Finland.

It is shown that the determining factors for a high level of consumption in the buildings heating energy are: a high level of thermal insulation of external building envelope (walls, windows, roofs, etc.), tightness of the outer shell of the building and its compactness (low building compactness ratio).

Введение

В Российской Федерации отсутствуют нормативные требования по теплоизоляции для зданий с низким потреблением энергии, к которым можно отнести дома типа Passive House или Zero Energy Buildings (ZEB) [1-13]. В случае если при проектировании частных малоэтажных домов требуется утверждение проекта в органах строительной экспертизы, к ним предъявляются те же нормативные требования к уровню теплоизоляции наружных ограждающих конструкций, что и для зданий высотных многоквартирных. Однако, как показывает практика, из-за более развитой поверхности и меньшей компактности малоэтажных домов, удельные потери тепловой энергии в них оказываются выше удельных потерь тепловой энергии в многоквартирных домах, несмотря на близкий уровень теплоизоляции наружных ограждающих конструкций (стен, окон, покрытий и т.д.) и одинаковый перечень применяемых строительных материалов, а также конструктивных решений для ограждающих конструкций. Помимо размеров зданий на потери тепловой энергии в них существенную роль оказывают форма здания, параметры теплоизоляции (тепловой защиты) ограждающих конструкций, герметичность (воздухонепроницаемость) оболочки здания, оснащённость здания энергосберегающими инженерными системами.

В рамках данного исследования рассмотрено влияние архитектурно-планировочных, объемно-пространственных и конструктивных решений на параметры потребляемой в зданиях тепловой энергии на отопление.

1. Влияние размеров и формы здания на параметры его энергопотребления

Как уже было сказано выше, при одинаковом уровне теплоизоляции наружных ограждающих конструкций, для двух одинаковых по форме зданий, расположенных на местности с одинаковыми климатическими условиями, но отличающихся по этажности, строительному объему и площади, для здания с большим объемом удельные (приведенные на 1 м^2 площади или на 1 м^3 строительного объема) затраты тепловой энергии будут меньше (а при значительной разнице в строительных объемах двух идентичных по форме и уровню теплоизоляции зданий - существенно меньше) удельных затрат тепловой энергии здания с меньшим строительным объемом. Обусловлено это тем, что для здания с меньшим строительным объемом, отношение площади наружных ограждений к строительному объему (коэффициент компактности) окажется выше по сравнению со зданием с большим строительным объемом. Малоэтажные здания менее компактны по сравнению с многоквартирными высотными и поэтому их удельные (отнесенные к 1 м^2 площади или 1 м^3 строительного объема) затраты тепловой энергии больше. Рассмотрим это на следующем примере.

Представим себе одноэтажный частный дом (на рисунке 1 показано слева, - вид сверху). Он теряет тепло через четыре наружных фасада (с учетом наличия в стенах окон и наружных дверей), кровельное покрытие, полы, а также за счет нагрева поступающего при проветривании холодного воздуха с улицы. «Пристроим» к нему теперь, например, справа, еще одно идентичное по форме и объему здание (рисунок 1).

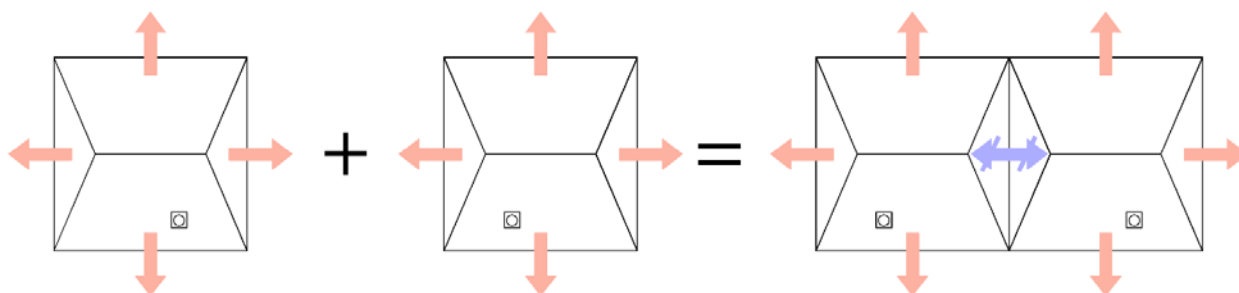


Рисунок 1. Схема снижения потерь тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции при блокировании двух одноэтажных домов

Как видно из схемы, представленной на рисунке 1, в сдвоенном (сблокированном при стыковке) здании будут отсутствовать трансмиссионные потери через правый фасад здания, расположенного слева на рисунке 1 и левый фасад здания, расположенного справа на рисунке 1. Таким образом, для нового сблочированного здания (по сравнению с двумя отдельно стоящими домами) будут отсутствовать трансмиссионные потери тепловой энергии через два фасада. При этом его строительный объем и площадь будут равны сумме строительных объемов и площадей двух отдельно стоящих домов, расположенных в левой части уравнения на рисунке 1.

Присоединим теперь к этому сблочированному дому еще точно такой же сблочированный дом, как схематично показано на рисунке 2.

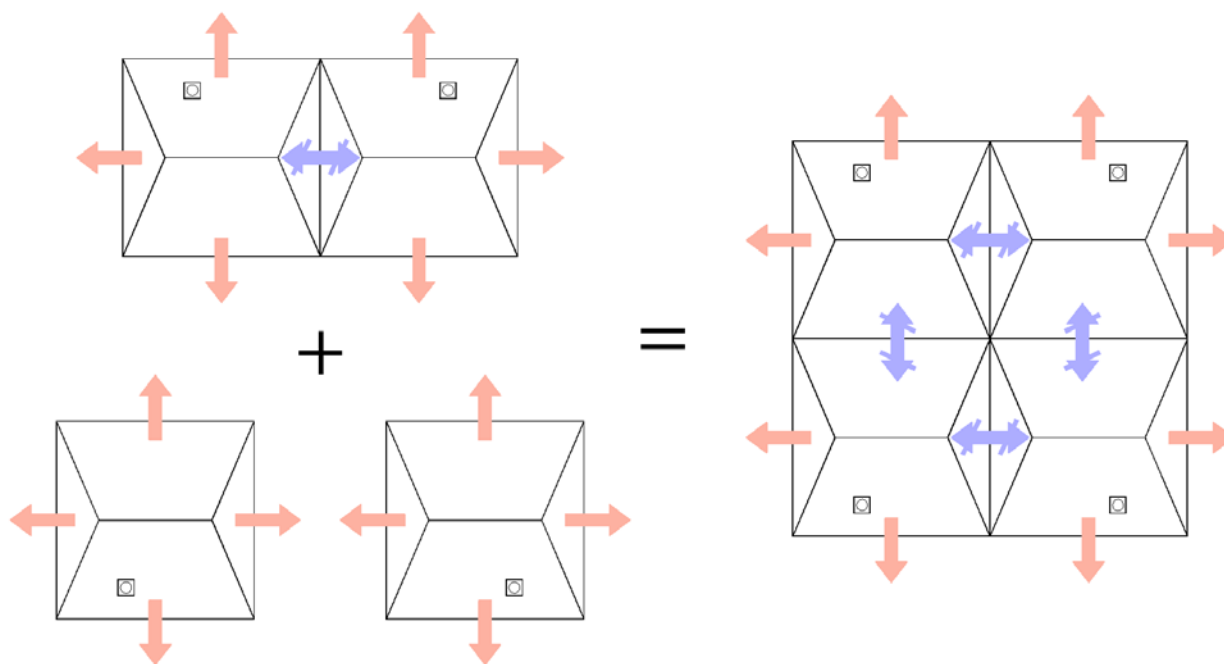


Рисунок 2. Схема снижения потерь тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции при блокировании четырех малоэтажных домов

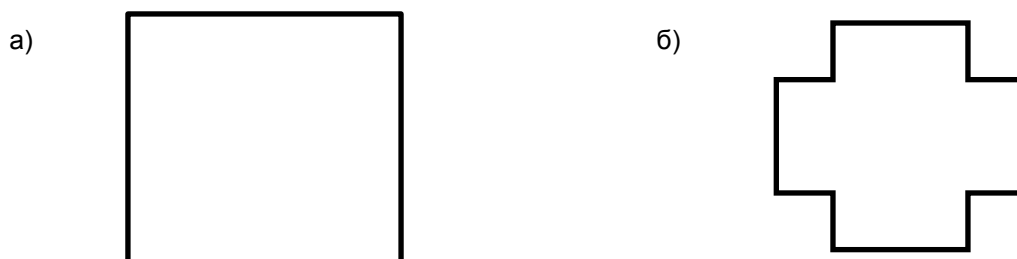
Из схемы, представленной на рисунке 2, можно наблюдать, что в этом случае будут отсутствовать потери тепловой энергии уже через 8 фасадов.

Если сверху к показанному на рисунке 2 сблочированному из четырех фрагментов одноэтажному дому пристроить точно такой же этаж сверху, то в новом двухэтажном здании трансмиссионные потери тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции снизятся за счет уменьшения потерь тепловой энергии через покрытие первого (нижнего) этажа и полы второго (верхнего) этажа. И так далее.

Отсюда становится понятным почему при одинаковой форме здания и абсолютно одинаковом уровне теплоизоляции наружных ограждающих конструкций (стен, окон, покрытий, дверей и т.д.),

удельные потери тепловой энергии здания с большим строительным оказываются меньше по сравнению со зданиями с меньшим строительным объемом.

Другим способом уменьшения удельных затрат тепловой энергии здания является создание архитектурного его облика с минимумом выступающих частей. Все выступающие части здания, как например, эркеры, ниши, ризалиты, пилястры, апсиды, сандрики, выносные плиты и др., увеличивают отношение площади поверхности наружных ограждающих конструкций к строительному объему здания и тем самым увеличивают расход тепловой энергии на отопление в течение отопительного периода. На рисунке 3 показаны планы двух зданий равных по площади и строительному объему, но различной конфигурации в плане: на рисунке 3 а - с квадратной в плане конфигурацией, на рисунке 3 б - в форме креста.



**Рисунок 3. Планы двух одинаковых по площади и строительному объему зданий:
а – с квадратной в плане конфигурацией;
б – с конфигурацией здания в форме креста**

Расчеты показывают, что при определенной, одинаковой для двух выбранных конфигураций, высоте зданий и одинаковом уровне теплоизоляции наружных ограждающих конструкций двух рассматриваемых зданий различной конфигурации, трансмиссионные потери тепловой энергии через оболочку здания, представленного на рисунке 3 б, из-за более развитой поверхности теплоотдачи могут оказаться до 20 % выше по сравнению с зданием, конфигурация которого представлена на рисунке 3 а.

Это не означает, что следует возводить здания только квадратной, прямоугольной или какой-либо другой более компактной формы, без эркеров, ризалитов и иных выступающих архитектурных деталей. Это означает, что при недостаточной компактности здания или при его более развитой поверхности ввиду необходимости подчеркивания его выдающегося архитектурного облика, для обеспечения требуемого уровня энергопотребления проектируемого здания, дополнительные потери тепла, связанные с этими обстоятельствами, необходимо компенсировать, в том числе за счет выбора ограждающих конструкций с более высоким уровнем теплоизоляции [14].

Основными архитектурно-планировочными и объемно-пространственными решениями, направленными на энергосбережение, являются:

- выбор оптимальной формы зданий, характеризующейся пониженным коэффициентом компактности и обеспечивающей минимальные теплопотери в зимний период и минимальные теплопоступления в летний период года;
- выбор оптимальной ориентации зданий по сторонам света с учетом господствующего направления ветра в зимний период с целью нейтрализации отрицательного воздействия климата на здания и его тепловой баланс;
- применение ветрозащитных зданий в форме обтекаемой дуги с радиусом кривизны не менее шести высот здания или в виде обтекаемой скобки (с углами поворота не менее двух) при разных диапазонах румбов ветра;
- сокращение площади наружных ограждающих конструкций путем уменьшения периметра наружных стен за счет отказа от изрезанности фасадов, выступов, западов и т.п. «архитектурных проемов»;
- устройство мансардных этажей на существующих зданиях из легких ограждающих конструкций с повышенными теплозащитными свойствами;
- максимальное остекление южных фасадов и минимальное остекление северных фасадов зданий;
- применение светопрозрачных наружных ограждающих конструкций с повышенными теплозащитными характеристиками;
- установка дополнительных тамбуров при входах в здание;

- установка доводчиков входных дверей;
- максимальное использование естественного освещения помещений для снижения затрат электрической энергии;
- эффективное использование площади и объема здания, четкая функциональная связь помещений без излишних коридоров, холлов и темных помещений.

2. Влияние теплозащитных свойств ограждающих конструкций на параметры энергопотребления в здании

В пункте 1 статьи было показано, как влияют размеры и форма здания на потери им тепловой энергии на отопление. Было обосновано утверждение о том, что чем меньше размеры здания, тем выше в нем оказываются удельные затраты тепловой энергии при одинаковой форме и при одном и том же уровне теплоизоляции наружных ограждающих конструкций. Отсюда вытекает важный вывод о том, что в малоэтажных домах эти дополнительные потери тепла следует как-то компенсировать. Наиболее целесообразно это сделать, повышая, например, уровень тепловой защиты оболочки (наружных ограждающих конструкций) здания. Тогда при определенном, более высоком значении уровня теплоизоляции наружных ограждающих конструкций, для здания меньших размеров можно добиться соизмеримого уровня удельных затрат тепловой энергии по сравнению со зданиями с большим размером (строительным объемом). Т.е. для зданий меньших размеров (малоэтажных) требования к уровню тепловой защиты наружных ограждающих конструкций следует принимать выше, чем для зданий более значительных размеров (в основном, высотных многоквартирных).

Рассмотрим, как влияет уровень тепловой защиты (теплоизоляции) наружных ограждающих конструкций частного загородного дома на потери в нем тепловой энергии на отопление в течение отопительного периода.

Постановка задачи

Потери тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции здания (так называемые, трансмиссионные потери тепловой энергии) являются наиболее значительными в структуре затрат тепловой энергии на его отопление. Для восполнения потерь тепловой энергии к зданию необходимо подвести тепло, т.е. подключить его к системе теплоснабжения. Чем выше уровень теплоизоляции наружных ограждающих конструкций, тем меньшими оказываются потери тепловой энергии в здании через оболочку. Чем меньше потери тепловой энергии через оболочку здания, тем меньше энергии требуется подвести к зданию, и тем, соответственно, меньшими окажутся платежи жителей эксплуатируемого здания за отопление.

Потери тепловой энергии напрямую зависят от уровня теплоизоляции наружных ограждающих конструкций (стен, окон и балконных дверей, наружных дверей, полов по грунту, покрытий). Во всех странах существуют нормативные требования к уровню теплоизоляции (в терминах стандарта, принятого на территории Российской Федерации – к приведенному сопротивлению теплопередаче) наружных ограждающих конструкций, которые отличаются в зависимости от климатических условий страны и ее государственной политики в области энергосбережения. В связи с постоянным ростом цен на энергетические ресурсы, а также сокращением невозобновляемых ресурсов (нефти, газа), в большинстве развитых стран мира нормативы потребления зданиями энергии постоянно уменьшаются, а требования к уровню теплоизоляции ограждающих конструкций – повышаются.

В России в части нормирования требований к уровню теплоизоляции наружных ограждающих конструкций с 1 июля 2013 года действует СП 50.13330.2012 (Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003) [15]. В Финляндии, – стране, наиболее близкой по климатическим условиям к климату Ленинградской области, действует стандарт National Building Code of Finland, Part D3 [16]. Несмотря на близость расчетных климатических условий, требования к уровню теплоизоляции наружных ограждающих конструкций в этих стандартах значительно различаются (см. данные таблицы 1).

Таблица 1. Минимальные требования к уровню тепловой защиты наружных ограждающих конструкций жилого дома согласно нормативным требованиям различных стандартов

Тип наружной ограждающей конструкции	Минимально-допустимые значения сопротивлений теплопередаче наружных ограждающих конструкций R_0^{TP} , $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, рассчитанные по стандартам:	
	СП 50.13330 $R_{СП}^{TP}$, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$	National Building Code of Finland, Part D3, $R_{D3}^{TP ***}$, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$
Наружные стены	2,04	5,88
Окна	0,43	1,0
Входные наружные двери	0,79	1,0
Совмещенное покрытие	3,85	11,11
Полы по грунту	2,82**	6,25

Примечания:

* Минимально-допустимые значения сопротивлений теплопередаче по СП 50.13330 приняты в соответствии с данными п. 5.2 [15], допускающего уменьшение нормируемого значения сопротивления теплопередаче стен на 37 % (с понижающим коэффициентом 0,63 относительно нормируемого уровня), остальных ограждающих конструкций – на 20 % (с понижающим коэффициентом 0,8).

** В СП 50.13330 сопротивление теплопередаче полов по грунту не нормируется. В таблице 1 принято расчетное значение сопротивления теплопередаче полов (2,82 $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$), рассчитанное методом разбивки полов в здании по зонам согласно методике Приложения Я СП 23-101-2004 [17].

*** В стандартах европейских стран нормируется не сопротивление теплопередаче R , а обратная ей величина, - так называемая величина U -value, принимаемая равной $U=1/R$. Например, в стандарте National Building Code of Finland, Part D3 [16], нормируемое значение величины U для стен составляет 0,17 $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$. Соответственно, обратная ему величина $R=1/U=1/0,17=5,88 m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, что и отражено в таблице 1. Аналогичным образом рассчитаны сопротивления теплопередаче для других типов ограждающих конструкций (окон, покрытия, дверей и т.д.).

Рассмотрим, как влияет на структуру потерь тепловой энергии через оболочку здания степень утепления его наружных ограждающих конструкций. С этой целью произведем расчет трансмиссионных потерь тепловой энергии (теплопотерь через наружные ограждающие конструкции, – стены, окна, входные наружные двери, покрытие и т.д.) для частного загородного дома, в течение отопительного периода, приняв минимальные требования к уровню тепловой защиты наружных ограждающих конструкций согласно представленным в таблице 1 стандартам разных стран.

Для расчета потерь зданием тепловой энергии через оболочку (наружные ограждающие конструкции) рассматриваемого здания используем следующие исходные данные.

Исходные данные для расчета

Расчетные климатические и теплоэнергетические параметры Ленинградской области приняты согласно СП 131.13330 [18] и представлены в таблице 2.

Таблица 2. Расчетные условия для жилой части здания

Показатель	Обозначение параметра	Единица измерения	Расчетное значение
Расчетная температура наружного воздуха	t_n	$^\circ C$	- 29
Средняя температура наружного воздуха за отопительный период	$t_{от}$	$^\circ C$	- 2,9
Продолжительность отопительного периода	$z_{от}$	сут/год	228
Градусо-сутки отопительного периода	ГСОП	$^\circ C \cdot сут/год$	5221
Расчетная температура внутреннего воздуха	t_b	$^\circ C$	20

Площади наружных ограждающих конструкций отапливаемого объема рассматриваемого дома представлены в таблице 3.

Таблица 3. Площади наружных ограждающих конструкций здания

Тип наружной ограждающей конструкции	Площадь конструкции $A_i, \text{м}^2$
Наружные стены - $A_{\text{ст}}$	207,3
Окна, включая мансардные - $A_{\text{ок}}$	75,8
Входные наружные двери - $A_{\text{дв}}$	5,4
Совмещенное покрытие (без учета площади свесов) - $A_{\text{покр}}$	156,0
Полы по грунту - $A_{\text{пол}}$	144,0
Суммарная площадь наружных ограждающих конструкций отапливаемого объема здания - $A_{\text{н}}^{\text{сум}}$	588,5

На основании полученных исходных данных произведем расчет трансмиссионных потерь тепловой энергии, используя минимальные требования к уровню теплоизоляции из различных стандартов (см. данные таблицы 1).

Расчет потерь тепловой энергии на отопление

Расчет трансмиссионных потерь тепловой энергии на отопление $Q_{\text{огр}}^{\Gamma}$, кВт·ч/год, за отопительный период произведем по формуле:

$$Q_{\text{огр}}^{\Gamma} = 0,024 \cdot \text{ГСОП} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{R_i} \quad (1)$$

где 0,024 – переводной коэффициент потерь тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции из Вт·сут в кВт·ч (1 сут = 24 ч, 1 Вт = 0,001 кВт, 1 Вт·сут = 0,024 кВт·ч);

ГСОП – градусо-сутки отопительного периода; 5221 °С·сут/год (см. данные таблицы 2);

A_i – площадь i -го типа наружных ограждающих конструкций (стен, окон, покрытия и т.д.), принимаемая для рассматриваемого дома по таблице 3;

R_i – приведенное сопротивление теплопередаче i -го типа наружной ограждающей конструкции, принятого равным минимально-допустимому, – $R_{0i}^{\text{ТР}}$, м²·°С/Вт, из таблицы 1 в зависимости от группы требований по различным нормативам к уровню тепловой защиты, – по СП 50.13330 ($R_{\text{СП}}^{\text{ТР}}$) [15], по National Building Code of Finland, Part D3 ($R_{\text{D3}}^{\text{ТР}}$) [16] соответственно.

Рассчитаем по формуле (1) для рассматриваемого многоквартирного жилого дома потери тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции за отопительный период.

Получим:

- по СП 50.13330 – $Q_{\text{огр(СП)}}^{\Gamma}$, кВт·ч/год:

$$\begin{aligned} Q_{\text{огр(СП)}}^{\Gamma} &= 0,024 \cdot \text{ГСОП} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{R_{i(\text{СП})}^{\text{ТР}}} = \\ &= 0,024 \cdot 5221 \cdot \left(\frac{A_{\text{ст}}}{R_{\text{ст(СП)}}^{\text{ТР}}} + \frac{A_{\text{ок}}}{R_{\text{ок(СП)}}^{\text{ТР}}} + \frac{A_{\text{дв}}}{R_{\text{дв(СП)}}^{\text{ТР}}} + \frac{A_{\text{покр}}}{R_{\text{покр(СП)}}^{\text{ТР}}} + \frac{A_{\text{пол}}}{R_{\text{пол(СП)}}^{\text{ТР}}} \right) = \\ &= 0,024 \cdot 5221 \cdot \left(\frac{207,3}{2,04} + \frac{75,8}{0,43} + \frac{5,4}{0,79} + \frac{156}{3,85} + \frac{144}{2,82} \right) = 47\,154 \text{ (кВт} \cdot \text{ч/год)}; \end{aligned}$$

- по стандарту National Building Code of Finland, Part D3 – $Q_{\text{огр(D3)}}^{\Gamma}$, кВт·ч/год:

$$\begin{aligned} Q_{\text{огр(D3)}}^{\Gamma} &= 0,024 \cdot \text{ГСОП} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{R_{i(\text{D3})}^{\text{ТР}}} = \\ &= 0,024 \cdot 5221 \cdot \left(\frac{A_{\text{ст}}}{R_{\text{ст(D3)}}^{\text{ТР}}} + \frac{A_{\text{ок}}}{R_{\text{ок(D3)}}^{\text{ТР}}} + \frac{A_{\text{дв}}}{R_{\text{дв(D3)}}^{\text{ТР}}} + \frac{A_{\text{покр}}}{R_{\text{покр(D3)}}^{\text{ТР}}} + \frac{A_{\text{пол}}}{R_{\text{пол(D3)}}^{\text{ТР}}} \right) = \end{aligned}$$

$$= 0,024 \cdot 5221 \cdot \left(\frac{207,3}{5,88} + \frac{75,8}{1,0} + \frac{5,4}{1,0} + \frac{156}{11,11} + \frac{144}{6,25} \right) = 19\,239 \text{ (кВт} \cdot \text{ч/год)}.$$

Из представленных выше расчетов видно, что потери тепловой энергии через оболочку дома, построенного по минимальным требованиям к уровню теплоизоляции наружных ограждающих конструкций по финскому стандарту [16] окажутся в 2,5 раза меньше по сравнению со зданием, запроектированным согласно минимальным требованиям из российского стандарта (СП 50.13330 [15]).

Результаты расчета в различных единицах измерения тепловой энергии сведены в таблице 4.

Таблица 4. Годовой расход потерь тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции здания за отопительный период в зависимости от минимальных требований к уровню тепловой защиты ограждающих конструкций

Результаты расчета по стандарту	Годовой расход тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции (трансмиссионные потери тепловой энергии)		
	кВт·ч/год	МДж/год*	Гкал/год**
СП 50.13330	47 154	169 754	40,6
National Building Code of Finland, Part D3	19 239	69 260	16,5

Примечания:
 * Расход тепловой энергии в МДж/год вычислен исходя из следующего соотношения:
 1 кВт·ч /год = 3,6 МДж/год.
 ** Расход тепловой энергии в Гкал/год вычислен исходя из следующего соотношения:
 1 кВт·ч /год = $86 \cdot 10^{-5}$ Гкал/год.

При известной стоимости тепловой энергии, для конкретного региона или населенного пункта можно рассчитать стоимость эксплуатационных затрат рассматриваемого здания на отопление в течение отопительного периода, а с учетом роста тарифов на тепловую энергию, можно спрогнозировать затраты на эксплуатацию этого здания в течение 10, 30 и т.д. лет эксплуатации [19].

3. Влияние герметичности оболочки здания на параметры его энергопотребления

Итак, чем выше уровень теплоизоляции наружных ограждающих конструкций, тем ниже потери тепловой энергии через оболочку здания и тем меньше эксплуатационные расходы на его отопление.

Рассмотренные в пункте 2 статьи потери тепловой энергии через оболочку здания (так называемые трансмиссионные теплопотери) обусловлены разностью температур на внутренней и наружной сторонах его наружного ограждения. Чем выше эффективность применяемых в составе ограждающей конструкции материалов (меньше коэффициент их теплопроводности) и чем больше толщина ограждения или соответствующих теплоизоляционных его слоев, тем меньшими оказываются трансмиссионные потери тепловой энергии.

Однако помимо трансмиссионных потерь тепловой энергии в ограждениях возможны также так называемые инфильтрационные утечки тепла.

Большинство строительных материалов и конструкций из них являются воздухопроницаемыми. При разности давлений воздуха с наружной и внутренней сторон ограждения, через толщу ограждения может проникать воздух. Разность давлений воздуха может возникнуть или под влиянием разности температур внутреннего воздуха в здании и наружного воздуха (тепловой напор), или под влиянием ветра (ветровой напор). Если фильтрация происходит в направлении от наружного воздуха (с улицы) в помещение, то она называется инфильтрацией, при обратном направлении – эксфильтрацией. Свойство ограждения пропускать воздух называется воздухопроницаемостью.

С теплотехнической точки зрения воздухопроницаемость ограждений вносит отрицательное влияние на тепловой режим здания, т.к. в зимнее время инфильтрация вызывает дополнительные потери теплоты ограждениями и охлаждение помещений, а эксфильтрация может неблагоприятно отразиться на влажностном режиме наружных ограждений, способствуя конденсации в них влаги. Чем выше здание, тем влияние воздухопроницаемости ограждающих конструкций сказывается сильнее на его тепловом режиме.

Кроме того, воздухонепроницаемость (герметичность) ограждающих конструкций очень важна для зданий, оборудованных приточно-принудительными системами вентиляции с рекуперацией тепла вытяжного воздуха. Чем выше герметичность ограждающих конструкций, тем эффективнее оказывается регулирование в механической системе вентиляции здания и тем эффективнее (с более высоким КПД) работают рекуперационные устройства. Именно по этой причине в СП 50.13330 вводится требование (п. 10.2 [15]), согласно которому для достижения нормируемого значения удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, средняя воздухопроницаемость квартир жилых и помещений общественных зданий (при закрытых приточно-вытяжных вентиляционных отверстиях) должна обеспечивать, определяемый по ГОСТ 31167 [20], воздухообмен кратностью, n_{50} , ч⁻¹, при разности давлений наружного и внутреннего воздуха 50 Па при вентиляции:

- с естественным побуждением $n_{50} \leq 4$ ч⁻¹;
- с механическим побуждением $n_{50} \leq 2$ ч⁻¹,

т.е. для зданий оборудованных системой вентиляции с механическим побуждением предъявляются более жесткие требования по воздухонепроницаемости (герметичности) оболочки (наружных ограждающих конструкций) здания.

Аналогичные требования содержатся в европейских нормативных документах.

Без учета инфильтрации коэффициент теплопередачи ограждения $k_{тр}$, Вт/(м²·°С) может быть рассчитан по формуле [21]:

$$k = \frac{1}{R_0}, \quad (2)$$

где R_0 – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м²·°С/Вт.

С учетом инфильтрации величину коэффициента теплопередаче следует рассчитывать по формуле [14]:

$$k = \frac{c \cdot W \cdot \exp[c \cdot W \cdot R_0]}{\exp[c \cdot W \cdot R_0] - 1}, \quad (3)$$

где c – удельная теплоемкость воздуха, принимаемая равной 1,005 кДж/(кг·°С);

W – воздухопроницаемость или плотность потока воздуха, проникающего через 1 м² слоя материала при ламинарном движении воздуха в его порах в течение 1 ч, кг/(м²·ч);

R_0 – то же, что и в формуле (2), м²·°С/Вт.

В монографии [21] представлен пример расчета влияния воздухопроницаемости кирпичной стены старого здания толщиной в 2 кирпича (510 мм) на величину потерь тепловой энергии через наружное ограждение. Показано, что при отсутствии инфильтрации воздуха, коэффициент теплопередачи рассматриваемой ограждающей конструкции составляет 1,27 Вт/м²·°С, а при наличии инфильтрации для той же конструкции стены составляет уже 1,52 Вт/м²·°С, т.е. на 19% больше значения, рассчитанного без учета инфильтрации. Дополнительные потери тепловой энергии за счет инфильтрации необходимо компенсировать путем повышенной подачи в здание тепловой энергии.

4. Методика расчета потерь тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции в здании

Для расчета потерь тепла через наружные ограждающие конструкции здания (стены, окна, покрытие и т.п.) удобно пользоваться величиной, обратной приведенному сопротивлению теплопередаче, которая в зарубежных стандартах называется коэффициентом теплопередачи (*U-value*) ограждающих конструкций зданий и обозначается литерой *U*. Величина коэффициента теплопередачи рассчитывается по формуле:

$$U - value = \frac{1}{R_0}, \quad (4)$$

где R_0 – то же, что и в формуле (2), м²·°С/Вт (в стандартах иностранных государств можно встретить следующее обозначение этой величины, - *R-value*).

Целесообразность введения данной величины (*U-value*) для теплотехнических расчетов определяется удобством ее размерности: Вт/ м²·°С. Т.е. эта величина показывает, сколько *Вт* тепловой энергии проходит через наружную стену площадью 1 м² при разности внутренней и наружной температур с разных сторон ограждающей конструкции 1 °С. Это значит, например, что при $R_0 = 1$ Вт/ м²·°С (в этом

случае $U = 1/R_0 = 1/1 = 1$ Вт/м²·°С) через стену площадью 1 м² и разности температур с разных ее сторон 1 °С мощность теплового излучения составляет 1 Вт, а при разности 20 °С будет составлять 20 Вт и т.д. Для расчета количества тепловой энергии (кВт·ч), проходящей через 1 м² наружной стены эту величину (*U-value*) нужно умножить на число часов отопительного периода и среднюю за отопительный период разность температур. Эти данные для каждого климатического района определены в СП 131.13330 [18]. Например, для объекта строительства, расположенного в Ленинградской области с учетом данных таблицы 2 получим, что суммарные потери тепловой энергии через 1 м² наружной стены при величине коэффициента теплопередачи $U=1$ Вт/м²·°С можно вычислить по формуле:

$$Q_{\text{кВт}\cdot\text{ч}} = \frac{U \cdot (t_{\text{int}} - t_{\text{ht}}) \cdot z_{\text{ht}} \cdot 24}{1000}, \quad (5)$$

где t_{int} – температура внутреннего воздуха в помещениях жилого здания, принимаемая согласно ГОСТ 30494 [8] равной 20 °С;

t_{ht} – средняя за отопительный период температура наружного воздуха, принимаемая для климатических условий Ленинградской области по СП 131.13330 [18] равной -2,9 °С;

z_{ht} – количество суток отопительного периода, принимаемой для жилых зданий, построенных или проектируемых в Санкт-Петербурге равным 228 сут;

24 – количество часов в сутках;

1000 – переводной коэффициент мощности теплового потока из Вт в кВт.

Таким образом, используя формулу (5) мы можем рассчитать средние за отопительный период потери тепловой энергии через 1 м², выраженные в кВт·ч. Эту же величину можно выразить в гигакалориях (Гкал), если разделить выражение (5) на 1163, т.к. 1 Гкал=1162,(7) кВт·ч. Расчет потерь тепловой энергии в Гкал удобнее пользоваться по той причине, что стоимость тепловой энергии для потребителей, подключенным к системе центрального отопления (так называемый тариф на тепловую энергию), рассчитывается в руб/Гкал. Тогда формула (5) может быть записана в виде:

$$Q_{\text{Гкал}} = \frac{U \cdot (t_{\text{int}} - t_{\text{ht}}) \cdot z_{\text{ht}} \cdot 24}{1000 \cdot 1163}. \quad (6)$$

Здесь обозначения те же, что и в формуле (5), 1163 – переводной коэффициент из кВт·ч в Гкал.

Пример 1. Рассчитаем средние за отопительный период потери тепловой энергии через 1 м² наружной стены жилого здания, эксплуатируемого на территории Ленинградской области, при величине коэффициента теплопередачи $U=1$ Вт/м²·°С.

Подставим в формулы (5) и (6) значения величин $t_{\text{int}}, t_{\text{ht}}, z_{\text{ht}}$ из таблицы 2. Получим:

$$Q_{\text{кВт}\cdot\text{ч}} = \frac{U \cdot (t_{\text{int}} - t_{\text{ht}}) \cdot z_{\text{ht}} \cdot 24}{1000} = \frac{1 \cdot (20 - (-2,9)) \cdot 228 \cdot 24}{1000} \approx 125 \text{ (кВт}\cdot\text{ч)};$$

$$Q_{\text{Гкал}} = \frac{U \cdot (t_{\text{int}} - t_{\text{ht}}) \cdot z_{\text{ht}} \cdot 24}{1000 \cdot 1163} = \frac{1 \cdot (20 - (-2,9)) \cdot 228 \cdot 24}{1000 \cdot 1163} \approx 0,108 \text{ (Гкал)}.$$

Для расчета суммарных потерь тепловой энергии через наружные стены конкретного здания, необходимо полученные значения удельных потерь тепла умножить на суммарную площадь наружных стен. Если аналогичные расчеты выполнить для остальных наружных ограждающих конструкций здания (покрытие, окна, наружные двери и т.д.) и просуммировать полученные результаты, то таким образом можно получить данные о величине суммарных трансмиссионных потерь тепловой энергии через оболочку всего здания в течение отопительного периода. Аналогичные расчеты можно выполнить для любого другого периода, например, для расчета месячного уровня энергопотребления.

Следует отметить, что выражение вида $(t_{\text{int}} - t_{\text{ht}}) \cdot z_{\text{ht}}$ в формулах (5) и (6) в СП 50.13330 [15] обозначает величину градусо-суток отопительного периода (обозначаемую, как D_d или ГСОП).

Таким образом, формулы (5) и (6) можно привести к более удобному виду:

$$Q_{\text{кВт}\cdot\text{ч}} = \frac{U \cdot (t_{\text{int}} - t_{\text{ht}}) \cdot z_{\text{ht}} \cdot 24}{1000} = \frac{U \cdot \text{ГСОП} \cdot 24}{1000} = 0,024 \cdot U \cdot \text{ГСОП}; \quad (7)$$

$$Q_{\text{Гкал}} = \frac{U \cdot (t_{\text{int}} - t_{\text{ht}}) \cdot z_{\text{ht}} \cdot 24}{1000 \cdot 1163} = \frac{U \cdot \text{ГСОП} \cdot 24}{1000 \cdot 1163} = \frac{0,024 \cdot U \cdot \text{ГСОП}}{1163}. \quad (8)$$

Здесь обозначения те же, что и в формулах (5) и (6).

Во всех европейских странах при выборе требуемого уровня тепловой защиты наружных ограждающих конструкций нормируется не требуемое сопротивление теплопередаче, а именно максимально-допустимая величина коэффициента теплопередачи $U_{i(max)}$. В таблице 5 приведены максимально-допустимые величины коэффициентов теплопередачи $U_{i(max)}$ для различных наружных ограждающих конструкций зданий, проектируемых на территории Финляндии и отапливаемых в полном объеме в течение отопительного периода (согласно требованиям п. 2.5.4 [16] стандарта Финляндии National Building Code of Finland, Part D3).

При проектировании наружных ограждающих конструкций задачей проектной организации является выбор наружного ограждения, величина коэффициента теплопередачи которого U_i , должна быть ниже максимально-допустимой величины, представленной в таблице 5.

Согласно стандарта Финляндии National Building Code of Finland, Part D3 (п. 2.5.3 [16]), суммарные трансмиссионные потери тепловой энергии (потери тепла через оболочку) в здании $H_{тр}$, Вт/К, рассчитываются по формуле:

$$\sum H_{тр} = \sum(U_{ст} \cdot A_{ст}) + \sum(U_{в.перекр} \cdot A_{в.перекр}) + \sum(U_{н.перекр} \cdot A_{н.перекр}) + \sum(U_{ок} \cdot A_{ок}) + \sum(U_{дв} \cdot A_{дв}), \quad (9)$$

где $U_{ст}, U_{в.перекр}, U_{н.перекр}, U_{ок}, U_{дв}$ – проектные значения коэффициентов теплопередачи соответственно наружных стен, верхнего перекрытия (покрытия, чердачного перекрытия с холодным чердаком), нижнего перекрытия (полов по грунту, перекрытий над неотапливаемым подвалом, перекрытий над проветриваемым подпольем), окон, наружных дверей здания, Вт/м²·К;

$A_{ст}, A_{в.перекр}, A_{н.перекр}, A_{ок}, A_{дв}$ – численные значения площадей наружных ограждающих конструкций отапливаемого объема здания, м².

Таблица 5. Максимально-допустимые величины коэффициента теплопередаче $U_{i(max)}$, Вт/м²·К, для различных типов наружных ограждающих конструкций

Тип ограждающей конструкции	Максимально-допустимое значение коэффициента теплопередачи $U_{i(max)}$, Вт/м ² ·К
Наружная стена	0,17
Покрытие, чердачное перекрытие	0,09
Нижнее перекрытие	0,17/0,16
Окно в наружной стене, окно мансардное, наружная дверь	1,0

Таблица 6. Типы зданий и нормы потребляемой энергии для обычных (стандартных) зданий, зданий с низким потреблением энергии, энергопассивных зданий и зданий с потреблением энергии, близким к нулевому [23]

Тип здания	Расход энергии на отопление, кВт·ч/год							
	Обычное здание		Здание с низким потреблением энергии		Энергопассивное здание		Здание с энергозатратами, близкими к нулевым	
	на 1 м ²	на 1 м ³	на 1 м ²	на 1 м ³	на 1 м ²	на 1 м ³	на 1 м ²	на 1 м ³
Жилой сектор	100	32	50	16	20	7	15	5
Офисные помещения	90	29	45	14	15	5	9	3
	Общий расход энергии, кВт·ч/год							
Жилой сектор	200	64	140	45	80	26	20	6
Офисные помещения	140	45	85	27	45	15	14	4

Вторым важным условием при проектировании и эксплуатации является обеспечение требуемого расхода тепловой энергии на отопление. В Финляндии Государственный научно-исследовательский

университет (VTT) разработал рекомендуемые нормы расходов на отопление и общего энергопотребления зданий. Они приведены в таблице 6.

5. Конструктивные решения наружных ограждающих конструкций для зданий с низким потреблением энергии

Таким образом, применительно для зданий с низким потреблением энергии можно выделить следующие основные конструктивные требования при их проектировании и строительстве:

- высокий уровень теплоизоляции наружных ограждающих конструкций (стен, окон, верхнего и нижнего перекрытий, наружных дверей и др.);
- герметичность наружной оболочки;
- компактность здания (низкий показатель компактности).

Примечание – К данному перечню обязательных для зданий с низким потреблением энергии конструктивных требований, направленных на максимальное энергосбережение, следует также добавить необходимость использования в зданиях рекуператоров тепла вытяжного воздуха в приточно-вытяжных механических системах вентиляции, эффективность автоматического регулирования параметров теплоносителя, обеспечение по-квартирного учета параметров энергопотребления и возможность использования в зданиях для энергоснабжения возобновляемых источников энергии и/или вторичных энергетических ресурсов (энергии солнца, ветра, грунта и т.д.). Однако эти мероприятия не входят в перечень рассматриваемых в настоящей работе мер по энергосбережению. Для более детального ознакомления с возможностями инженерных методов снижения потребления в зданиях различных видов энергии рекомендуем, в частности, методики, изложенные в РМД 23-16-2012 Санкт-Петербург [24].

Как следует из сравнительного анализа нормативных требований различных стран (Финляндии и России) к уровню теплоизоляции наружных ограждающих конструкций, представленного в пункте 2 статьи, российские стандарты не способствуют проектированию и строительству зданий с низким потреблением тепловой энергии на отопление.

Ввиду близости климатических параметров Финляндии и большинства регионов Северо-Запада Российской Федерации, а также Москвы и Московской области, представляется целесообразным использование финских стандартов по теплоизоляции [16]. Особенно это касается тех групп застройщиков и потребителей, которые уже сегодня задумываются не только о стоимости квадратных метров строящейся недвижимости, но и стоимости эксплуатационных расходов в течение всего жизненного цикла здания. О том насколько это важно с учетом динамики цен на тепловую энергию свидетельствуют данные таблицы 7.

Таблица 7. Динамика роста тарифов на тепловую энергию в Санкт-Петербурге при централизованном отоплении зданий за период с 2006-го по 2011-й годы

Год	Величина тарифа, руб/Гкал (вкл. НДС)	Основание
2006	500,40	Распоряжение Региональной энергетической комиссии Правительства Санкт-Петербурга от 16 ноября 2005 г. N 100-р
2007	575,46	Распоряжение Комитета по тарифам Правительства Санкт-Петербурга от 15 ноября 2006 г. N 123-р
2008	650,00	Распоряжение Комитета по тарифам Правительства Санкт-Петербурга от 31 октября 2007 г. N 139-р
2009	795,73	Распоряжение Комитета по тарифам Правительства Санкт-Петербурга от 19 ноября 2008 г. N 141-р
2010	931,00	Распоряжение Комитета по тарифам Правительства Санкт-Петербурга от 14 декабря 2009 г. N 199-р
2011	1050,00	Распоряжение Комитета по тарифам Правительства Санкт-Петербурга от 13 декабря 2010 г. N 334-р

В таблице 8 представлена динамика роста тарифов для населения г. Санкт-Петербурга, - повышение стоимости тепловой энергии за год (в процентах) по отношению к предыдущему году.

Таким образом, за рассматриваемый период времени (с 2006 по 2011 г.г.) средняя величина относительного роста тарифа на тепловую энергию в год Δc_T составила 16 %. Если принять эту величину в качестве базовой для прогнозирования стоимости тепловой энергии на последующие годы, то получается, что каждые 5 лет тарифы на тепло должны возрастать в 2,1 раза ($1,16^5$). Это же означает, что через 10 лет они могут вырасти в 4,4 раза ($1,16^{10}$) и т.д.

Таблица 8. Динамика повышения стоимости тепловой энергии (в относительном выражении)

Годы (с...по)	Прирост стоимости тепловой энергии по отношению к предыдущему году, %
с 2006 по 2007 г.г.	+ 15,0
с 2007 по 2008 г.г.	+ 13,0
с 2008 по 2009 г.г.	+ 22,4
с 2009 по 2010 г.г.	+ 17,0
с 2010 по 2011 г.г.	+ 12,8
В среднем (Δc_T)	+ 16,0

В настоящее время в Политехническом университете разработан Альбом технических решений по применению теплоизоляционных изделий из пенополиуретана марки «SPU-INSULATION» в строительстве жилых общественных и промышленных зданий АТР-СПУ-01-12 [25], в котором приведены конкретные технические решения и узлы наружных ограждающих конструкций, обеспечивающих требования финских стандартов и рекомендаций для зданий с низким, пассивным и близким к нулевому потреблению тепловой энергии [16, 23].

Литература

1. Гертис К. Здания XXI века — здания с нулевым потреблением энергии // Энергосбережение. 2007. № 3. С. 36-47.
2. Ehhort H., Reiss J., Hellwig R. Энергоэффективные здания. Анализ современного состояния и перспектив развития на основе реализованных проектов // АВОК. 2006. №2. С. 36-49.
3. Шилкин Н.В. «Пассивные» здания: возможности современного строительства // Энергосбережение. 2011. №4. С. 34-40.
4. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В. Энергоэффективные здания. М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. 100 с.
5. Дмитриев А. Н. Пассивные здания. Перспективы проектирования и строительства зданий с низким уровнем энергопотребления // СтройПРОФИль. 2005. №2. С.1-5.
6. Елохов А. Е. Пассивное здание // СтройПРОФИ. 2012. №8. С. 55-57.
7. Орлов О., Следь И., Урустимов А. [и др.] Конкурс «Архитектурная концепция здания с нулевым потреблением» // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. №1. С. 53-60.
8. Горшков А. С., Дерунов Д. В., Завгородний В. В. Технология и организация строительства здания с нулевым потреблением энергии // Строительство уникальных зданий и сооружений. №3 (8). 2013. С. 12-23.
9. Ватин Н. И., Горшков А. С., Немова Д. В. Энергоэффективность ограждающих конструкций при капитальном ремонте // Строительство уникальных зданий и сооружений. №3 (8). 2013. С. 1-11.
10. Блази В. Справочник проектировщика. Строительная физика. М.: Техносфера, 2004. 480 с.
11. H. Orr, J. Wang, D. Fetsch, R. Dumont. Technical note: Airtightness of older-generation energy-efficient houses in Saskatoon // Journal of Building Physics. 2013. Vol. 36. Pp. 294-307.
12. Cheng Y., Nin J., Gao N. Thermal comfort models: A review and numerical investigation // Building and Environment. 2012. Vol. 47. Pp. 13-22.
13. Tenpieric M., Van der Spoel W., Cauberg H. An analytical model for calculating thermal bridge effects in high performance building enclosure // Journal of Building Physics. 2008. Vol. 31. Pp. 361-387.
14. Корниенко С. В. Учет формы при оценке теплозащиты оболочки здания // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. №5 (10). С. 20-27.
15. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий (Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003) .

16. National Building Code of Finland, Part D3.
17. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий.
18. СП 131.13330.2012. Строительная климатология.
19. Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании / Ватин Н. И., Немова Д. В., Рымкевич П. П., Горшков А. С. // Инженерно-строительный журнал. №8. 2012. С. 4-14.
20. ГОСТ 31167-2003. Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях.
21. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / Под ред. Ю.А.Табунщикова, В.Г. Гагарина. 5-е изд., пересмотр. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.
22. ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях
23. Сормунен П. Энергоэффективность зданий. Ситуация в Финляндии // Инженерно-строительный журнал, №1, 2010. С. 7-8.
24. РМД 23-16-2012 Санкт-Петербург. Рекомендации по обеспечению энергетической эффективности жилых и общественных зданий (утверждены Распоряжением Комитета по строительству Правительства Санкт-Петербурга от 13.09.2012 г. № 114).
25. Ватин Н. И., Величкин В. З., Горшков А. С. [и др.] Альбом технических решений по применению теплоизоляционных изделий из пенополиуретана марки «SPU-INSULATION» в строительстве жилых общественных и промышленных зданий. Материалы для проектирования. АТР-СПУ-01-12 // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. №3 (8). С. 1-264.

References

1. Gertis K. Zdanija XXI veka — zdanija s nulevym potreblenijem jenergii // Jenergosberezhenie. 2007. № 3. S. 36-47. (rus)
2. Ehhort H., Reiss J., Hellwig R. Jenergojefektivnye zdanija. Analiz sovremennogo sostojanija i perspektiv razvitija na osnove realizovannyh projektov // AVOK. 2006. №2. S. 36-49. (rus)
3. Shilkin N.V. «Passivnye» zdanija: vozmozhnosti sovremennogo stroitel'stva // Jenergosberezhenie. 2011. №4. S. 34-40. (rus)
4. Tabunshhikov Ju.A., Brodach M.M., Shilkin N.V. Jenergojefektivnye zdanija. M.: AVOK-PRESS, 2003. 100 s. (rus)
5. Dmitriev A. N. Passivnye zdanija. Perspektivy proektirovanija i stroitel'stva zdanij s nizkim urovnem jenergotreblenija // StrojPROFI. 2005. №2. S.1-5. (rus)
6. Elohov A. E. Passivnoe zdanie // StrojPROFI. 2012. №8. S. 55-57. (rus)
7. Orlov O., Sled' I., Urustimov A. [i dr.] Konkurs «Arhitekturnaja koncepcija zdanija s nulevym potreblenijem» // Stroitel'stvo unikal'nyh zdanij i sooruzhenij. 2012. №1. S. 53-60. (rus)
8. Gorshkov A. S., Derunov D. V., Zavgorodnij V. V. Tehnologija i organizacija stroitel'stva zdanija s nulevym potreblenijem jenergii // Stroitel'stvo unikal'nyh zdanij i sooruzhenij. №3 (8). 2013. S. 12-23. (rus)
9. Vatin N. I., Gorshkov A. S., Nemova D. V. Jenergojefektivnost' ograzhdajushhih konstrukcij pri kapital'nom remonte // Stroitel'stvo unikal'nyh zdanij i sooruzhenij. №3 (8). 2013. S. 1-11. (rus)
10. Blazi V. Spravochnik proektirovshhika. Stroitel'naja fizika. M.: Tehnosfera, 2004. 480 s.H. Orr, J. Wang, D. Fetsch, R. Dumont. Technical note: Airtightness of older-generation energy-efficient houses in Saskatoon // Journal of Building Physics. 2013. Vol. 36. Pp. 294-307.
11. H. Orr, J. Wang, D. Fetsch, R. Dumont. Technical note: Airtightness of older-generation energy-efficient houses in Saskatoon // Journal of Building Physics. 2013. Vol. 36. Pp. 294-307.
12. Cheng Y., Nin J., Gao N. Thermal comfort models: A review and numerical investigation // Building and Environment. 2012. Vol. 47. Pp. 13-22.
13. Tenpieric M., Van der Spoel W., Cauberg H. An analytical model for calculating thermal bridge effects in high performance building enclosure // Journal of Building Physics. 2008. Vol. 31. Pp. 361-387.
14. Kornienko S. V. Uchet formy pri ocenke teplozashhity obolochki zdanija // Stroitel'stvo unikal'nyh zdanij i sooruzhenij. 2013. №5 (10). S. 20-27. (rus)
15. SP 50.13330.2012 Teplovaja zashhita zdanij (Aktualizirovannaja redakcija SNiP 23-02-2003). (rus)
16. National Building Code of Finland, Part D3.
17. SP 23-101-2004. Proektirovanie teplovoj zashhity zdanij. (rus)

18. SP 131.13330.2012. *Stroitel'naja klimatologija*. (rus)
19. *Vlijanie urovnja teplovoj zashhity ograzhdajushhih konstrukcij na velichinu poter' teplovoj jenerгии v zdanii* / Vatin N. I., Nemova D. V., Rymkevich P. P., Gorshkov A. S. // *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*. №8. 2012. S. 4-14. (rus)
20. GOST 31167-2003. *Zdanija i sooruzhenija. Metody opredelenija vozduhopronicaemosti ograzhdajushhih konstrukcij v naturnyh uslovijah*. (rus)
21. *Fokin K. F. Stroitel'naja teplotehnika ograzhdajushhih chastej zdaniy* / Pod red. Ju.A.Tabunshhikova, V.G. Gagarina. 5-e izd., peresmotr. M.: AVOK-PRESS, 2006. 256 s. (rus)
22. GOST 30494-96. *Zdanija zhilye i obshhestvennye. Parametry mikroklimata v pomeshhenijah*. (rus)
23. *Sormunen P. Jenergojeffektivnost' zdaniy. Situacija v Finljandii* // *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*, №1, 2010. S. 7-8. (rus)
24. RMD 23-16-2012 Sankt-Peterburg. *Rekomendacii po obespecheniju jenergeticheskoj jeffektivnosti zhilyh i obshhestvennyh zdaniy (utverzhdeny Rasporjazheniem Komiteta po stroitel'stvu Pravitel'stva Sankt-Peterburga ot 13.09.2012 g. № 114)*. (rus)
25. *Vatin N. I., Velichkin V. Z., Gorshkov A. S. [i dr.] Al'bom tehnicheskikh reshenij po primeneniju teploizoljacionnyh izdelij iz penopoliuretana marki «SPU-INSULATION» v stroitel'stve zhilyh obshhestvennyh i promyshlennyh zdaniy. Materialy dlja proektirovanija. ATR-SPU-01-12 // Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij. 2013. №3 (8). S. 1-264*. (rus)