

ПРООН/ГЭФ

Проект №00077154

«Повышение энергетической эффективности жилых зданий в Республике
Беларусь»

**Учебные материалы для специалистов, занимающихся
вопросами строительной политики, норм и стандартов**

Исполнитель,

Эксперт по вопросам энергетической
эффективности в зданиях

Л. Н. Данилевский.

Минск

июль, 2014

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.....	5
2 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ	9
3 ПАССИВНЫЙ ИЛИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ?	18
4 ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ЗДАНИЯ.....	23
4.1 ПОНЯТИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ЗДАНИЯ	23
4.2 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЗДАНИЙ	25
4.3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ	28
ВЫВОДЫ.....	35
ЛИТЕРАТУРА	37

Введение

Современная энергетика базируется на потреблении ископаемых видов топлива, запасы которых ограничены. Их сжигание обеспечивает получение необходимого количества тепловой энергии, оставляя последующие поколения без ценнейших источников химического сырья. Негативные явления, сопровождающие этот процесс – выделение углекислого газа, создающего «парниковый эффект», приводящий к глобальному потеплению на планете и других веществ, приводящих к загрязнению атмосферы. Уменьшение негативных последствий современной энергетике может быть достигнуто развитием ее обратной стороны – снижением потребления энергии во всех сферах деятельности человека.

Учитывая, что на отопление и горячего водоснабжение зданий в нашей стране затрачивается около 40 % вырабатываемой тепловой энергии, снижение затрат энергии на эксплуатацию зданий в отопительном периоде стала приоритетной задачей при развитии строительных технологий. Увеличение стоимости энергоносителей потребовало принятия определенных мер по снижению затрат энергии на эксплуатацию зданий. На начальном этапе, в 90–е годы, эти меры в нашей стране ограничивались повышением теплозащитных свойств оболочки зданий. С конца 90–х начало совершенствоваться инженерное оборудование зданий и к настоящему времени все многоэтажные здания оснащены системами учета и регулирования потреблением тепловой энергии. В то же время, оснащение новым инженерным оборудованием не изменило общих принципов проектирования элементов зданий, влияющих на их теплоэнергетические характеристики. Остальные элементы и системы, система вентиляции, горячего водоснабжения, электроснабжения зданий остались на прежнем уровне. Проблема повышения энергоэффективности зданий носит системный характер и не может быть решена в рамках существующих традиционно применяемых технических и проектных решений.

Если в предыдущие десятилетия энергоэффективные здания рассматривались как экспериментальные, задающие общее направление развития, то в настоящее время они становятся объектами массового строительства. Это обстоятельство потребовало развития научных и технических основ создания энергоэффективных зданий на основе системного анализа условий проектирования.

1 Направления развития современной энергетики

К настоящему времени объем потребления топлива, представленный в таблице 1.1 [1] настолько велик, что последствия его сжигания ощущаются в планетарном масштабе, в частности, приводя к повышению средней температуры воздуха на нашей планете. Осознание этого факта требует оценки не только экономических, но и социальных и экологических последствий развития энергогенерирующих или энергоемких технологий [2, 3]. Понимание стоящей перед человечеством проблемы зафиксировано в [4].

Таблица 1.1 – Оценки извлекаемых мировых запасов ископаемого химического топлива и солнечной энергии

Ископаемое топливо млрд. т у.т			Всего, млрд. т у.т	Энергия химического топлива, кВт-ч	Солнечная энергия, кВт-ч/год
уголь	нефть	природный газ			
4850	1140	310	6300	$5,1 \cdot 10^{16}$	$1,35 \cdot 10^{18}$

Энергетический и экологический баланс нашей планеты сложился, прежде всего, благодаря поступающей солнечной энергии. Поток солнечной энергии, достигающей поверхности Земли, равен 1000 Вт/м^2 [5]. Следовательно, общая мощность солнечного излучения, поступающего на нашу планету, приблизительно, равна $1,5 \cdot 10^{14} \text{ кВт}$.

Количество энергии, которая может быть получена при сжигании ископаемого топлива, составляет всего лишь около 3,5 % солнечной энергии, поступающей на планету в течение года. В [1] приведен уровень мировой добычи топлива на 1990г. Он составлял в эквиваленте $7,7 \cdot 10^{13} \text{ кВт-ч}$ или 0,0057 % солнечной энергии, поступающей на планету в течение года.

Приведенные цифры задают направление развития современной энергетики: от использования ископаемых видов топлива к преобразованию и использованию солнечной энергии.

Человечество обладает техническими средствами преобразования солнечной энергии в удобную для использования форму, например, в тепловую и электрическую [6–15]. Чаще используют термические солнечные коллекторы [7-11]. Фотоэлектрические преобразователи находятся на стадии активного развития [12-15]. В Западной Европе их использование для получения электрической энергии стимулируется государством, что обеспечивает их выпуск и использование. Коэффициент преобразования современных фотоэлектрических преобразователей составляет около 15% [3]. Это значит, что для получения необходимого количества энергии путем использования фотоэлектрических преобразователей необходимо, чтобы постоянно в зоне падения солнечных лучей находились ФЭП, ориентированные перпендикулярно потоку солнечной радиации общей площадью, составляющей $3,8 \cdot 10^4 F_0$, где F_0 – площадь меридионального сечения планеты.

Экономически обоснованным использование фотоэлектрических преобразователей станет в случае, когда стоимость единицы произведенной за период эксплуатации энергии станет равной или меньше аналогичной величины для тепловой электростанции при учете экологических последствий использования химического топлива. Однако отсутствие негативных экологических последствий солнечной энергетики дает ей несомненные преимущества перед традиционными источниками энергии.

Развитие энергетики, основанной на возобновляемых источниках энергии, началось. По оценкам американского общества инженеров-электриков, приведенным в [1], если в 1980г. доля производимой электроэнергии за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мире составляла 1 %, то к 2020г. — 13 % и к 2060г. — 33 %. Т. е., процесс развития достаточно медленный. Переходный период к экологической энергетике может занять время жизни нескольких поколений.

Снижение экологических последствий современной энергетики может быть достигнуто развитием обратной стороны энергетики – снижением потребления энергии во всех сферах деятельности человека.

Для современных технологий доминантным направлением развития с последние десятилетия стало повышение энергоэффективности, т.е. снижение расхода энергии на произведенную единицу ВВП.

Для стран Западного мира экономия энергии стала актуальной, начиная с первого энергетического кризиса в 1968г. Для стран бывшего Советского Союза этот процесс начался с его развалом. Республика Беларусь – лидер в процессе снижения энергоемкости ВВП. На рисунке 1 из [15] приведены графики снижения энергоемкости ВВП в нашей стране.

На рисунке 2 из [16] приведены графики, иллюстрирующие изменение этой величины для Республики Беларусь в сравнении с другими странами. Из графика виден очевидный прогресс, достигнутый в этом направлении по сравнению с Россией и Украиной. В то же время, по сравнению с Германией и Австрией, у страны имеются значительные резервы снижения энергоемкости ВВП. На эксплуатацию зданий расходуется около 40 % потребляемой в стране тепловой энергии [17]. Поэтому экономия энергии при эксплуатации зданий является важной составляющей указанного резерва.

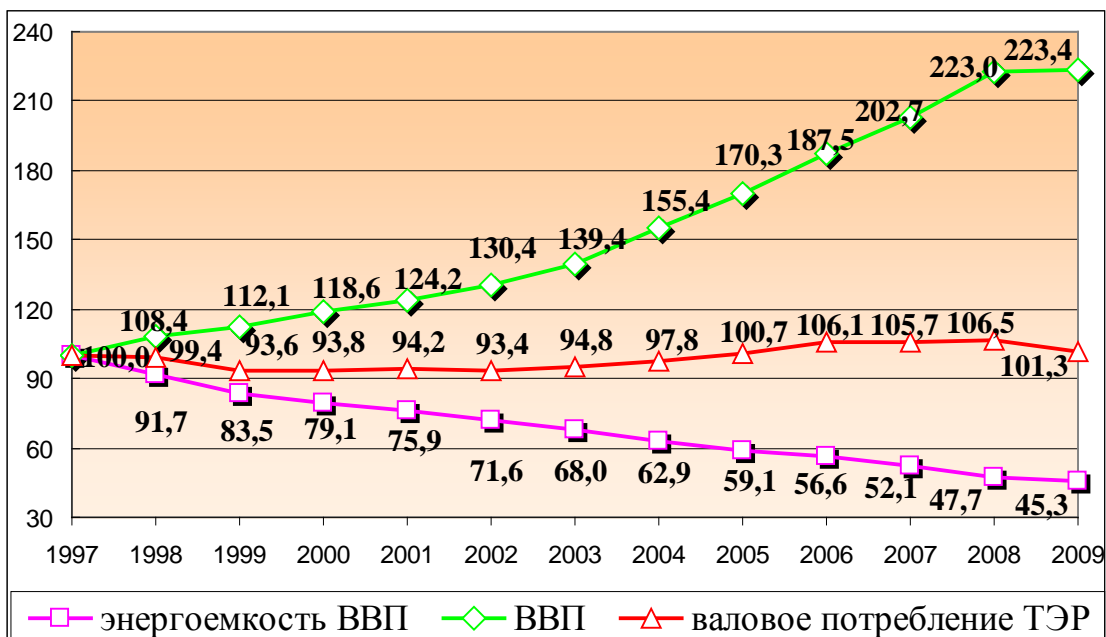
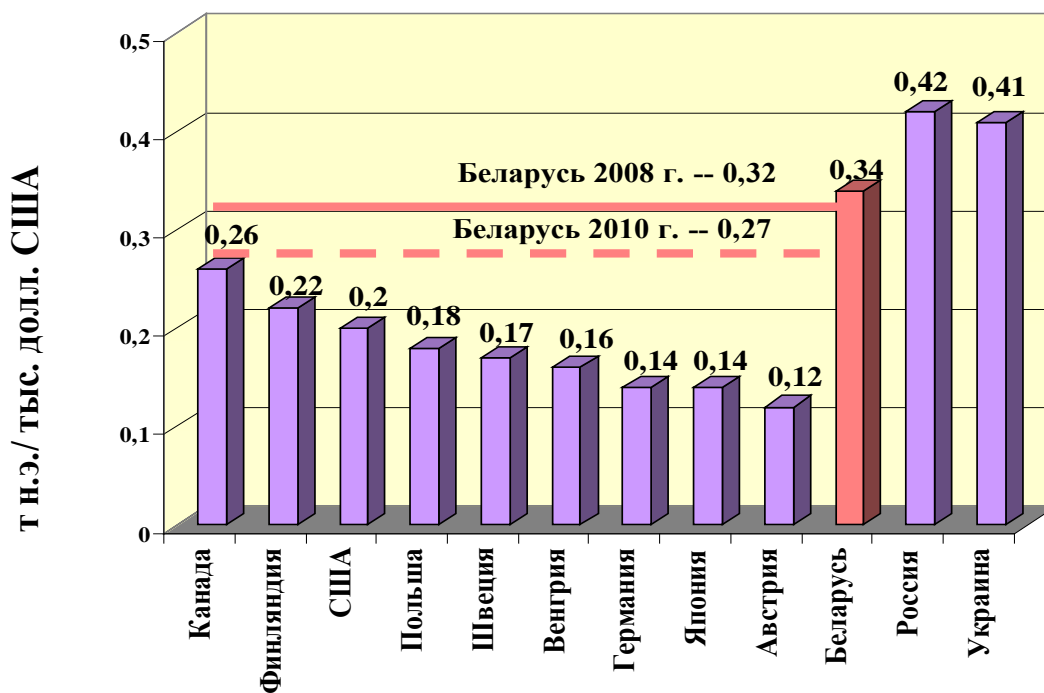


Рисунок 1 – Динамика ВВП, валового потребления ТЭР и энергоемкости ВВП в 1998-2009 гг. (%)



Источник: International Energy Agency "Key world energy statistics from the IEA", 2009.

Рисунок 2 – Показатели энергоемкости ВВП (в ценах 2000 г. по ППС)

2 Основные направления снижения тепловых потерь

Увеличение стоимости энергии потребовало принятия определенных мер по утеплению оболочки зданий [18]. В таблице 1 приведены нормативные значения сопротивления теплопередаче, действовавшие в Республике Беларусь в различное время и трансмиссионные тепловые потери зданий различных поколений.

Очевиден значительный прогресс в этом направлении. Значения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, установленные нормативными документами разных стран [19-24], приведены в таблицах 2 - 5 и находятся в пределах от 2 до 11 м²·°С/Вт, в зависимости от национальных или региональных требований. Практически для всех типов ограждающих конструкций, за исключением перекрытия над подвальным помещением, нормативное значение сопротивления теплопередаче в РБ больше или равно аналогичному значению других стран.

Значение сопротивления теплопередаче оконных конструкций превышает аналогичное значение для всех стран, исключая Финляндию. Было бы ошибкой выбирать сопротивление теплопередаче методом аналогии с соседними странами. Сопротивление теплопередаче должно быть близким оптимальному значению для конкретных климатических и экономических условий.

Для оптимального значения сопротивления теплопередаче разность между дополнительными капитальными затратами и экономией энергии в течение жизни системы утепления минимальна [25]. Такой подход был использован при подготовке изменения №1 к нормативному документу [18].

Таблица 1 – Значения составляющих теплового баланса многоэтажных зданий различных поколений в Республике Беларусь

Наименование ограждений	Наружные стены			Окна			Чердачное покрытие			Цокольное перекрытие	
	[69]	[18]	[18]	[69]	[18]	[18]	[69]	[18]	[18]	[69]	[18]
$R_i, \text{ м}^2\text{град/Вт}$	1	2,5	3,2	0,38	0,6	1	1,5	3	6	1,2	1,8
$Q, \text{ кВтч/м}^2 \text{ в год}$ при $T_{\text{вн}}=18^\circ\text{C} / 21^\circ\text{C}$	54,4/ /63,0	21,9/ /25,4	17/ /19,7	23,4/ /27,1	20,6/ /23,9	13/ /15	8,2/ /9,5	4,1/ /4,8	2/ /2,3	7,6/ /8,8	5,1/ /5,9
Сумма трансмиссионных теплопотерь при $T_{\text{вн}}=18^\circ\text{C} / 21^\circ\text{C}$, кВт-ч/м ² в год							94/ /109	52/ /60	37/ /43		
Теплопотери с воздухообменом при естественной вентиляции при $T_{\text{вн}}=18^\circ\text{C} / 21^\circ\text{C}$, кВт-ч/м ² в год										52,6/61	
Теплопотери с воздухообменом при использовании принудительной вентиляции с рекуперацией тепловой энергии вытяжного воздуха при $T_{\text{вн}}=18^\circ\text{C} / 21^\circ\text{C}$, кВт-ч/м ² в год ($\eta=0,8$)										10,5/12,2	
Энергия внутренних источников, кВт-ч/м ² в год [5]										29,7 ± 1,5	
Солнечная энергия, кВт-ч/м ² в год										7,9	

$T_{\text{вн}}$ – температура воздуха в здании, °C.

Таблица 2 – Нормативные требования к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций зданий в странах ЕС [23]

Показатель	Франция	Германия		Словения	Венгрия	Румыния	Дания	Норвегия	Финляндия
Год принятия требований	2005	2009		2008/ 2010	2006	2006	2006	2007	2010
Тип здания	–	жилое	общественное	–	–	–	–	–	–
Коэффициент сопротивления теплопередаче, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$									
стены	2,22	2,50–1,54	2,86/ 2,00 ¹⁾	3,57	2,22	1,49	2,5	4,55	7
кровли	3,57 (2,94) ²⁾		2,86/ 2,00 ¹⁾	5,00	4,00	3,45	4,00	5,56	11
окна	0,38		0,53/ 0,34 ¹⁾	0,77	0,62	0,56	0,50	0,63	1
пола	2,78 (2,5) ³⁾		2,86/ 2,00 ¹⁾	3,33	4,00	4,55	3,33	5,56	11

¹⁾ Для температуры внутреннего воздуха соответственно $> 19^\circ C / < 19^\circ C$.

²⁾ Для металлических крыш.

³⁾ Для полов над подвальным помещением.

Таблица 3 – Нормативные требования к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций зданий в странах СНГ

Страны	Россия, для 4000 градусосуток [19]	Казахстан, для 4000 градусосуток [20]	Украина [21]
Год принятия	2012	2012	2006
Коэффициент сопротивления теплопередаче, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$			
Стены	2,8	3,2	3,3
Кровля	3,7	5	5,35
Окна	0,50	0,6	0,75
Перекрытия над неотапливаемыми подвалами	3,7	2,5	3,75

Таблица 4 – Сравнение нормативных значений сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций новых и реконструируемых зданий в Республике Беларусь и других странах

	РФ	РК	Украина	Франция	Германия	Словения	Венгрия	Румыния	Дания	Норвегия	Финляндия
Стены	+	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-
Перекрытия над подпольем	-	-	-	=	=	-	-	-	-	-	-
Кровля	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Окна	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	=

Примечание: «+» означает, что нормативные значения сопротивления теплопередаче ограждения в РБ превышают аналогичные в данной стране; «-» - не достигают аналогичного; «=» означает, что нормативные значения сопротивления теплопередаче ограждения в РБ аналогичны таковым в данной стране.

Строительная отрасль в нашей стране, как и в других странах СНГ, переживает системный кризис, связанный с неоднородностью развития строительных технологий, относящихся к оболочке здания и его инженерным системам. Снижение уровня эксплуатационных затрат тепловой энергии на отопление зданий достигается, в основном, путем утепления ограждающих конструкций. Инженерное оборудование современных зданий, несмотря на существенный прогресс в этой области, отстает в своем развитии [63–66]. При решении задачи экономии энергии остаются, как правило, в стороне вопросы, связанные с горячим водоснабжением зданий [26].

Недостаток существующих подходов к развитию строительных технологий особенно остро выявился при переходе к новому типу окон. Переход к использованию оконных конструкций нового поколения с повышенной герметичностью при сохранении в жилых зданиях естественной вентиляции привел к негативным явлениям, связанным с ухудшением качества воздушной среды, нарушением температурного и влажностного

режимов помещений в течение отопительного периода [27]. К этому можно добавить, что в зданиях, строящихся по существующим нормативам, на воздухообмен приходится до 60 % теплопотерь [27-32, 63-66]. Эта проблема носит системный характер, так как не может быть решена в рамках существующих технических и проектных решений естественной вентиляции. Логика развития современного строительства приводит к необходимости перехода к проектированию жилых зданий с принудительной механической, контролируемой системой приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла вытяжного воздуха. К этому имеется несколько причин, которые не могут быть устранены иным путем:

1) максимальное значение потерь теплоты из зданий в отопительном периоде относится к воздухообмену, достигая до 60 % от общего уровня;

2) при утепленной стене, герметичных оконных конструкциях и герметизации примыканий окон к стеновой конструкции не остается щелей, которые могли бы поддержать нормативный уровень воздухообмена.. Существующая схема вентиляции путем открывания окон или форточек приводит к тому, что качество воздуха в квартирах нижних этажей зданий не соответствует существующим санитарным нормам вследствие сильного загрязнения наружного воздуха в городе, а также к повышению уровня шума в помещениях, часто выше установленных пределов. Задачу вентиляции необходимо решать другими, проблемно ориентированными средствами, так как окно, прежде всего, обеспечивает инсоляцию помещений [67-69];

3) решив все-таки, какими - то техническими средствами задачу притока воздуха и сохранив систему естественной вентиляции, мы не решим задачу поддержания нормативного значения воздухообмена. Уровень воздухообмена будет зависеть от многих причин [27-32]:

- уровня ветровой нагрузки;
- высоты расположения квартиры в многоэтажном здании;

- открытия окон и степени их уплотнения;
- состояние вытяжных вентиляционных шахт.

4) сохранение свободного воздухообмена не позволяет решить задачу использования внутренних источников тепла и поступающей в помещение солнечной энергии в общей системе энергоснабжения здания в течение отопительного периода. Как правило, избыток теплоты в одной из комнат, например, на кухне или в комнате на освещенном фасаде, уносится с вентиляционными выбросами.

В [34] и [68-78] приведен тепловой баланс жилых зданий старого жилого фонда, построенных до 1990г. и зданий более новых поколений строительства с учетом распределения потерь теплоты по различным путям и затрат энергии на приготовление горячей воды. Данные приведены для условий ФРГ [34] и Республики Беларусь, [69-77]. Из анализа приведенных данных можно сделать вывод, что уровень тепловых потерь через ограждающие конструкции в новых зданиях существенно снизился. Это обусловлено изменением нормативных требований к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций [18]. Увеличение общей площади помещений, приходящейся на одного жителя, которая составляет в настоящее время в Республике Беларусь около 24м² на одного жителя, привело к уменьшению удельной мощности тепловых выделений. Из приведенных в [34] а также [70] данных следует вывод, что дальнейшего снижения затрат тепловой энергии при эксплуатации зданий в отопительном периоде можно достигнуть путем утилизации теплоты вытяжного воздуха.

Если поставить задачу проектирования здания так, чтобы система вентиляции могла одновременно решать функцию воздушного отопления, приходим к идее пассивного дома, которая была сформулирована в [34-40]. При этом в тепловом балансе зданий увеличивается роль поступающей в здание солнечной энергии, а также внутренних и бытовых тепловыделений.

В Западной Европе 90 – х годов идея пассивного дома [34-36] оказалась чрезвычайно плодотворной. Она позволила устранить основные противоречия, присущие массовому строительству жилья как с точки зрения экономии энергии, так и с точки зрения обеспечения комфортных условий проживания.

При постановке задачи массового строительства пассивных зданий были сформулированы следующие требования [35]:

- 1) стоимость строительства, несущественно отличающуюся от обычного;
- 2) использование при строительстве уже известных и освоенных технологий и технологических приемов.

Задаваемый уровень теплоснабжения пассивных зданий составляет 15 и менее кВт·ч/м² в год независимо от климатических условий. Строительство зданий с указанным уровнем теплоснабжения продвигается на восток.

Встает вопрос о целесообразности и экономической оправданности строительства пассивных зданий в климатических и урбанистских условиях стран СНГ. В [72–79] была исследована возможность и перспективы развития этого направления строительства в климатических [41] и экономических условиях Республики Беларусь и показаны недостатки такого подхода к строительству, обусловленные игнорированием климатических, урбанистских и архитектурных факторов при выборе целевого показателя. Возможной альтернативой пассивному дому в условиях Республики Беларусь и стран СНГ может стать строительство энергоэффективных зданий, в которых системный комплекс теплотехнических мероприятий выполняется с учетом региональных особенностей строительства, климатических и экономических условий [63–67, 78–82, 42-44].

В последние годы появилось достаточно публикаций посвященных не только строительству, но и реконструкции зданий с низким потреблением тепловой энергии на отопление и вентиляцию [45-47].

Общим недостатком приведенной литературы является отсутствие теоретической базы решений, принимаемых для исполнения в зданиях. В [45] приведено определение энергоэффективного здания в виде пожеланий по экономической, гигиенической, противопожарной и прочей эффективности и приведены основные инженерные и архитектурные принципы снижения потребления тепловой энергии в зданиях. В [46] и [47] приводятся конкретные технические приемы по утеплению зданий и использованию энергоэффективного инженерного оборудования, однако, отсутствуют общие принципы выбора энергосберегающих решений, а сами решения рассматриваются вне взаимосвязи в здании.

Следует отметить, что к настоящему времени идея экономии энергии при эксплуатации зданий очень популярна во всем мире. Построены уже здания с нулевым потреблением энергии (Null – Energie) [48-50] и даже с положительным балансом энергии (Plus – Energie), энергетические системы, которых без использования ископаемых видов топлива производят больше энергии, чем потребляют [51-55]. Однако, экономическое обоснование строительства таких зданий, как правило, отсутствует. Целью проектов Null – Energie или Plus – Energie здания является, скорее демонстрация современных технических возможностей строительства.

В то же время, деревенская изба с дровяным отоплением также попадает под определение Null – Energie дома, т.к. в ее энергоснабжении не используются ископаемые виды топлива. А если учесть наличие скотного двора, вырабатывающего бесплатное органическое удобрение – то это даже Plus – Energie дом. Однако, следует отметить, что уровень комфорта таких зданий далек от современных требований. Поэтому в современном здании с низким потреблением тепловой энергии на отопление важным фактором

является обеспечение повышенного по сравнению с обычными комфорта проживания. Таким образом, технический прогресс двигает нас от ноль – энергии дома с нулевым комфортом, в котором жили наши отцы, да и некоторые современники, к ноль – энергии дому с высоким комфортом проживания.

3 Пассивный или энергоэффективный?

Следует еще раз уточнить понятия, термины «пассивный дом» и тот смысл, который вкладывается в понятие «энергоэффективный дом».

Как сформулировано в [35, 36], пассивный дом – здание, уровень тепловых потерь которого так низок, что можно исключить систему отопления, объединить ее с системой вентиляции здания. Там же сформулированы отличительные особенности пассивных зданий:

- уровень потребления энергии на отопление меньше $15 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год;
- равномерно утепленная оболочка с сопротивлением теплопередаче не менее $10 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$;
- использование принудительной приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией теплоты вентиляционных выбросов;
- проектирование без мостиков холода;
- герметичная оболочка здания;
- сопротивление теплопередаче окон в которых не менее $1,2 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$.

Из перечисленных целевым является показатель потребления тепловой энергии на отопление, равный $15 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год.

В [35] впервые были приведены графики, представленные на рисунке 1.3, из которых следует обоснование этой цифры. При снижении потребления тепловой энергии снижаются затраты на отопление, что показано линейной зависимостью на рисунке 1.3. Разность затрат на мероприятия по экономии тепловой энергии и стоимостью сэкономленной энергии представлены на втором графике рисунке 3. Минимум этой функции

соответствует удельному потреблению тепла на отопление, равному 30 кВт-ч/м² в год. При значении этой величины, равном 15 кВт-ч/м² в год можно совместить систему вентиляции с воздушным отоплением здания и убрать элементы водяной системы отопления, что приводит к скачкообразному снижению затрат на графике.

На этом графике отображен уровень затрат в зависимости от потребления тепловой энергии на цели отопления. Следует отметить, что для конкретных климатических условий г. Дармштадт (Германия), уровня воздухообмена (1 1/ч для жилой площади) и конкретного блокированного 3-этажного здания было рассчитано, что для системы воздушного отопления с температурой теплоносителя 50⁰С принятая кратность воздухообмена обеспечивает отопление здания со средним удельным потреблением тепла 15 кВт-ч/м² в год. Этот порог и принят сегодня для определения пассивного дома для всех без исключения здания, независимо от их этажности и климатических условий строительства.

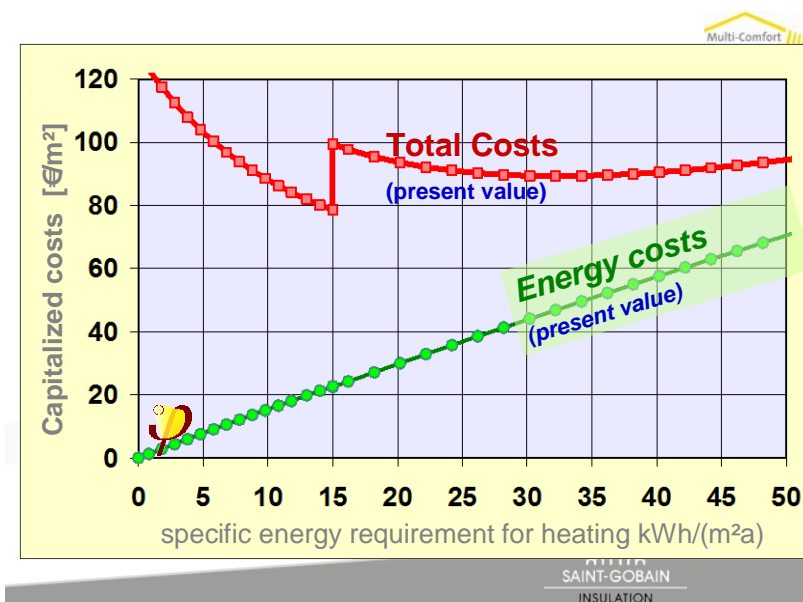


Рисунок 3 – Обоснование потребности в отоплении пассивного дома

Использования воздушного отопления возможно при выполнении следующего условия [77, 78]:

$$\rho \cdot V \cdot c \cdot (T_{\max} - T_{\text{norm}}) = P_{\text{mpot}}, \tag{1.1}$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³;

V – объем воздуха при нормативном воздухообмене, м³/с;

C – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);

$T_{max} = 45$ °С – максимальная допустимая температура воздуха в системе воздушного отопления, подаваемая в рабочую зону [56];

$T_{norm} = 18$ °С – допустимая температура воздуха в жилых помещениях;

P_{spot} – мощность системы теплоснабжения, соответствующая наружной температуре холодной пятидневки [41].

Для нормативного значения уровня воздухообмена помещений (90 м³/ч для кухни и по 25 м³/ч для туалета и ванной комнаты), приведенного в [33], максимальная удельная мощность теплоснабжения в системе воздушного отопления для многоэтажного здания равна 21 Вт/м², что дает для климатических условий Республики Беларусь [36] среднее значение удельных затрат тепловой энергии на отопление, равное 46 кВт·ч/м² в год.

Выбранное в качестве характеристики пассивного дома в [35] значение удельного потребления энергии, равное 15 кВт·ч/м²год носит случайный характер и не учитывает климатические и объемно-планировочные особенности строительства здания.

Зададим вопрос, к какому же уровню потерь тепла в зданиях следует стремиться и является ли необходимым переход к воздушному отоплению? Переход к воздушному отоплению возможен и при более высоких затратах тепла на отопление зданий. В этом случае можно сохранить кратность воздухообмена, требуемую для обеспечения нормируемого качества воздушной среды, а при необходимости увеличения кратности воздухообмена в системе воздушного отопления использовать частичную рециркуляцию воздуха в системе воздушного отопления в пределах одной квартиры.

Переход к воздушному отоплению зданий, позволяет убрать из квартиры отопительные приборы системы водяного отопления. Однако взамен необходимо установить канальный нагреватель воздуха, представляющий собой теплообменник вода/воздух. Стоимость такого теплообменника может оказаться не меньше суммарной стоимости отопительных приборов в системе водяного отопления. К этому можно добавить, что настройка и балансировка воздушного отопления достаточно сложна, так как в каждую жилую квартиру воздух необходимо подавать не пропорционально ее площади, а в соответствии с уровнем тепловых потерь, а тепловые потери помещения существенно зависят от положения помещения в здании [79].

При использовании воздушного отопления возникают сложности при управлении тепловым режимом помещений. Эти сложности обусловлены возможным противоречием между нормативным воздухообменом и воздухообменом, необходимым для компенсации тепловых потерь системой воздушного отопления. Представим себе ситуацию, когда в комнате собралось несколько человек. Объем воздуха в комнате должен быть увеличен. В то же время, в комнате увеличится уровень тепловыделений, что потребует снижения подачи теплоносителя в комнату. На наш взгляд, более целесообразным является использование системы отопления стандартного типа.

Таким образом, не видно причины, которая требовала бы доведения уровня теплоснабжения здания до значения $15 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год, как это требует [35] для пассивного дома. Тем не менее, системный подход к задаче снижения потребления тепловой энергии на отопление здания, выработанный при проектировании пассивных зданий, показал свою эффективность и является отправной точкой при решении задач экономии энергии.

Следует отметить, что график на рисунке 1.3 не совсем точен. На нем отсутствует скачкообразное увеличение затрат, соответствующее появлению системы приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла вентиляционных выбросов. Снижение уровня потребления тепла на отопление вначале достигается увеличением сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. На каком-то этапе, когда дальнейшее утепление ограждающих конструкций экономически нецелесообразно, выполняется переход к системе принудительной приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла вентиляционных выбросов. Это обеспечивает скачкообразное снижение потребления тепловой энергии в здании на 40-45 кВт-ч/м² в год при скачкообразном увеличении инвестиций на 50-100 долларов/м².

При определении целесообразного уровня теплопотерь следует исходить из экономически оптимального для существующих технико-экономических условий уровня теплозащиты здания, т.е. экономически целесообразного сопротивления теплопередаче зданий [26].

4 Энергоэффективные здания

4.1 Понятие энергоэффективного здания

Необходимо определиться с понятием «Энергоэффективное здание». В 70-80 гг. прошлого столетия с первым энергетическим кризисом в Западном мире были сделаны первые шаги в направлении экономии тепловой энергии для эксплуатации зданий. Были построены первые здания, называвшиеся энергоэффективными [14]. Выбор технических решения при строительстве этих зданий носил случайный характер, а в понятие энергоэффективности не вкладывалось глубокого смысла. Как правило, акцент делался на использование альтернативных источников энергии: солнечной, энергии ветра, геотермальной [14]. Понимание необходимости системного подхода к проектированию зданий с предельно низким уровнем тепловых потерь было продемонстрировано в проекте «Пассивный дом», выполненном в Германии в 1988-1993гг [34-36]. Основной идеей проекта было строительство зданий, в которых система отопления могла бы играть вспомогательную роль. Это первый в истории, давший толчок массовому строительству зданий указанного типа в Западной Европе. Недостатком идеологии пассивных зданий является жесткость в требованиях к уровню теплоснабжения здания ($15 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год), не учитывающая особенности объемно-планировочных решений здания, экономические условия, климатические и социальные особенности регионов строительства.

В [42] декларируется системный подход к проектированию и строительству энергоэффективных зданий, однако, здание не рассматривается как развивающийся организм, увязанный с общим развитием энергоэффективных технологий. В интенсивно развивающемся технологическом мире энергоэффективное здание нельзя рассматривать как статичную систему вне общих тенденций развития энергетики и

энергоэффективных технологий. Затраты энергии на эксплуатацию здания в течение срока его жизни можно записать в следующем виде [63, 81]:

$$E = S_{ot} \left[\sum_{n=1}^N \tau_n \cdot (f_1 \cdot \Delta T_n - f_{2n}) - \sum_{m=3}^M \sum_{n=k_m}^N \tau_n \cdot f_{mn} \right], \quad (1.2)$$

где N – срок жизни здания, лет;

M – количество энергоэффективных технологий в здании;

n – номер года;

m – номер технологии;

k_m – номер первого года введения технологии;

E – затраты энергии на эксплуатацию здания в течение срока его жизни, кВт·ч;

S_{ot} – отапливаемая площадь здания, м²;

τ_i – длительность отопительного периода в i –м сезоне, с.;

f_1 – удельная характеристика тепловых потерь здания, Вт/(м²К);

f_2 – мощность внутренних источников тепла в здании, Вт/м²;

f_{mn} – удельная мощность m -й энергоэффективной технологии подключенной в здании в n – м году, Вт/м²;

ΔT_n – средняя разность температур воздуха внутри и снаружи здания в i –м году, К.

Наиболее точно энергоэффективное здание характеризует следующее определение [63,81]:

Энергоэффективное здание - энергетическая система с оптимальным для существующих технико-экономических условий уровнем потребления тепловой энергии и возможностью дальнейшего дополнения оборудованием, снижающим расход энергии при эксплуатации.

Это развивающееся с точки зрения уровня тепловых потерь здание, энергетические характеристики которого изменяются по мере развития энергоэффективных технологий, оставаясь оптимальными по соотношению затрат с получаемой экономией энергии все время жизни здания.

4.2 Технико-экономические условия строительства энергоэффективных зданий

Снижение затрат энергии на отопление и горячее теплоснабжение зданий может быть достигнуто комплексом мероприятий [76, 80 - 81]. Это утепление оболочки здания, утилизация тепла вентиляционных выбросов, сточных вод, оптимизация систем теплоснабжения. В то же время, задача снижения затрат энергии должна быть экономически оправданной. При этом следует различать задачи, решаемые при выполнении пилотных проектов, когда важно определить направление развития энергосберегающих технологий и при подготовке новых нормативных документов, определяющих развитие строительной отрасли на несколько лет. Во втором случае определяющим фактором при выборе энергосберегающих решений является их экономическая целесообразность.

В Советском Союзе основным критерием при выборе инвестиционных проектов был срок окупаемости капитальных затрат [26, 57], т. е. величина отношения:

$$d=3_0/\Delta Э, \quad (1.3)$$

где Z_0 – капитальные затраты, руб.;

$\Delta \mathcal{E}$ – дополнительный годовой доход от внедрения, руб.

При этом нормативный срок окупаемости задавался в пределах 8-12 лет.

В настоящее время используют новые экономические подходы к определению экономической эффективности инновационных мероприятий [58-61], учитывающие предполагаемую доходность вложенных средств. Основным экономическим показателем эффективности вложенных инвестиций может служить полный дополнительный доход, \mathcal{E} , который может быть получен за срок эксплуатации энергосберегающих мероприятий с учетом наращивания под проценты промежуточных доходов от реализации мероприятия, т. е. наращенный доход [58, 61].

Нельзя рассматривать развитие отрасли, в том числе и комплекса энергоэффективных мероприятий, в отрыве от общих тенденций развития общества. В [58, 61] основным предположением при выборе энергосберегающих мероприятий является стабильное состояние общества, т. е. отсутствие инфляционных процессов, стабильные цены на энергоносители, постоянство кредитной ставки в банках. Удовлетворяет ли состояние хозяйственного развития в нашей стране этим условиям? На рисунке 1.4 приведено изменение индекса потребительских цен в стране в течение последних лет [62].

Графики на рисунке 4 наглядно показывают, что наше общество развивается в условиях постоянно действующих инфляционных процессов. Даже в наиболее спокойный период развития, в течение 2004 по 2008 гг. среднегодовой индекс потребительских цен составлял более 1,11, а в 2011 г. прогнозируется на уровне 1,39. С учетом развивающегося мирового финансового кризиса можно прогнозировать в течение трех лет индекс потребительских цен не менее 1,20 в год. Таким образом, рассчитывать на

стабильное развитие общества в ближайшие годы не приходится. Стоимость энергоносителей и энергии в эти годы также не оставалась постоянной. В таблице 5 приведены изменения их стоимости, индекс инфляции и банковский процент при выдаче долгосрочных кредитов в нашей стране в последние годы.

Сведения о стоимости газа получены в департаменте ценовой политики министерства экономики Республики Беларусь, а о стоимости тепловой энергии – в концерне «Белэнерго».

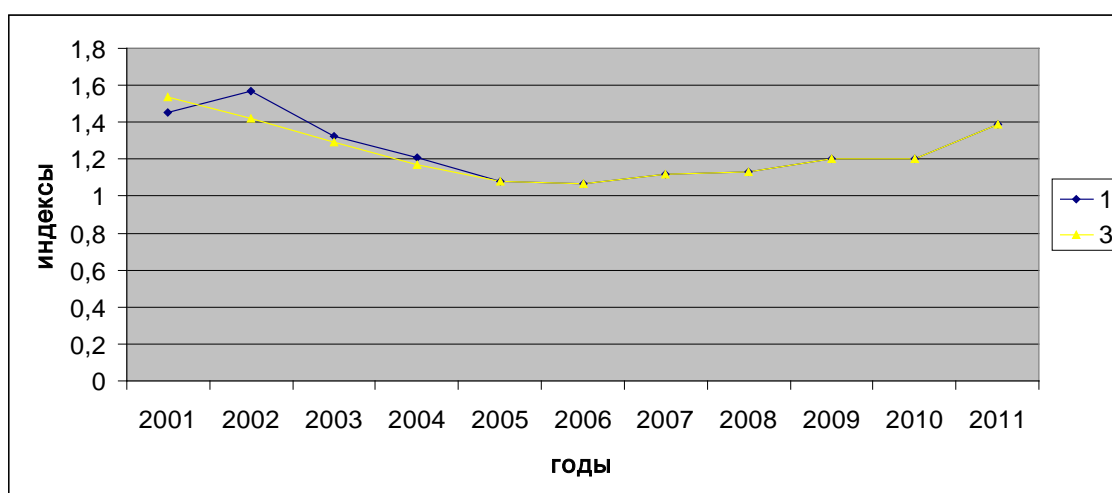


Рисунок 4 – Изменение индекса потребительских цен с 2001 по 2011 гг.:

1, 3 - индекс потребительских цен и цен на техническую продукцию,
соответственно

Приведенные в таблице 5 данные показывают, что среднегодовой рост стоимости энергии в стране превышал в последние годы как проценты по банковским кредитам, так и изменение индекса потребительских цен. Таким образом, в настоящий момент чрезвычайно актуально определить методику определения экономической эффективности энергосберегающих мероприятий в нашем обществе в существующих условиях [83]. Одно из возможных решений – ожидание периода стабильного развития общества, что не грозит нам в ближайшем десятилетии.

Второе – разработка оптимальной стратегии для конкретных условий с учетом изменения стоимости энергетических ресурсов и инфляционных процессов в стране.

Следует отметить, что энергетическая политика в стране в последние 18 лет строилась по второму сценарию.

Таблица 5 – Изменения стоимости, индекса инфляции и ставки рефинансирования [62]

Годы	Стоимость газа (с НДС), тыс. руб.	Стоимость 1 Гкал (с НДС), тыс. руб.	Индекс инфляции, $1/\alpha$	Ставка рефинансирования Нац. Банка
2005	145,6	36,8	1,08	0,13
2006	155,6	41,7	1,066	0,13
2007	307,4	66,8	1,121	0,13
2008	371,7	76,2	1,133	0,13
2009	619,4	112,2	1,2	0,13
2010	622,1	120,7	1,2	0,13
2011	846,5	151,4	1,2	0,13
Коэффициент увеличения стоимости	4,3	3,3	-	-
Среднегодовые значения	1,3	1,3	$\alpha_{\text{ср}} = 0,88$	0,13

4.3 Техничко-экономическая эффективность энергосберегающих мероприятий

В [26] предлагается подход к определению экономически оптимального значения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций здания как значения, минимизирующего разность затрат на выполнение дополнительной теплоизоляции и экономического эффекта, приносимого этим мероприятием в течение некоторого определенного времени. При этом может возникнуть ситуация, что с учетом банковского дисконта это мероприятие никогда не окупится. Условие окупаемости затрат, приведенное в [58], выглядит следующим образом:

$$\Delta \mathcal{E} / \mathcal{Z} > r, \quad (1.4)$$

где r – процентная ставка по кредиту в банке.

Неравенство достаточно очевидно, его смысл в том, что ежегодный экономический эффект, выражаемый в стоимости сэкономленной энергии, должен покрыть выплаты по процентам и частичное погашение основной суммы кредита.

Недостатком предложенных подходов можно считать отсутствие учета увеличения стоимости энергии в течение срока использования мероприятия и учет возможных финансовых кризисов в этот период. В [28-А] предложен подход к расчету экономической эффективности, позволяющий дополнительно учесть прогнозируемую тенденцию изменения стоимости энергии, инфляционные и кризисные явления в экономике. Во время кризиса, как правило, происходит девальвация денег, что приводит к скачкообразному снижению их стоимости. Стоимость энергии может снизиться на кратковременном периоде, но она быстро возвращается к исходному уровню и продолжает расти дальше.

При этом окупаемость энергоэффективного мероприятия в условиях роста стоимости энергетических ресурсов и инфляционных процессов возможна только при условии:

$$\Delta \mathcal{E} / \mathcal{Z}_0 > \alpha(1+r) - (1+r_1) \quad (1.5)$$

Для условия:

$$\alpha(1+r) < (1+r_1) \quad (1.6)$$

срок окупаемости энергоэффективного мероприятия будет равен:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{\Delta\mathcal{E} + Z_0((1+r_1) - \alpha(1+r))}{\Delta\mathcal{E}}\right)}{\ln\left(\frac{1+r_1}{\alpha(1+r)}\right)} \quad (1.7)$$

где r_1 – относительное годовое увеличение стоимости энергоресурсов;

α – коэффициент инфляции в стране.

Из выражения (1.7) следует, что для случая, задаваемого неравенством (1.6), мероприятия по энергосбережению всегда окупаемы [20-А].

На рисунке 5 представлены расчетные составляющие теплового баланса зданий. Здесь представлены здания современной постройки и энергоэффективные здания. Причем, представлены энергоэффективные здания трех поколений: соответствующие современным возможностям строительства (строящиеся в рамках программы энергоэффективного строительства в Республике Беларусь), прогноз для энергоэффективных зданий 2015-2020 гг и 2020 – 2030 гг. постройки. По прогнозу затраты тепловой энергии на отопление и горячее водоснабжение снизятся от 67 кВт·ч/м² в год до 12 кВт·ч/м² в год для энергоэффективных зданий 2020 -2030 гг. строительства. Прогноз строился на предположении, что с течением времени изменяются как составляющие теплового баланса жилых зданий, так и экономически оправданные энергоэффективные технические средства для снижения тепловых потерь жилых зданий. Рассмотрим обоснованность прогноза изменения составляющих теплового баланса. Начнем с мощности внутренних источников тепла. Снижение этой величины связано с двумя процессами:

- уменьшением заселенности жилого фонда зданий (с 21м²/чел до 30м²/чел в 2020г), связанной с реализацией программы жилищного строительства в стране;

- снижением мощности электроприборов, обусловленных техническим прогрессом, в т.ч., переходом к энергосберегающему освещению.

Второе – тепловые потери через ограждающие конструкции зданий. Для существующих в 2009 г. условий оптимальным является сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций зданий около $5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ [80]. По существующим нормативам оно равно $3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ [18]. С увеличением стоимости энергоносителей, повышение степени утепления зданий можно считать неизбежным, что приведет к уменьшению тепловых потерь через наружные ограждения. В то же время, в [83] определена верхняя граница сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций из равенства средней энергии трансмиссионных тепловых потерь значению энергии тепловых поступлений в здание.

**составляющие теплотерь энергоэффективных зданий:
9 этажей, 4 подъезда**

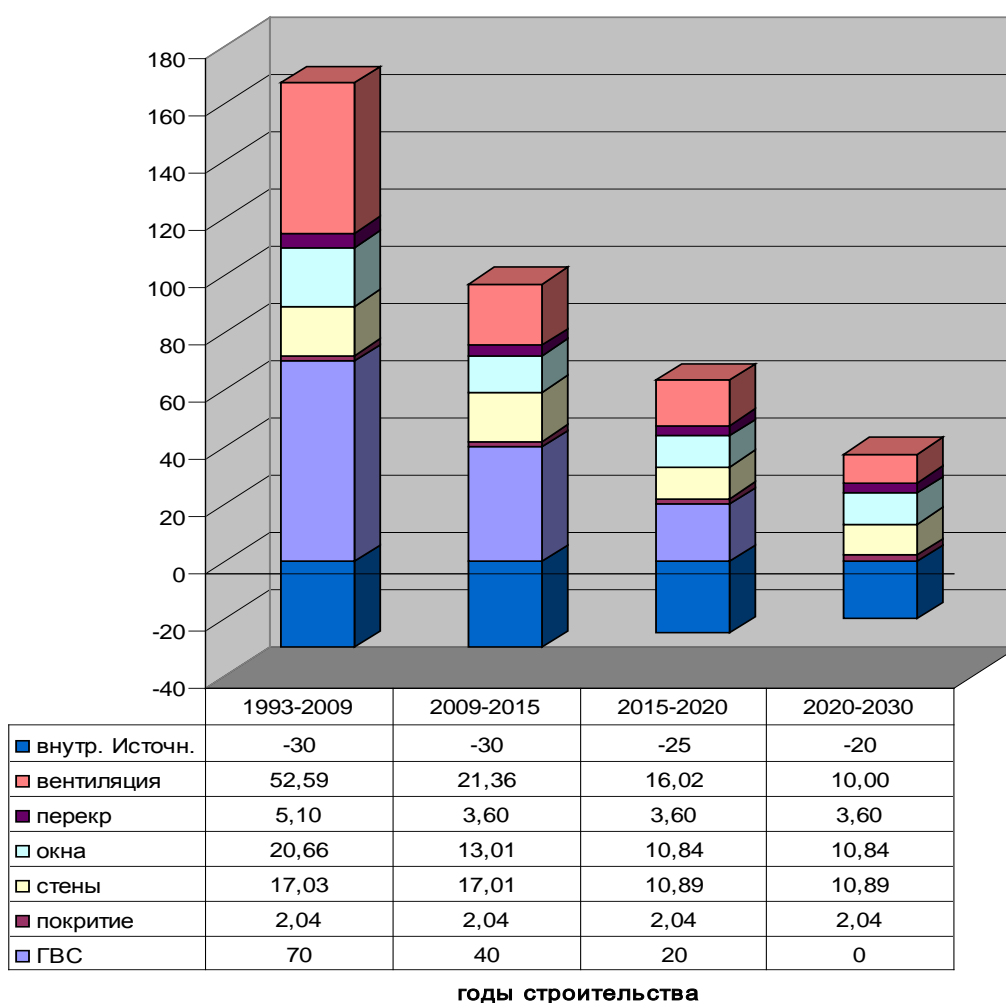


Рисунок 5 - Составляющие теплового баланса энергоэффективных зданий

Уже выпускаются окна с сопротивлением теплопередаче более $1,4 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ [30]. От современных энергоэффективных окон они отличаются наполнением стеклопакета. В стеклопакете вместо аргона используют ксенон или криптон. При использовании нового поколения энергоэффективных окон будут снижены тепловые потери через них, как это указано на рисунке 1.5.

Снижение удельных тепловых потерь с воздухообменом можно прогнозировать как за счет использования более эффективных теплообменников, так и за счет повышения качества строительства, что увеличит герметичность зданий, и снижения кратности воздухообмена по мере уменьшения заселенности зданий.

Уменьшение затрат тепла на горячее водоснабжение зданий в нынешнем поколении энергоэффективных зданий достигается использованием системы утилизации тепла сточных вод [63]. Дальнейшее снижение может быть достигнуто использованием солнечной энергии, вначале – тепловых солнечных коллекторов, а затем фотоэлектрических элементов.

В итоге, в зданиях 15 – 20 гг. постройки можно прогнозировать около $40 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в год, а в энергоэффективных зданиях следующего поколения – менее $15 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в год. Причем, уже сегодня при строительстве энергоэффективных зданий необходимо закладывать технические решения, обеспечивающие возможность подключения энергоэффективных модулей по мере развития технико-экономических условий их применения.

Основным критерием эффективности энергосберегающих мероприятий является срок окупаемости затрат. Используя результаты, полученные в [82], можно показать, что для заданного срока окупаемости при известных экономических условиях отношение стоимости энергии, сэкономленной за год эксплуатации к затратам на выполнение энергосберегающего мероприятия должно быть равно:

$$\frac{\Delta \mathcal{E}}{Z_0} = \frac{(\alpha \cdot (1+r))^n \cdot (\alpha \cdot (1+r) - (1+r_1))}{(\alpha \cdot (1+r))^n - (1+r_1)^n}, \quad (1.8)$$

На рисунке 6 приведено значение зависимости отношения $\Delta \mathcal{E}/Z_0$, рассчитанное из (1.8), с значениями переменных, приведенных в таблице 1.3 от срока окупаемости затрат.

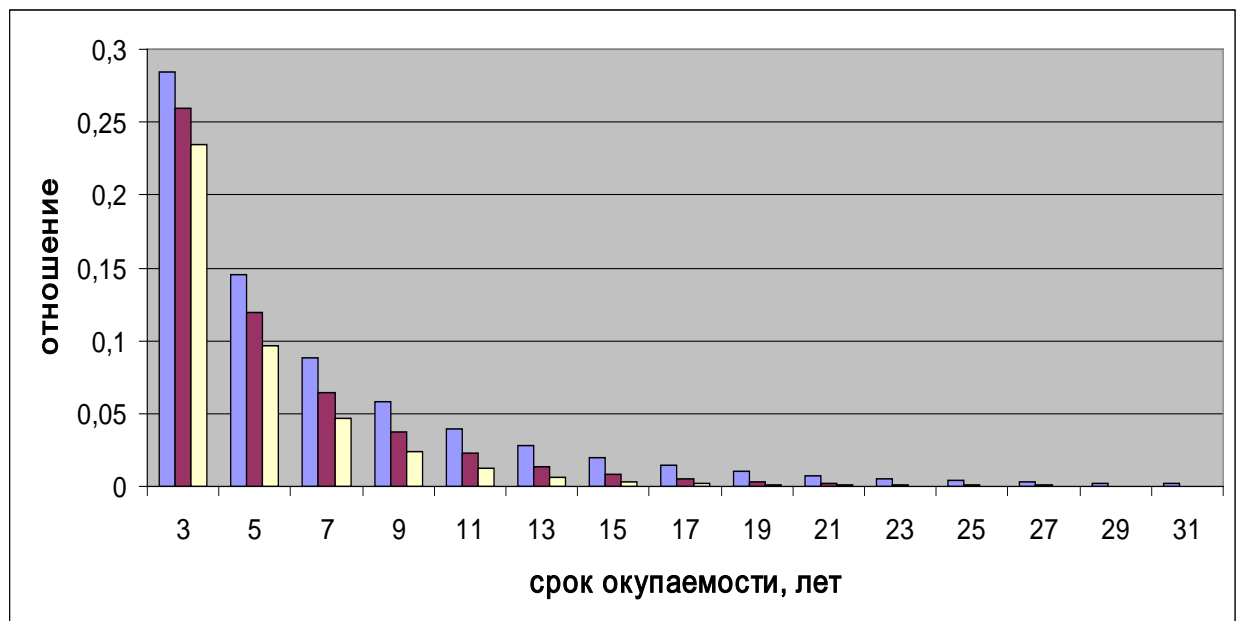


Рисунок 6 - Зависимости отношения $\Delta \mathcal{E}/Z_0$ от срока окупаемости затрат

В таблице 6 приведены сроки окупаемости энергосберегающих мероприятий. Из приведенных данных можно сделать вывод, что в современном варианте энергоэффективного здания, задав срок окупаемости менее 10 лет, нецелесообразно использовать только фотоэлектрические элементы, срок использования которых подойдет через 4–9 лет.

Таблица 6 - Срок окупаемости мероприятий в зависимости от изменения стоимости энергии. $\alpha = 0,88$; $p=0,13$

Энергоэффективная технология	Отношение $\Delta\mathcal{E}/Z_0$	Срок окупаемости, n, лет		
		$r_1=0,15$	$r_1=0,25$	$r_1=0,36$
утилизатор тепла сточных вод	0,4	<3	<3	<3
утепление до $R=5 \text{ м}^2\cdot\text{°C}/\text{Вт}$	0,06	9	7	6
солнечный коллектор	0,06	9	7	6
рекуператор тепла	0,04	11	9	7
фотоэлектрические элементы	0,01	19	14	11

Из результатов, приведенных в таблице 6 и данных на графике рисунка 6 можно сделать вывод, что в стране созданы технико-экономические условия для строительства энергоэффективных зданий с оболочкой, утепленной до $5 \text{ м}^2\cdot\text{°C}/\text{Вт}$, системой приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла вентиляционных выбросов, солнечным коллектором и утилизацией тепла сточных вод. В то же время, следующей энергоэффективной системой может стать система электроснабжения с использованием фотоэлектрических батарей. Ее время, предположительно, начнется с 2020 г.

Выводы

Жилой фонд зданий потребляет при эксплуатации около 40 % вырабатываемой в стране тепловой энергии. Это делает задачу экономии топлива для выработки энергии на отопление и горячее водоснабжение одной из важнейших в энергетической политике.

В пособии определено основное направление развития зданий в сторону минимизации потребления тепловой энергии для нужд эксплуатации путем развития технологии строительства энергоэффективных зданий [63 – 81]. Анализ мирового развития этого направления строительства позволил определить достоинства и недостатки различных подходов к решению этой проблеме и впервые сформулировать понятие энергоэффективного здания как открытой энергетической системы с оптимальным для существующих технико-экономических условий уровнем потребления тепловой энергии и возможностью дальнейшего дополнения оборудованием, снижающим расход энергии при эксплуатации [63, 81].

Такая формулировка обеспечивает возможность проектирования энергоэффективного здания с оптимальными энергетическими параметрами на момент строительства и с возможностью сохранять оптимальности с течением времени по мере развития энергоэффективных технологий.

Технико-экономический анализ существующих в стране условий строительства показал своевременность строительства энергоэффективных зданий [82].

В пособии поставлены следующие актуальные для развития энергоэффективного строительства задачи:

– определение существующего и прогнозирование теплоэнергетического баланса зданий;

- оптимизация теплозащитных свойств оболочки здания с учетом климатических и архитектурных особенностей и соотношения экономии энергии к затратам [83];

- решение задачи поддержания оптимальных температурно-влажностных условий путем выбора рациональной системы принудительной приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла вентиляционных выбросов;

- оптимизация конструкции теплообменника – рекуператора обеспечивающей эффективную работу в конкретных условиях проектирования;

- разработка оптимальных решений использования возобновляемых источников энергии и утилизация вторичных энергоресурсов в энергоснабжении здания;

- корректировка существующей нормативной базы проектирования;

- экспериментальное строительство энергоэффективных зданий и мультипликация полученного опыта.

Литература

1. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П.П. Безруких [и др.]; под общ. ред. А.Б. Яновского и П.П. Безруких. – СПб.: Наука, 2002. – 314 с.
2. Дрейер, О.К. Глобальные проблемы и общий мир: общемировые и региональные проблемы развития/ О.К. Дрейер, Б.В. Лось, В.А. Лось. – М.: Наука, 1991. – 288 с.
3. Васильев, Ю.С. Экология использования возобновляемых энергоисточников/ Ю.С. Васильев, Н.И. Хрисанов. – Ленинград: Издательство ленинградского университета, 1991. – 343 с.
4. Рамочная конвенция ООН об изменении климата. Официальный русский перевод/ Л.Р. Кокорина. – Бразилия, Рио-де-Жанейро, 1992. – 30 с.
5. Справочник по климату СССР, Белорусская ССР, Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1966. – ч.1, вып.7. - 83 с.
6. Андерсон, Б. Солнечная энергия/ Б. Андерсон. – М.: Стройиздат, 1982. – 420 с.
7. Даффи, Дж. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии/ Дж. Даффи, У. Бекман. – М.: Мир, 1977. – 420 с.
8. Мировски, А. Материалы для проектирования котельных и современных систем отопления/ А. Мировски, Г. Ланге., И. Елень. – 1-е изд. – Виссман, 2005. – 294 с.
9. Бутузов, В.А. Солнечные коллекторы в России и на Украине: Конструкции и технические характеристики/ В. А. Бутузов // Теплоэнергетика. – №1. – С. 37 – 40.
10. Валов, М.И. Системы солнечного теплоснабжения/ М.И. Валов, Б.И. Казанджан. – М.: Изд-во МЭИ, 1991. – 140 с.
11. Рекомендации по проектированию установок солнечного горячего водоснабжения для жилых и общественных зданий. – Киев: ЗНИИЭП, 1987 г. – 112 с.
12. Muntwylers Solarhandbuch / Solar Center Muntwyler, 2001. – s. 330.
13. Solarstrom-Pakete für Netzeinspeisung / Wagner & Co, 2002. – s. 183.
14. Селиванов, Н.П. Энергоактивные здания/ Н.П.Селиванов [и др.]. – М.: Стройиздат, 1988. – 376 с.
15. Die Bedeutung der Energieeffizienz und der erneubaren Energien für die Energiesicherheit der Republik Belarus: Konferenz –Zukunftwerkstatt Minsk –

eine Brücke für Energieeffizienz und erneubaren Energien, Minsk, 27 April 2010 / Hotel "Victoria" Schenez, L. – Minsk, 2010. – s. 15.

16. Sharman H. International Energy Agency Key world energy statistics from the IEA / Hugh Sharman. - Paris, 2009. - s. 78.

17. Пилипенко, В.М. Комплексная реконструкция индустриальной жилой застройки/ В.М. Пилипенко. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2007. – 115 с.

18. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-43-2006. – Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. Гос. Ин-т стандартизации и сертификации, 2006. – 35 с.

19. Российская Федерация: СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий.

20. Казахстан: МСН 2.04-02-2004 Тепловая защита зданий.

21. Украина: ДНБ В.2.6-31:2006 Конструкции зданий и сооружений. Тепловая изоляция зданий.

22. Сармунен П. Энергоэффективность зданий. Ситуация в Финляндии// Инженерно-строительный журнал. – №10. –2010. – С. 22-36.

23. Сеппанен О. Требования к энергоэффективности зданий в странах ЕС// Энергосбережение. – №7. – 2010. – С. 15-21.

24. Строительные нормы и правила Российской Федерации. Строительные нормы и правила. Тепловая защита зданий: СНиП 23-02-2003. – Нормативы по теплозащите зданий ТСН 23-313-2000 Тюменской области. Тюмень 2000г.

25. Прохоров, В.И. Проблема единства технологической эффективности, энергосбережения и экологической чистоты в инженерных системах жизнеобеспечения. Концепция. Методология. Решения/ В.И. Прохоров // Проблемы строительной теплофизики систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях. Сб. докл. Четвертой научно – практической конференции, НИИСФ, Москва, 1999г./ Научно-исследовательский институт строительной физики. – М., 1999. – С.11-36.

26. Богословский, В.И. Отопление / В.И. Богословский, А.Н. Сканава. – Москва: Стройиздат, 1991. – С. 98-110.

27. Werner, J. Gute Luft will geplant sein. / J. Werner, M. Laidig. – Impuls-Programm Hessen, Institut Wohnen und Umwelt. – Darmstadt, 2006. – S.86.

28. Васильев, Г.П. Энергетический потенциал вентиляционных выбросов жилых зданий в Москве/ Г.П. Васильев, Н.А. Тимофеев // АВОК. – №4. – 2009. – С.24 – 28.

29. Seppanen, O. Энергоэффективные системы вентиляции для обеспечения качественного микроклимата помещений / O. Seppanen. // АВОК. – № 5. – 2000. – С. 26 – 31.

30. Алексеева, И.Ю. Регулируемая система вентиляции для жилых помещений / И.Ю. Алексеева // АВОК. – № 5. – 2001. – С. 50 – 52.

31. Werner, J. Stand der Entwicklung und Erfahrungen mit Passivhausluftungssystemen / J. Werner, M. Laidig. // Passivhaustagung. – №4. – 2002. – S. 1 – 12.

32. Богословский, В.Н. Системы микроклимата экспериментального многоквартирного жилого дома с эффективным использованием энергии / В.Н.Богословский, В.В. Покотиллов // Проблемы строительной теплофизики систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях. Сб. докл. Четвертой научно – практической конференции, НИИСФ, Москва, 1999 г. / Научно-исследовательский институт строительной физики. – М., 1999. – С.11–36.

33. Отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха: СНБ 4.02.01-03 - – Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. Гос. Ин-т стандартизации и сертификации. – 2003. – 81 с.

34. Feist, W. Das kostengünstige Passivhaus – Proektbeschreibung / W.Feist // Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser. Protokollband. Darmstadt. – №1. – 1996. – S. 9 – 21.

35. Feist, W. Gestaltungsgrundlagen Passivhäuser / W.Feist – Verlag das Beispiel. – 2001. – S.36-45.

36. Von Weizsäcker, E.U. Faktor Vier / E.U. von Weizsäcker, A. B. Lovins, L.H. Lovins. – München, 1996. – s. 352.

37. Feist, W. Passivhaus – Faktor 10 zum Anfassen / W. Feist //Passivhaustagung 10-11. März 2000. – №4. – Kassel. – 2000. – S.11 – 19.

38. Feist, W. Passivhäuser – Behandelbarkeit ohne Heizung / W. Feist //Passivhaustagung 22-23 November 1996. – №1. – Kassel. – 1996. – S. 29– 40.

39. Feist, W. GEPHEUS – Proektinformation № 35/ W.Feist, S. Peper, M. Görg. – Technische Endbereich: Hannover, 2001. – S. 14-18.

40. Spieler, A. Passiv-Verwaltungsgebäude: Erste Betriebserfahrungen mit dem Wagner-Passiv-Solarhaus / A. Spieler // Passivhaustagung 10-11. März 2000. – Kassel. – 2000. – №4. – S.435-441.

41. Строительная климатология: СНБ 2.04.02-2000– Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. Гос. Ин-т стандартизации и сертификации. – 2003. – 81 с.

42. Табунщиков, Ю.А. Энергоэффективные здания / Ю.А. Табунщиков, М. М. Бродач, Н. В. Шилкин. – М.: АВОК-ПРЕСС. – 2003. – 200 с.
43. Табунщиков, Ю.А. Энергоэффективное здание как критерий мастерства архитектора и инженера / Ю. А. Табунщиков. // АВОК. – 2001. – №2. – с.6-8, 10-11.
44. Граник, Ю.Г. Объемно-планировочные решения при формировании новых типов энергоэффективных жилых зданий / Ю. Г. Граник, А. А. Магай, В. С. Беляев. // Энергосбережение. – 2003. – № 4. – С. 79 – 81.
45. E.Juodis Energy efficient building: study material for architecture students / Juodis E. – Vilnius: Technika, 2009. – s.79.
46. Г. Бадьин Строительство и реконструкция малоэтажного жилого дома / Бадьин Г. – СПб.: БХВ_Петербург, 2011. – 432 с.
47. И. Габриэль, Реконструкция зданий по стандартам энергоэффективного дома / Габриэль И., Ладенер Х. – СПб.: БХВ_Петербург, 2011. –480 с.
48. Costa Andrea Integrated design process for affordable net-zero-energy buildings - 14.internationale Passivhaustagung 2010, Dresden – 2010. – S.485-488.
49. Zsuzsa S. Limits to reducing energy use - 14.internationale Passivhaustagung 2010,Dresden – 2010. – S.491-496.
50. Елохов, А.Е. Отчет о командировке в Германию «Пассивный дом – миф или реальность» Технологии проектирования и строительства энергоэффективных зданий Passive House, 11-12 апреля 2012 г. – Москва.
51. Ronacher Herwig Passivhaus und EnergiePlusHaus – Potenziale für Regionaltypische Architektur – 14.internationale Passivhaustagung 2010, Dresden, – 2010. – S. 525-526.
52. Regner Pia Erkenntnisse aus der Nachbetreuung der Plusenergie-Dreifach-Sporthalle - 14.internationale Passivhaustagung 2010, Dresden. – 2010. – S. 203-208.
53. Панитков О.И. Первый Активный дом в Австрии как часть программы Модельный Дом 2010 Технологии проектирования и строительства энергоэффективных зданий Passive House, 6-7 апреля 2011 г., Москва. – 2011. – С. 23-25.
54. Леонова В.А. Развитие индивидуального домостроения в России: проект «Активный дом» Технологии проектирования и строительства энергоэффективных зданий Passive House, 6-7 апреля 2011 г., Москва. – С.26–29.

55. Елохов А.Е. Развитие концепции пассивного дома. Пилотные проекты в РФ. Технологии проектирования и строительства энергоэффективных зданий Passive House, 3-4 апреля 2013 г., Москва. – С.57–64.
56. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Справочное пособие. - М.: Пантори, 2003. – 340 с.
57. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений и новой техники в народном хозяйстве СССР. –М.: АН СССР, 1966. – 89 с.
58. Гагарин, В.Г. Методы экономического анализа повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий / В.Г. Гагарин // АВОК. – 2009. – №1. – С. 10-16.
59. Богословский, В.Н. Аспекты создания здания с эффективным использованием энергии /В.Н. Богословский //АВОК. – 2000. – №5. – С. 34–39.
60. Табунщиков, Ю.А. Энергоэффективные здания: мировой и отечественный опыт / Ю.А. Табунщиков //Энергия, экономика, техника, экология. – 2004. – № 10. – С. 20–29.
61. Дмитриев, А.Н. Руководство по оценке экономической эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия / А.Н. Дмитриев, Ю.А. Табунщиков, И.Н. Ковалев, Н. В. Шилкин. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2005. – 120 с.
62. Справочная информация: ставка рефинансирования, учетная ставка Национального банка Республики Беларусь; справочная правовая система Консультант плюс. – Минск, 2014.
63. Данилевский, Л.Н. Принципы проектирования и инженерное оборудование энергоэффективных жилых зданий /Л.Н. Данилевский. – Минск: Бизнесофсет, 2011.- 375 с.
64. Данилевский, Л.Н. Повышение энергоэффективности зданий/ Л.Н. Данилевский // Архитектура и строительство. – 2005. – №4. – С. 106-108.
65. Данилевский, Л.Н. К вопросу о снижении уровня теплопотерь здания / Л.Н. Данилевский // Опыт Белорусско-Германского сотрудничества в строительстве. – Минск: НПООО Стринко, 2000. – С. 76-77.
66. Данилевский, Л.Н. Тенденция развития современного энергосберегающего строительства / Л.Н. Данилевский // Опыт Белорусско-Германского сотрудничества в строительстве. – Минск: НПООО Стринко. – 2000. – С. 83-85
67. Данилевский, Л.Н. Перераспределение световых потоков для оптимизации освещения помещения. Перспективы использования осветительных систем на основе не изображающие оптики. / Л.Н.

Данилевский // Нетрадиционные энергоэффективные системы освещения в жилых, общественных и производственных зданиях: материалы научно-технической конференции, Минск, 29-30 апреля 1997г. / Научно-исследовательское и проектно-технологическое республиканское унитарное предприятие «Институт НИПТИС». – Минск, 1997. – С. 3-19.

68. Данилевский, Л.Н. Измерение фактических энергетических характеристик жилых зданий / Л.Н. Данилевский // Архитектура и строительство. – 2006. – №1. – С. 118 – 123.
69. Danilevski, L. Perspectives of the passive house standard in Belarus / L. Danilevski // 8 Europäische Passivhaustagung, Krems, Österreich, 16-17 april 2004. / Zentrum für Bauen und Umwelt, Donau – Universität Krems. – Krems, 2004. - S.631-634.
70. Данилевский, Л.Н. Пассивный дом – Итоги и перспективы / Л.Н. Данилевский // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2006. – №10. – С. 72-73.
71. Данилевский, Л.Н. Пассивный дом – Итоги и перспективы / Л.Н. Данилевский // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2006. – №11. – С. 64-65.
72. Данилевский, Л.Н. Пассив в актив. Цель – нулевое энергопотребление / Л.Н. Данилевский, Д. Жуков // Архитектура и строительство. – 2000. – С. 37-39.
73. Данилевский, Л.Н. Пассивный дом – основное направление энергоэффективного строительства / Л.Н. Данилевский // Архитектура и строительство. – 2006. – №5. – С.106-109.
74. Данилевский, Л.Н. Эффективное использование систем вентиляции в современных зданиях/ Л.Н. Данилевский // Энергоэффективность. – 2002. – №5. – С. 19-20
75. Данилевский, Л.Н. Системный подход к энергосбережению в жилых зданиях/ Л.Н. Данилевский // Опыт Белорусско-Германского сотрудничества в строительстве. – Минск: НПООО Стринко, 2000. – С. 108-112.
76. Данилевский, Л.Н. Пассивный или Энергоэффективный? / Л.Н. Данилевский // Теплоэнергоэффективные технологии. – 2010. – № 1-2. – С. 20-23
77. Данилевский, Л.Н. От пассивного к энергоэффективному дому / Л.Н. Данилевский // Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 61 - 63
78. Данилевский, Л.Н. Особенности проектирования ограждающих конструкций и длительность отопительного периода энергоэффективных

- зданий / Л.Н. Данилевский // Строительная наука и техника. – 2008. – № 1. – С.35-42.
79. Данилевский, Л.Н. Методика расчета экономической целесообразности энергоэффективных мероприятий / Л.Н. Данилевский // Строительная наука и техника. – 2009. – № 5. – С. 12–17.
80. Данилевский, Л.Н. Опыт строительства и эксплуатации первого энергоэффективного здания в Республике Беларусь и перспективы развития / Л.Н. Данилевский, В.М. Пилипенко // Сборник РААСН. – 2011. – С. 37-45.
81. Данилевский, Л.Н. Методы экономии энергии при отоплении зданий. / Л.Н. Данилевский // С.О.К. – 2013. – №10. – С. 80-88.
82. Данилевский, Л. Н. Опыт массового внедрения систем управления теплоснабжением на предприятиях бюджетной сферы // Опыт и перспективы санации существующих жилых домов крупнопанельного строительства в странах Средней, Южной, Восточной ЕВРОПЫ (МОЕ/NUS): тез. докл., Минск, 2 – 6 июня 2000. – Минск, 2000. – С. 1 – 3.
83. Данилевский, Л.Н. Исследование эффективности канальных теплообменников-рекуператоров воздух-воздух / Л.Н. Данилевский, Б.И. Таурогинский // Строительная наука и техника. – 2006. – №4(7). – С.36-41
84. Данилевский, Л.Н. Экспериментальное определение составляющих теплового баланса жилых зданий / Л.Н. Данилевский // Архитектура и строительство. – 2008. – №8. – С.90 – 95.