

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»

**А.В. Захаров, Е.Н. Сычкина,  
А.Б. Пономарев**

## **ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

*Утверждено  
Редакционно-издательским советом университета  
в качестве электронного учебного пособия*

Издательство  
Пермского национального исследовательского  
политехнического университета  
2017

УДК 697.4: 621.577  
3-38

Рецензенты:

канд. техн. наук *В.И. Клевеко*  
(ООО «НПФ «Стройэксперт»», г. Пермь);  
канд. техн. наук, доцент *С.В. Калошина*  
(Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет)

**Захаров, А.В.**

3-38 Энергоэффективные конструкции в строительстве [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / А.В. Захаров, Е.Н. Сычкина, А.Б. Пономарев. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2017. – 103 с. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Windows XP и выше; программа для просмотра PDF-файлов; привод CD-ROM.

ISBN 978-5-398-01816-5

Изложены общие сведения о методах использования тепловой энергии грунта и об энергоэффективных конструкциях зданий и сооружений. Рассмотрены принципы работы энергоэффективных конструкций и технологии их устройства.

Предназначено для обучающихся по профилям подготовки магистратуры «Подземное и городское строительство», «Техническая эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений», «Организационно-технологические решения в строительстве», «Инновационные технологии малоэтажного строительства», а также для студентов направления «Строительство» очной формы обучения.

УДК 697.4: 621.577

ISBN 978-5-398-01816-5

© ПНИПУ, 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ</b> .....	6
1.1. Классификация возобновляемых источников энергии .....	7
1.2. Геотермальные системы .....	8
1.2.1. Классификация геотермальной энергии .....	9
1.2.2. Общий принцип работы геотермальных систем .....	10
1.2.3. Основные виды первичного контура геотермальных систем .....	13
1.2.4. Тепловые насосы .....	25
1.2.5. Низкотемпературные системы отопления и охлаждения зданий .....	26
1.3. Основные положения термодинамики грунтов .....	28
1.4. Методы расчета энергоэффективных подземных конструкций .....	32
1.4.1. Аналитические методы расчета энергоэффективных подземных конструкций .....	32
1.4.2. Численные методы расчета энергоэффективных подземных конструкций .....	36
1.5. Мероприятия по повышению энергоэффективности ограждающих конструкций зданий .....	37
1.5.1. Энергоэффективные архитектурно-планировочные и объемно-пространственные решения .....	39
1.5.2. Энергоэффективные строительные материалы .....	41
1.5.3. Энергоэффективные строительные технологии и системы .....	57
1.5.4. Энергосберегающие окна .....	94
1.5.5. Вентиляция помещений энергоэффективного здания .....	96
<b>2. ПРИМЕР РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ</b> .....	98
<b>3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ</b> .....	99
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	100
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ. ФОРМА ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ОТЧЕТА ПО РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ</b> .....	102

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач, стоящих перед специалистами-геотехниками, является повышение эффективности применяемых конструкций зданий и сооружений за счет разработки и внедрения в практику строительства энергоэффективных конструктивно-технологических решений.

Энергоэффективность – это полезное (рациональное) использование энергетических ресурсов с целью оптимизации количества используемой энергии для сохранения постоянного уровня энергообеспечения здания или сооружения [11].

В настоящее время энергоэффективные конструкции зданий и сооружений успешно применяют в Канаде, США, большинстве европейских стран, а также в странах с тропическим климатом. В России технологии энергосбережения стали более интенсивно внедряться в строительную практику с 1996 г. после принятия Федерального закона «Об энергосбережении» от 03.04.96 № 28-ФЗ. В соответствии с положениями этого закона постановления Минстроя России № 18–81 от 11.08.95 и № 18–8 от 19.01.98 были утверждены Изменения № 3 и № 4 к СНиП II-3–79 «Строительная теплотехника» и введен в действие СНиП 23-02–2003 «Тепловая защита зданий», а затем его актуализированная редакция – СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [16]. В указанных документах предусматривалось ужесточение требований к приведенному сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций зданий, а также классификация зданий и сооружений по энергоэффективности. Рост цен на тепловую энергию и энергоносители также определяет необходимость повышения теплозащиты зданий и сооружений на этапе их эксплуатации. Несмотря на это, энергоэффективные технологии пока широко не применяются в практике строительства в нашей стране.

По некоторым данным, энергопотребление при эксплуатации существующих жилых и общественных зданий и сооружений в России примерно в три раза превышает аналогичные показатели в передовых зарубежных странах со сходными климатическими и инженерно-геологическими условиями. Среди основных причин нерационального расходования тепловой энергии в нашей стране можно отметить:

- несовершенство нерегулируемых систем естественной вентиляции;
- недостаточное теплоизоляционное качество окон и балконных дверей;
- несовершенные архитектурно-планировочные и инженерные решения отапливаемых лестничных клеток и лестнично-лифтовых блоков;

– недостаточное теплоизоляционное качество наружных стен, покрытий и перекрытий подвалов и чердаков;

– устаревшие типы котельного оборудования, несовершенные системы отопления и горячего водоснабжения, отсутствие приборов учета, контроля и регулирования указанных систем;

– чрезвычайно развитая сеть наружных теплотрасс с недостаточной тепловой изоляцией;

– отсутствие действенного механизма материальной заинтересованности энергопотребителей в экономии тепловой энергии;

– недостаточное использование нетрадиционных источников энергии.

Таким образом, для повышения энергоэффективности как существующих, так и вновь возводимых зданий и сооружений необходим системный подход и экономически обоснованный комплекс взаимосвязанных и взаимозависимых энергосберегающих мероприятий градостроительного, архитектурно-планировочного, конструктивного, инженерного и эксплуатационного характера.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Цель проектирования и строительства энергоэффективных зданий заключается в эффективном использовании энергоресурсов, затрачиваемых на энергоснабжение здания, путем принятия экономически обоснованных инновационных решений. Методология проектирования энергоэффективного здания должна быть основана на системном анализе здания как единой энергетической системы.

На данный момент не существует единой классификации зданий по энергопотреблению. В Европе получила распространение следующая классификация:

- энергосберегающие дома низкого потребления (годовой расход тепла 70–30 кВт·ч/м<sup>2</sup>);
- энергосберегающие дома ультранизкого потребления (годовой расход тепла 30–15 кВт·ч/м<sup>2</sup>);
- энергопассивные дома (годовой расход тепла до 15 кВт·ч/м<sup>2</sup>);
- энергосберегающие дома (годовой расход тепла сведен к 0);
- энергоэффективные дома (вырабатывают энергии больше, чем потребляют).

В действующем СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [16] применяется схожая классификация энергоэффективности зданий (табл. 1).

Таблица 1

Классы энергосбережения зданий согласно СП 50.13330.2012  
«Тепловая защита зданий» [16]

Обозначение класса энергетической эффективности	Наименование класса энергетической эффективности	Величина отклонения значения удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания от нормируемого, %
A++ A+ A	Очень высокий	Менее –60 От –50 до –60 От –40 до –50
B+ B		От –30 до –40 От –15 до –30
C+ C C–		От –5 до –15 От +5 до –5 От +15 до +5
D	Пониженный	От +15,1 до +50
E	Низкий	Более +50

На фоне возрастающего интереса к повышению энергоэффективности можно отметить приоритетные направления повышения энергоэффективности зданий:

- эффективная теплоизоляция ограждающих конструкций;
- уменьшение длины теплопроводов;
- применение источников возобновляемой энергии (лучистая энергия солнца, энергия ветра, тепловая энергия грунта);
- повышение эффективности систем отопления;
- эффективное планирование участка застройки и выбор энергосберегающей формы здания;
- использование систем принудительной вентиляции с рекуперацией;
- эффективная компьютерная система управления расходом энергии.

В соответствии с принципами системного анализа при проектировании энергоэффективного здания необходимо рассматривать две независимые энергетические подсистемы [17]:

- 1) наружный климат как источник энергии;
- 2) здание как единая энергетическая система.

Анализ первой подсистемы позволяет произвести расчеты энергетического потенциала наружного климата и определить методы его использования для тепло- и холодоснабжения здания или сооружения. Анализ второй подсистемы позволяет определить характеристики архитектурно-конструктивных, теплотехнических или энергетических показателей здания как единой энергетической системы [17].

## **1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

Мировой опыт показывает, что в настоящее время некоторые страны успешно решают проблему энергообеспечения путем внедрения возобновляемых источников энергии, которые более эффективны по сравнению с традиционными энергоустановками топливной энергетики.

Возобновляемые источники энергии – это энергоресурсы постоянно существующих природных процессов на планете, а также энергоресурсы продуктов жизнедеятельности биоценозов растительного и животного происхождения [12]. Главной особенностью возобновляемых источников энергии является их неистощаемость либо способность восстанавливать свой потенциал за короткое время.

Классификация возобновимых источников энергии:

- 1) механическая энергия (ветра и потоков воды);

2) тепловая и лучистая энергия (энергия солнечного излучения и тепла Земли);

3) химическая энергия (энергия, заключенная в биомассе) [12].

По величине коэффициента полезного действия возобновляемые источники механической энергии характеризуются высоким качеством и используются для производства электроэнергии. Для гидроэнергии коэффициент полезного действия изменяется в пределах 0,6–0,7, для ветровой энергии – 0,3–0,4. Для тепловых и лучистых источников энергии значение коэффициента полезного действия не превышает 0,3–0,35. Еще более низкие значения имеет солнечное излучение, используемое для фотоэлектрического преобразования – 0,15–0,3. Коэффициент полезного действия энергии биотоплива также является относительно низким и не превышает 0,3.

Целесообразность использования возобновляемых источников энергии определяется их экономической эффективностью и конкурентоспособностью по сравнению с традиционными энергетическими технологиями. Среди основных преимуществ возобновляемых источников энергии можно отметить их неисчерпаемость, повсеместное распространение, экологичность. Кроме того, возобновляемые источники энергии зачастую могут быть более эффективны в малых автономных энергосистемах, чем энергоисточники, использующие дорогое привозное органическое топливо. Однако внедрение систем, использующих возобновляемые источники энергии, требует значительных капиталовложений.

В отдаленной перспективе роль возобновляемых источников энергии может существенно возрасти в глобальном масштабе, и в настоящее время в ряде стран осуществляются комплексные исследования долгосрочных перспектив развития энергетики мира и его регионов.

Далее более подробно рассмотрены геотермальные системы, в основе которых лежит использование возобновляемой тепловой энергии грунта.

## 1.2. ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Вопрос использования геотермальных ресурсов (тепловой энергии грунта) интересует ученых на протяжении более полутора веков. Одним из первых исследователей в этом направлении был Питер Риттер фон Риттенгер, который в 1855 г. изобрел тепловой насос, позволяющий «извлекать» тепловую энергию из грунтового массива. Несмотря на продолжительность исследований данного вопроса, базирующиеся на них технологии сравнительно молоды. Интенсивное внедрение таких систем началось

в 80-х гг. прошлого столетия в Австрии и Швейцарии. Толчком для развития послужили экономический кризис ближайшего будущего, связанный с возможным исчерпанием энергоресурсов, и набирающее обороты экологическое движение в мире. Это стимулировало исследования в области поиска альтернативных, неуглеводородных, источников энергии. В таких условиях технологии, использующие геотермальную энергию, не могли остаться незамеченными, поскольку данные системы применяют экологически чистую и возобновляемую тепловую энергию грунта.

### 1.2.1. Классификация геотермальной энергии

Системы, использующие геотермальную энергию, имеют широкую область применения. В частности, их используют для отопления и кондиционирования зданий, обогрева мостов и дорожного полотна, туннелей метрополитенов и других инженерных сооружений.

Классификация геотермальной энергии по видам отражена на рис. 1.



Рис. 1. Виды геотермальной энергии

Как видно из рис. 1, геотермальная энергия бывает двух типов: высокопотенциальная и низкопотенциальная.

Первая в зависимости от способа применения подразделяется на гидротермальную и петротермальную.

Гидротермальная система использует природные водные ресурсы (например, горячий водоносный горизонт). Полученная энергия может использоваться напрямую (тепло в отопительных системах) или косвенно – электричество, вырабатываемое паровыми турбинами.

При петротермальном методе энергию добывают из горячего горизонта горной породы в следующем порядке: сначала проходят скважины глубиной в несколько тысяч метров, затем в породу под давлением закачивают воду в качестве теплоносителя системы. На следующем этапе энергия в виде водяного пара поступает вверх по соседней скважине. Полученная энергия находит применение в паровых турбинах, используемых для производства электричества, либо в отопительных системах [10].

Для добычи низкопотенциальной энергии грунта используют скважины, глубина которых не превышает 400 м. При данной глубине температура грунта увеличивается примерно на 3 °С на каждые 100 м глубины. Такую энергию нельзя использовать напрямую, поэтому для отопления и горячего водоснабжения температуру повышают до необходимого значения при помощи теплового насоса [23].

В настоящее время данные технологии широко применяют во многих странах, таких как: Канада, Австралия, США, большинство европейских стран, имеются примеры внедрения в странах с тропическим климатом.

Наряду с важным экологическим аспектом эти системы имеют большой ряд преимуществ:

- позволяют снизить расход электроэнергии на 50–70 % для отопления и кондиционирования зданий;
- возможность использования фундаментов зданий, необходимых с конструкционной точки зрения, в качестве грунтовых теплообменников;
- несмотря на такие же (или немного более высокие) затраты при монтаже, как у обычных систем, они имеют меньшие текущие расходы в процессе эксплуатации.

Низкопотенциальное тепло земли может использоваться в различных типах зданий и сооружений многими способами: для отопления, горячего водоснабжения, кондиционирования (охлаждения) воздуха, обогрева дорожек зимой, для предотвращения обледенения, подогрева полей на открытых стадионах [1]. При этом на эффективность использования теплоты грунта ключевое влияние будут оказывать геологические, гидрологические и климатические условия территории строительства энергоэффективного здания.

### **1.2.2. Общий принцип работы геотермальных систем**

Системы, использующие тепловую энергию грунта, в основном состоят из трех частей:

- 1) системы трубопроводов, погруженных в грунтовый массив или контактирующих с грунтом (первичный контур);

2) системы трубопроводов, предназначенных для отопления или кондиционирования (вторичный контур);

3) теплового насоса, объединяющего эти системы трубопроводов [22].

*Первичный контур* служит для получения тепловой энергии грунта и располагается, как правило, в теле энергоэффективных фундаментов (ЭЭФ) или других подземных сооружений.

Наряду с энергоэффективными фундаментами в качестве первичного контура могут применяться и грунтовые теплообменники, состоящие из одной или нескольких *U*-образных петель, погружаемых в специально пробуренные скважины, и открытые системы, использующие воду из водоносного слоя.

Процесс теплопередачи в открытых системах более эффективный, чем в теплообменниках, однако данные системы не получили широкого применения ввиду значительных эксплуатационных расходов, обусловленных частым засорением трубопроводов [22].

*Вторичным контуром* является замкнутая система отопления в дорожном покрытии, в стенах и перекрытиях здания, в покрытии мостовых пролетов и т.д.

Схема системы, использующей тепловую энергию грунта, представлена на рис. 2.

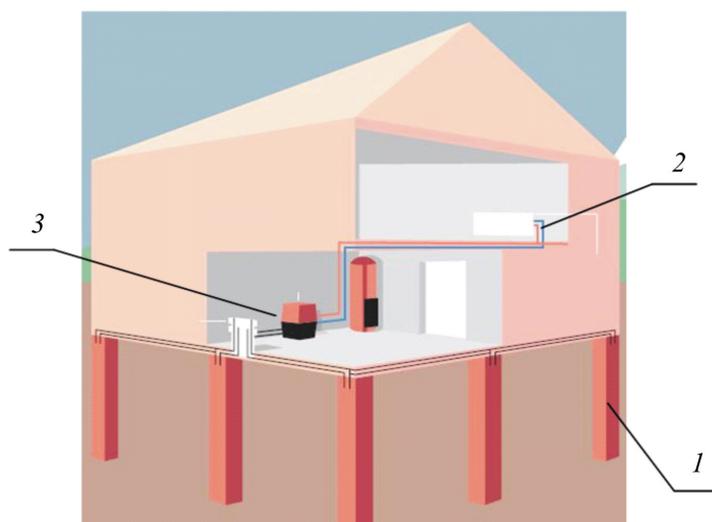


Рис. 2. Принципиальная схема систем с использованием тепловой энергии грунта: 1 – энергоэффективный фундамент; 2 – система отопления или кондиционирования здания; 3 – тепловой насос

*Тепловой насос* предназначен для того, чтобы повысить температуру теплоносителя из первичного контура до необходимой в пределах 25–35 °С.

Экономическая целесообразность применения энергоэффективных фундаментов в основном обуславливается распределением температурного поля в грунте. В большинстве регионов Европы температура грунта на глубине ниже 10–15 м в течение года остается относительно постоянной. На глубине около 50 м преобладают температуры 10–15 °С [22], они позволяют осуществлять экономичное отопление и охлаждение посредством энергоэффективных подземных конструкций.

В тропиках постоянная температура грунта на глубине более 10–15 м от поверхности варьируется между 20 и 25 °С (местами даже 28 °С), что позволяет охлаждать здания до приемлемых температур по сравнению с температурой наружного воздуха 40–45 °С.

Температура грунтового массива на глубине более 10–30 м в Пермском крае составляет 6–7 °С [14], в центральной части России (Москва, Ростов) – 10–12 °С.

Применимость систем в тех или иных геотермальных условиях, как правило, определяется либо расчетным путем, либо экспериментальным путем посредством устройства контрольных наблюдательных скважин с фиксацией необходимых параметров в интересующий период.

Исследования, проведенные зарубежными авторами, в области применения энергоэффективных фундаментов (ЭЭФ) в климатических и гидрогеологических условиях Европы и Северной Америки, показали:

1. Если системы используются только для отопления или только для кондиционирования, то наиболее благоприятными условиями будут грунты с высоким коэффициентом фильтрации и грунтовые воды с высоким гидравлическим градиентом. В случае, если система будет выполнять двойную функцию – отопление в зимний период и кондиционирование в летний, преимущество будут иметь связные грунты с низким коэффициентом фильтрации и грунтовые воды с низким градиентом напора.

2. Для водонасыщенных грунтов требуется меньшая площадь теплообменника (соответственно, геометрические размеры фундаментов), чем для сухих грунтов.

3. Экономическая эффективность энергоэффективных фундаментов увеличивается с увеличением глубины их заложения. Экономически минимальная глубина заложения фундаментов (свай, «стен в грунте») должна быть не менее 6,0 м.

4. Получение электроэнергии от использования ЭЭФ возможно, но нерационально. Энергоэффективные фундаменты имеют довольно высокий КПД (до 70 %) при получении тепловой энергии и низкий – при получении электроэнергии [22].

### 1.2.3. Основные виды первичного контура геотермальных систем

#### Поверхностные горизонтальные теплообменники

Поверхностные (горизонтальные) грунтовые теплообменники (рис. 3) являются наиболее распространенным вариантом геотермальных теплообменников. Они состоят из системы труб, уложенных параллельно поверхности земли.



Рис. 3. Схема горизонтального грунтового теплообменника

Среди основных преимуществ данного вида теплообменников можно отметить:

- сравнительно низкие инвестиционные затраты;
- высокий сезонный коэффициент полезного действия;
- простой монтаж;
- низкую глубину монтажа без нарушения водного баланса [7].

Такая разновидность грунтового коллектора наиболее пригодна для зданий, расположенных на относительно больших земельных участках. Например, для хорошо теплоизолированного многоквартирного дома жилой площадью  $150 \text{ м}^2$  и потребностью в тепле  $7,5 \text{ кВт}$  для размещения горизонтального грунтового теплообменника требуется земельный участок площадью около  $250 \text{ м}^2$  [13].

В зависимости от условий отдельные циркуляционные теплообменники укладываются на расстоянии от  $0,5$  до  $0,8 \text{ м}$  (а при диаметре труб  $40 \text{ мм}$  – на расстоянии от  $1,2$  до  $1,5 \text{ м}$ ), аналогично системе напольного отопления. Некоторые значения для расчетов размеров теплообменников горизонтального типа приведены в табл. 2 [9].

Референтные значения для расчета размеров теплообменников горизонтального типа [9]

Тип грунта	Удельная мощность отведения $q_E$		Расстояние между прокладываемыми трубами, м	Глубина установки, м	Расстояние до подводящих труб, м
	при 1800 Вт/м <sup>3</sup>	при 2400 Вт/м <sup>3</sup>			
Несвязный, сухой	10	8	1	1,2–1,5	> 0,7
Связный, илистый	10–30	16–24	0,8	1,2–1,5	> 0,7
Несвязный, насыщенный водой	40	32	0,5	1,2–1,5	> 0,7

Подающие и обратные трубы отдельных теплообменников сходятся в распределительные колодцы или коллекторы и подводятся к тепловому насосу. Важным преимуществом теплообменников горизонтального типа являются относительно низкие инвестиционные затраты при относительно высоком сезонном коэффициенте полезного действия. Для монтажа такой системы необходимо запланировать относительно большую открытую площадку [20].

До 99 % тепловой энергии, полученной из грунта с помощью грунтовых теплообменников горизонтального типа, составляет накопленная в грунте солнечная энергия, а не энергия ядра Земли. В связи с этим решающим фактором эффективной работы системы является контакт с поверхностью Земли. В зимний период количество чистой солнечной энергии, передающееся в грунт, является минимальным, а извлечение теплоты грунтовыми теплообменниками с помощью тепловых насосов – максимальным. Извлеченная энергия является солнечной энергией, накапливаемой в грунте в течение летнего периода. Для того чтобы горизонтальный теплообменник использовал данную энергию, необходимо располагать его ниже уровня промерзания грунта [9].

Эффективность грунтового теплообменника горизонтального типа зависит главным образом от влажности грунта. В песчаном грунте поры между твердыми частицами велики и эффекты капиллярного поднятия не развиваются, поэтому дождевая вода быстро просачивается в более глубокие слои. Таким образом, песчаные грунты, как правило, имеют небольшие значения природной влажности и их теплопроводность невелика. В глинистом грунте сила капиллярного поднятия

достигает максимальных значений, поэтому влажность глинистого грунта может превышать 35 %, что обеспечивает его хорошую теплопроводность [8].

В режиме отопления теплообменники горизонтального типа извлекают теплоту из окружающего грунтового массива так, что грунт охлаждается до температуры ниже природной.

### Энергетические корзины

Энергетическая корзина представляет собой разновидность теплообменника горизонтального типа. Энергетические корзины (рис. 4) используются на объектах, где невозможно устройство фундаментов глубокого заложения, или в случае недостатка свободного места на площадке строительства.

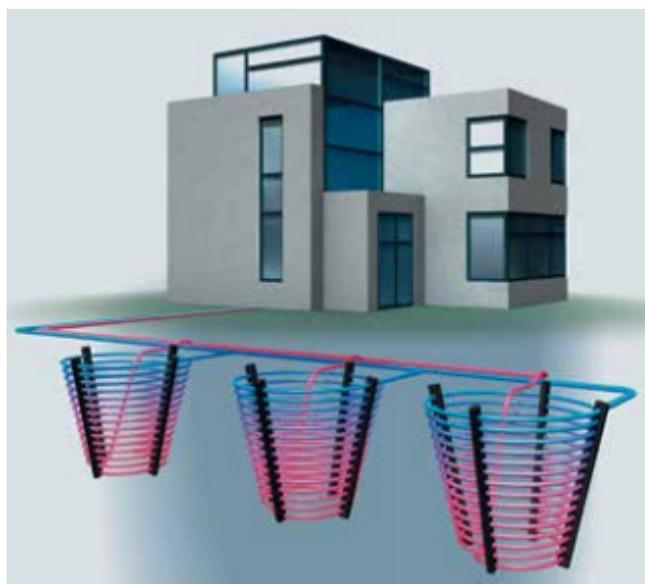


Рис. 4. Схема геотермальной системы с использованием энергетической корзины

Такая конструкция теплообменника может быть использована для одно- и многосемейных зданий и предназначена для эксплуатации на глубине от 1 до 4 м, т.е. в непосредственной близости к поверхности грунта, где происходят сезонные колебания уровня температуры. На такой глубине погодные условия на 100 % влияют на температуру грунтового массива. В жаркие летние месяцы низкая температура грунтового массива может быть использована для пассивного охлаждения с применением только циркуляционного насоса. Это решение обеспечивает минимальный расход энергии и является наиболее рентабельным по сравнению с традиционными вариантами организации кондиционирования.

Преимущества энергетических корзин:

- энергетическая корзина является экономически эффективной альтернативой в сфере использования геотермальной энергии;
- требуется небольшая площадь при эффективном использовании объема грунта (в среднем на 60 % меньше площади установки сопоставимой системы горизонтальных теплообменников);
- небольшая глубина установки;
- переменное использование грунта для нагрева и охлаждения создает энергетический баланс в грунтовом массиве и гарантирует работу источника энергии в течение длительного времени [1].

Последовательность монтажа энергетической корзины приведена на рис. 5.

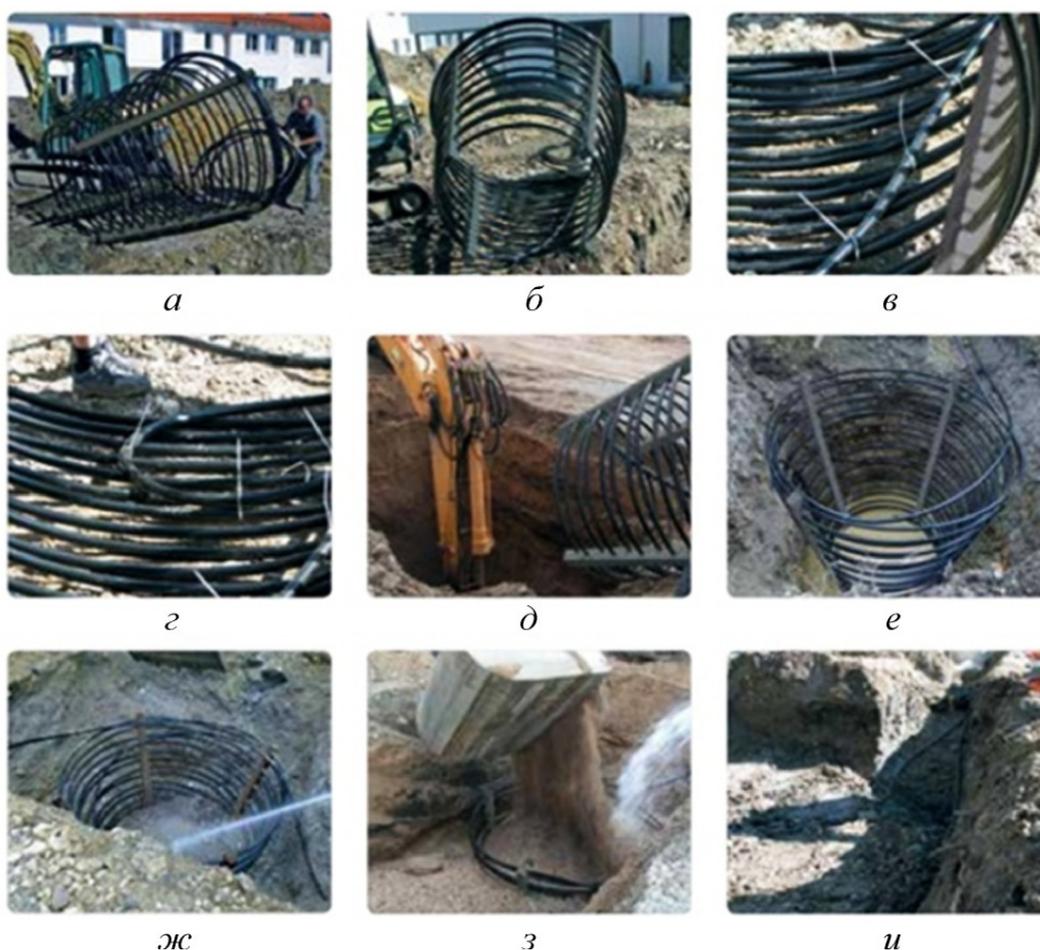


Рис. 5. Монтаж энергетической корзины: *а* – отделение труб подводки; *б* – установка труб подводки в определенном положении; *в* – фиксация обратной трубы; *г* – фиксация падающей трубы; *д* – устройство котлована для установки; *е* – размещение энергокорзины в котловане; *ж* – заливка котлована; *з* – засыпка энергокорзины; *и* – установленная энергокорзина после уплотнения грунта

Поскольку отбор теплоты происходит на глубине от 1 до 5 м ниже уровня промерзания грунта, то удастся избежать эффекта сквозного промерзания (ледяные цилиндры, полосы льда) при совместном воздействии в зимний период отрицательных температур воздуха и охлаждения грунтового массива, вызванного работой энергетической корзины [14]. Таким образом, предотвращается вредное воздействие на микроорганизмы, обитающие в грунтовом массиве. Благодаря этому поверхность над установленной энергетической корзиной может использоваться для садовых или огородных нужд без каких-либо ограничений. Однако следует избегать чрезмерной застройки или изоляции прилегающих к энергетической корзине площадей, поскольку естественная регенерация грунта на месте установки происходит за счет поступления солнечного излучения и увлажнения грунта дождевыми и талыми водами.

### Глубинные зонды

Для устройства глубинного зонда скважины бурят на глубину около 100 м. Далее в скважину опускается специальная конструкция из пластиковых труб, по которым циркулирует незамерзающая жидкость, передающая тепло земли через теплообменник в тепловой насос. Затем скважина заливается раствором, формирующим монолит, в результате чего вся конструкция образует вертикальный грунтовый зонд.

Принципиальная схема устройства вертикального зонда представлена на рис. 6.

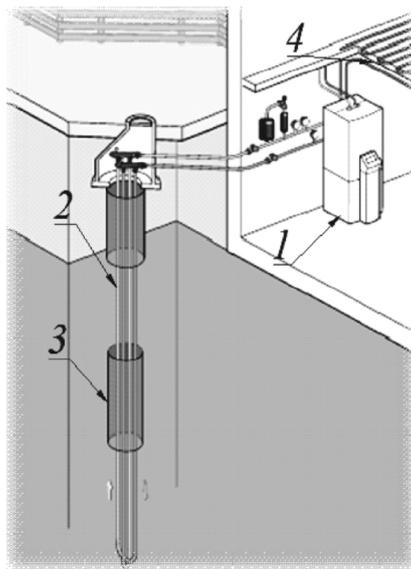


Рис. 6. Схема вертикального грунтового зонда:  
1 – установка теплового насоса; 2 – грунтовый теплообменник;  
3 – бетонное заполнение зонда; 4 – система отопления

Вертикальный грунтовый зонд может применяться для земельных участков небольшой площади, где нет достаточного пространства для укладки горизонтального грунтового коллектора. Для хорошо теплоизолированного многоквартирного дома жилой площадью 150 м<sup>2</sup> и потребностью в тепле 7,5 кВт, как правило, требуется грунтовый зонд длиной около 110 м [13].

### Энергоэффективные подземные конструкции

Преимущество энергоэффективных фундаментов заключается в том, что данные конструкции (сваи, фундаментные плиты и т.д.) необходимы по условиям конструкционной безопасности (обеспечения несущей способности и деформативности), поэтому нет потребности в возведении их дополнительно. Они являются конструкциями двойного назначения, играя роль несущих элементов здания и роль грунтовых теплообменников.

В качестве энергоэффективных конструкций фундаментов могут использоваться *сваи, фундаментные плиты, «стена в грунте», диафрагмы, анкеры, стены подземных этажей* и другие конструкции, контактирующие с грунтом. Существуют примеры использования стен (оболочки) метрополитенов в качестве энергоэффективных подземных элементов.

*Энергоэффективная свая* – это свая, которая выполняет две функции. Основной ее функцией является передача нагрузки от сооружения на грунтовое основание, второстепенной функцией является ее использование в качестве грунтового теплообменника (рис. 7).

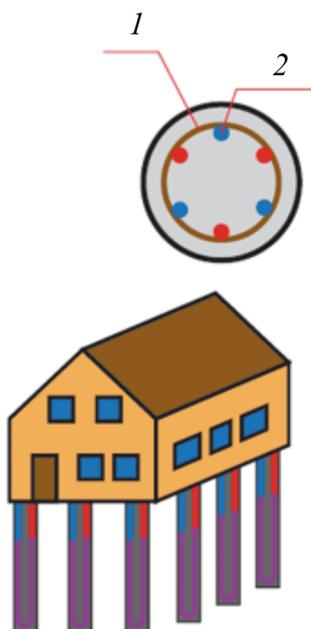


Рис. 7. Схема энергоэффективной сваи:  
1 – стальной каркас сваи; 2 – трубы теплообменника

При работе энергоэффективной сваи необходимо исключить возможное снижение несущей способности за счет формирования наледи, сокращения площади сечения из-за теплообменных труб. Пиковые тепловые нагрузки на энергоэффективную сваю должны компенсироваться за счет применения дополнительных геотермальных систем. Односемейные дома на фундаментах глубокого заложения благодаря их теплоизоляции могут обеспечиваться теплотой с помощью энергоэффективных свай в моновалентном режиме. Систему энергоэффективных свай следует использовать в качестве переменного накопителя, чередуя режим отопления с режимом кондиционирования. Опыт использования энергоэффективных свай свидетельствует о том, что их эксплуатация при базовых нагрузках является наиболее экономически выгодной.

Преимущества энергоэффективных свай: низкие дополнительные затраты на устройство труб теплообменника при их использовании для здания, запроектированного на свайных фундаментах; возможность их использования для отопления и кондиционирования здания.

Недостатки энергоэффективных свай: применение таких свай при малоэтажном строительстве зачастую является экономически невыгодным, поскольку схема и шаг расположения энергоэффективных свай определяется нагрузками от здания.

По типу устройства выделяется два вида энергоэффективных свай:

- 1) *свая заводского изготовления* (забивная или вдавливаемая);
- 2) *буронабивная свая*, устраиваемая в буровой скважине на строительной площадке.

В свою очередь, сваи заводского изготовления бывают *пустотелые* и *с установленными теплообменниками*.

Технологическая последовательность устройства *пустотелых центрифугированных забивных свай и вдавливаемых*, которые оборудуются трубами после погружения в грунт, приведена на рис. 8.

Трубы теплообменника соответствующей энергоэффективной сваи могут быть объединены и сгруппированы с другими сваями. Далее в грунт погружаются и засыпаются два циркуляционных контура. При засыпке следует убедиться, что засыпочный материал обладает высокой теплопроводностью и хорошим контактом с материалами при различных внешних условиях, в том числе без образования пустот.

Преимущество пустотелых центрифугированных бетонных свай: длину труб теплообменника можно подобрать под фактическую глубину погружения сваи, при этом предварительная проверка полости сваи сводит риск повреждения труб к минимуму.

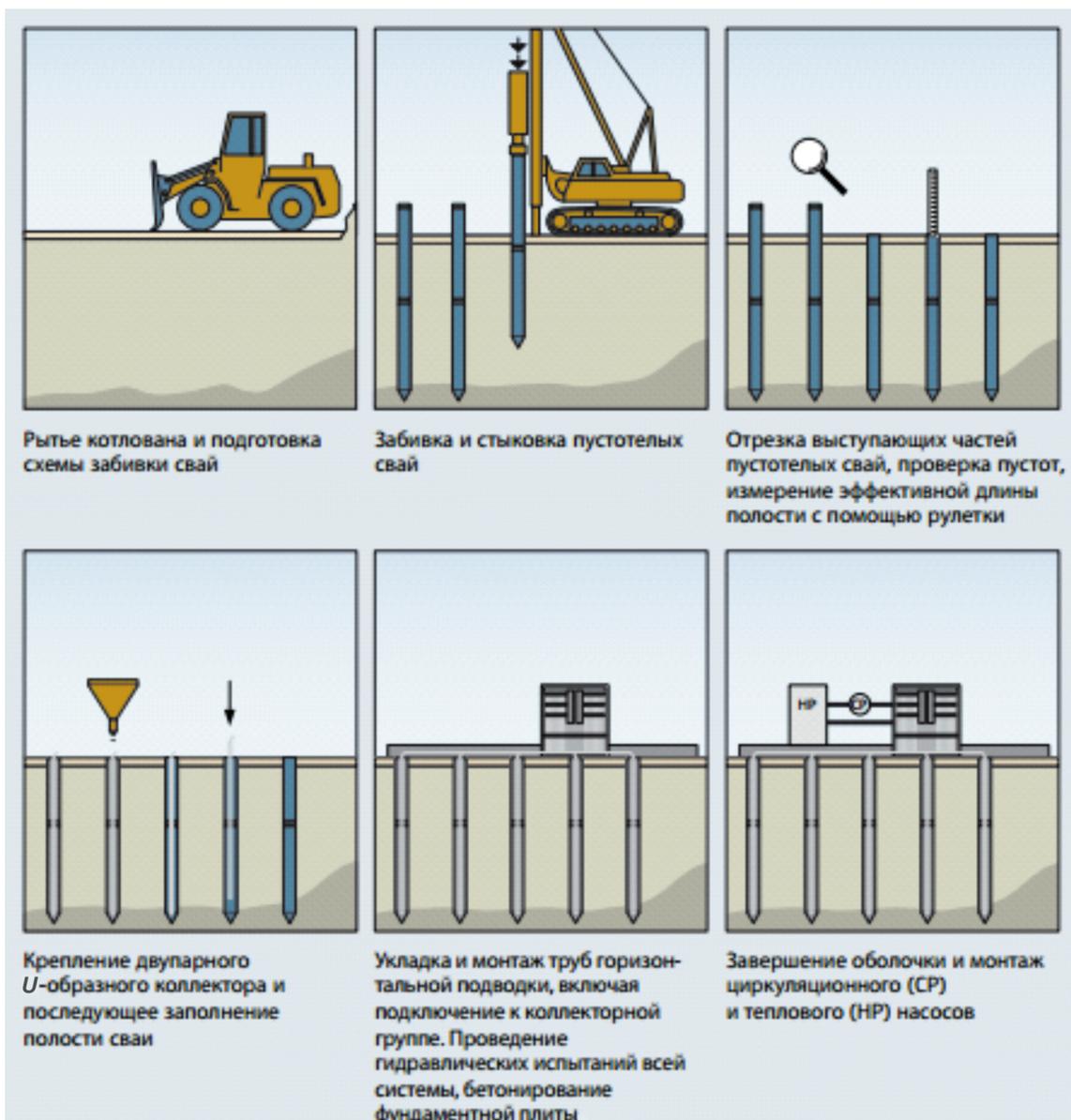


Рис. 8. Технологическая последовательность устройства пустотелых центрифугированных свай

Технологическая последовательность устройства *свай заводского изготовления с установленными теплообменниками* приведена на рис. 9. Установка теплообменников в данные сваи производится в заводских условиях на стадии армирования конструкции.

Количество циркуляционных контуров выбирается исходя из особенностей формы и диаметра сваи. В области головы сваи устраивается углубление для подводящих труб. Концы труб выводятся наружу сваи так, чтобы они выступали снаружи после забивки. Во время забивки направление выступающих концов труб следует выбирать таким образом, чтобы соединительные трубы не пришлось обводить вокруг сваи.

Недостаток таких энергоэффективных свай: в зависимости от грунтовых условий существует вероятность того, что изначально запланированная глубина не будет достигнута, а выступающую часть сваи придется срезать. В этом случае срез выступающей части сваи может привести к повреждению труб теплообменника.

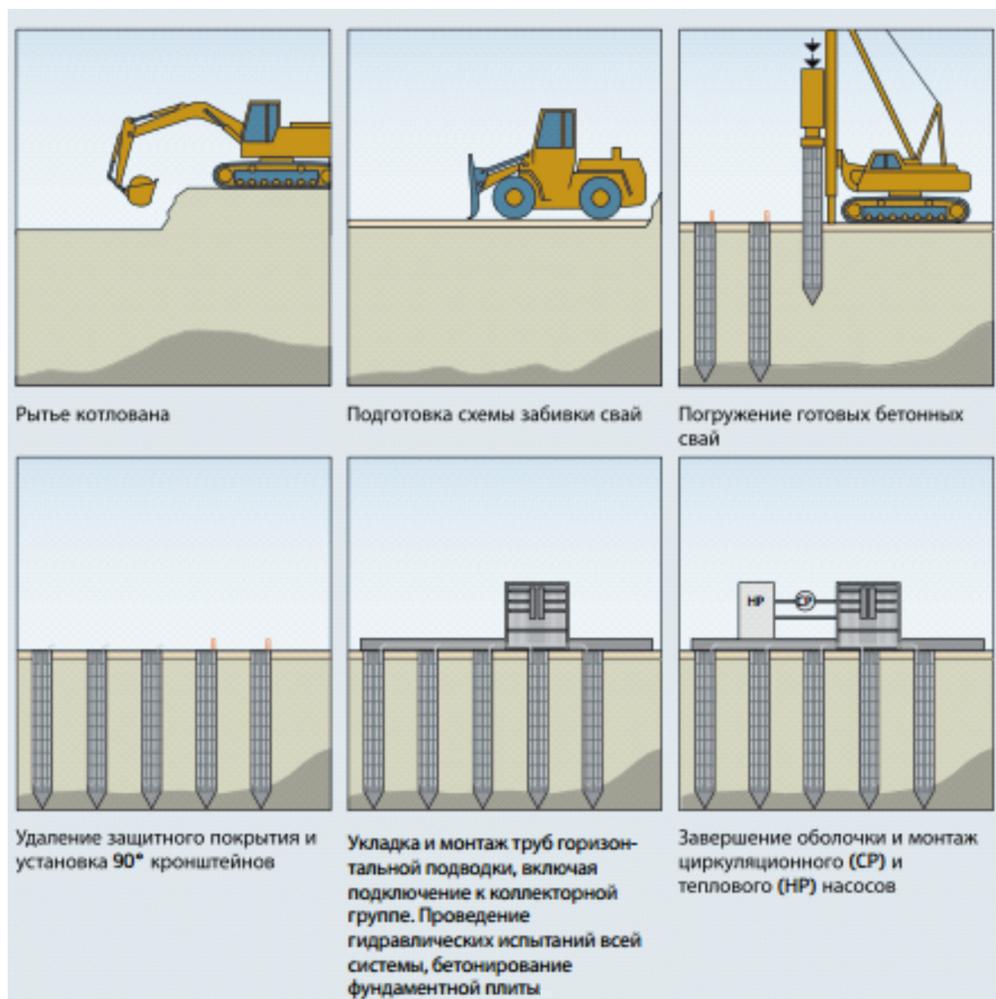


Рис. 9. Технологическая последовательность устройства свай заводского изготовления с установленными теплообменниками

Преимущество использования готовых бетонных свай заключается в заводских условиях установки труб коллектора и проведения гидравлических испытаний, что позволяет исключить вероятность повреждения труб при бетонировании сваи непосредственно на стройплощадке.

*Буриабивные энергоэффективные сваи* из монолитного бетона – это сваи, для устройства которых используется арматурный каркас со смонтированными на нем трубами теплообменников, погружаемый в подготовленную скважину (рис. 10).

Трубы теплообменников обычно крепятся во внутренней части арматурного каркаса, что позволяет избежать повреждения труб при по-

грузении каркаса в скважину. Для этого трубы крепятся с помощью кабельных стягивающих хомутов (рис. 11).



Рис. 10. Арматурные каркасы для буронабивных свай со смонтированными контурами теплообменников



В виде меандра

В виде параллельных циркуляционных контуров

В виде циркуляционных контуров, расположенных крест-накрест

В виде спирали

Рис. 11. Варианты крепления теплообменников при устройстве буронабивной энергоэффективной сваи

В случае энергоэффективных свай, имеющих небольшую длину, допускается укладка труб в меандр при непосредственном подключении подающей и обратной подводок к коллектору. Количество устанавливаемых в сваю циркуляционных контуров зависит от диаметра арматурной решетки. Рекомендованные схемы установки коллекторов в зависимости от диаметра свай представлены ниже.

#### Зависимость количества вертикальных труб от диаметра энергоэффективной сваи

Диаметр сваи, см	Количество вертикальных труб, шт.
20–80	4–6
90–120	6–8
130–180	8–12

Трубы подачи и обратки энергоэффективных свай могут быть объединены с другими сваями в группе. В случае различных уровней вы-

полнения строительных работ концы труб у оголовка сваи должны быть в защитных кожухах или защищены многослойной изоляцией минимум на глубину бетонного слоя, удаляемого после установки сваи (рис. 12). Концы труб должны быть герметично закрыты для предотвращения попадания в них посторонних предметов и частиц.

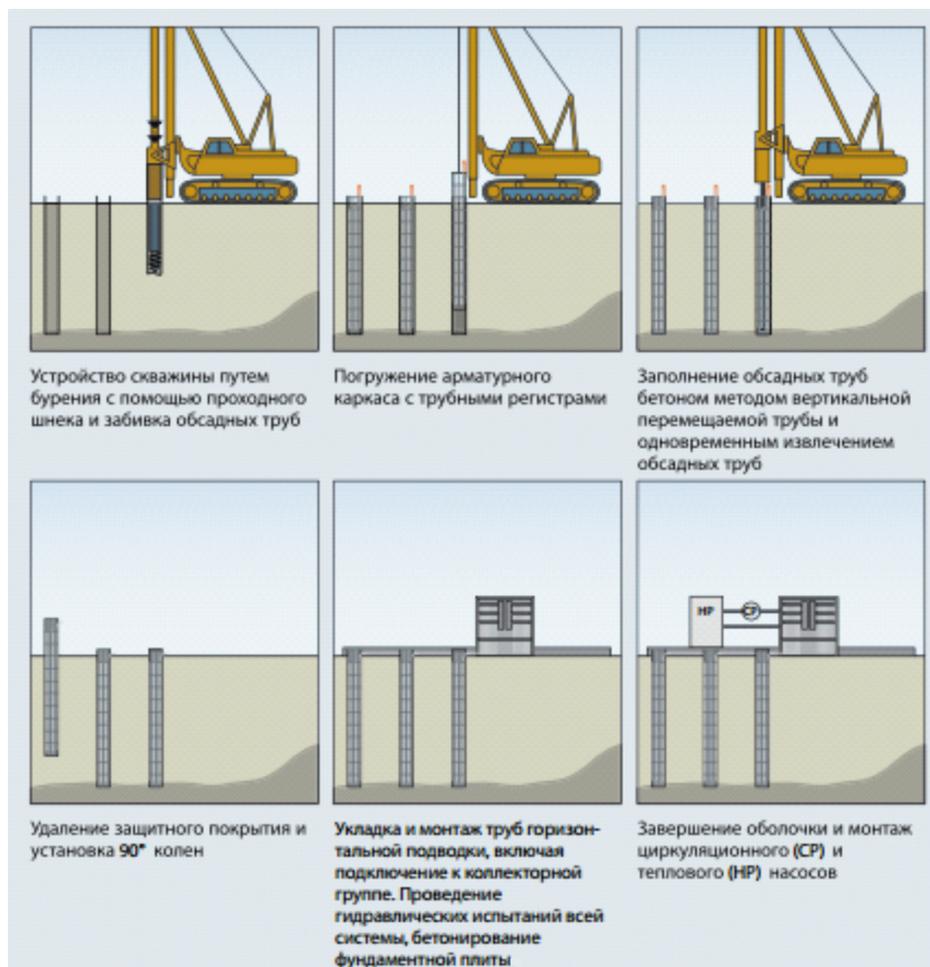


Рис. 12. Последовательность установки буронабивных энергоэффективных свай из монолитного бетона

Для избежания повреждения труб коллектора свая должна бетонироваться с помощью бетонолитной трубы (метод вертикальной перемещаемой трубы). Во время заливки бетонной смеси необходимо предотвратить возможность повреждения труб коллектора рукавом бетонолитной трубы. При уплотнении бетона не следует использовать вибраторы.

При устройстве энергоэффективного фундамента по схеме «стена в грунте» на месте проведения работ трубы теплообменников необходимо закрепить на арматурном каркасе до его установки. Во избежание повреждения труб при погружении арматурных каркасов в скважины или щелевые выемки они крепятся, как правило, во внутренней части арматурного каркаса. Длина стен составляет примерно 10–30 м.

Теплообменники энергоэффективных фундаментов выполняют из труб малого сечения (около 20 мм) в виде змеевиков. Если фундаменты выполнены из сборного железобетона, то в этом случае монтаж первичного контура заключается только в объединении теплообменников в единый контур после монтажа конструкций.

При монолитном исполнении фундаментов теплообменник крепится к арматурному каркасу до его установки и только после набора прочности бетоном конструкций объединяется в единый контур (рис. 13 и 14).

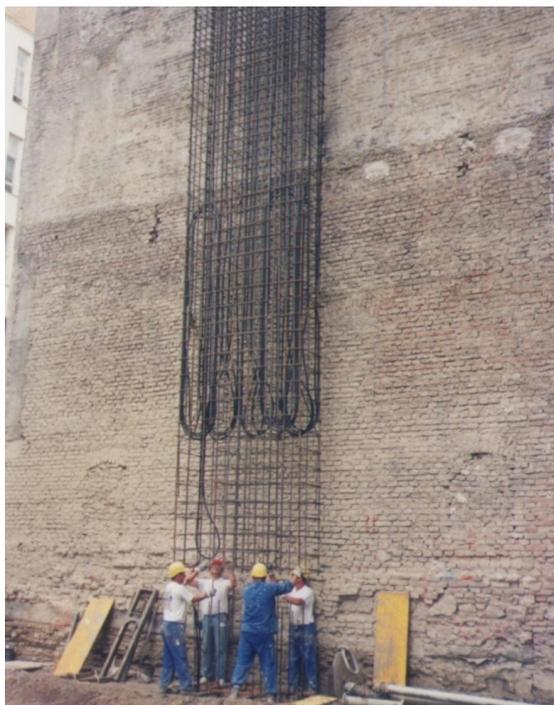


Рис. 13. Погружение секции армокаркаса «стены в грунте» с установленными теплообменниками



Рис. 14. Раскладка теплообменников перед бетонированием фундаментной плиты

Кроме прочих преимуществ энергоэффективных фундаментов, сам бетон является хорошим теплообменником (обладает высокой теплопроводностью и теплоемкостью), способствующим процессу теплообмена грунт – теплоноситель.

В качестве теплоносителя могут использоваться вода, антифриз или их смесь.

#### 1.2.4. Тепловые насосы

*Тепловой насос* – это устройство для переноса тепловой энергии от источника низкопотенциальной тепловой энергии (с низкой температурой) к потребителю (теплоносителю) с более высокой температурой [1]. Принцип действия теплового насоса (рис. 15) подобен принципу действия обращенной холодильной машины или пароконденсационной холодильной машины: имеется замкнутый контур, заполненный фреоном, который имеет четыре принципиальные составляющие (испаритель, конденсатор, компрессор и дросселирующее устройство). Если в холодильной машине основной целью является производство холода путем отбора теплоты, то в тепловом насосе картина обратная.

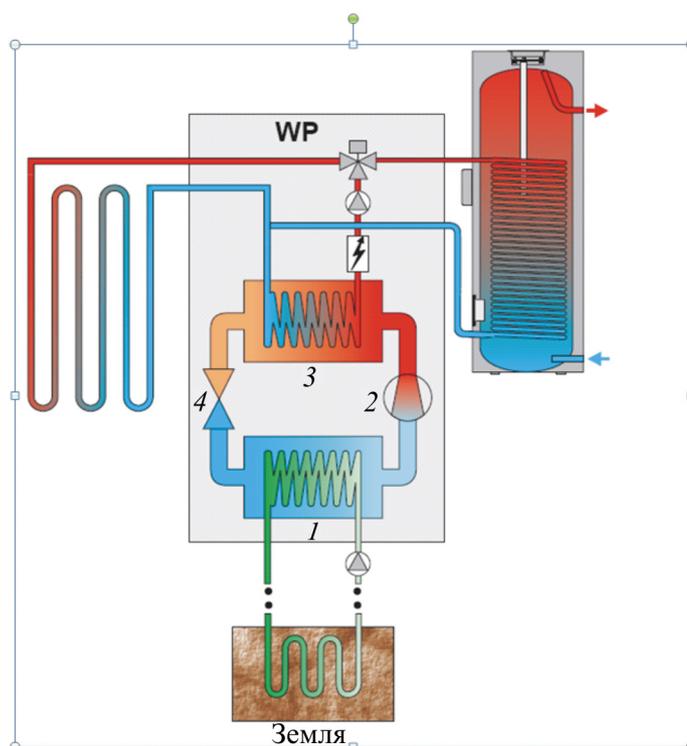


Рис. 15. Схема работы теплового насоса:  
1 – испаритель; 2 – компрессор; 3 – конденсатор;  
4 – расширительный клапан

Жидкий фреон с низкой температурой попадает в испаритель (теплообменник), в котором переходит из жидкого агрегатного состояния в парообразное за счет отбора теплоты из окружающей среды и устремляется в компрессор, в котором сжимается до необходимого значения. Затем под высоким давлением парообразный фреон отдает тепло в окружающую среду, конденсируется, переходит в жидкое состояние и после этого направляется в испаритель через дросселирующее устройство.

Тепловой насос и холодильная машина характеризуются следующими показателями:

- холодильным коэффициентом;
- коэффициентом теплового насоса;
- коэффициентом энергетической эффективности;
- коэффициентом полезного действия;
- коэффициентом использования энергии.

Среди тепловых насосов на современном этапе широко распространены геотермальные тепловые насосы. Принцип работы таких насосов заключается в отъеме тепла грунтового массива и подземных вод. В настоящее время доказано, что на глубине промерзания температура грунта приблизительно равна нулю, а на глубине порядка 20 м температура грунта может достигать +10, +12 °С [15]. При наличии грунтовых вод потенциал использования тепла грунта для теплоснабжения значительно возрастает. Но в этом случае необходимо учесть агрессивное воздействие грунтовых вод на используемое оборудование.

### **1.2.5. Низкотемпературные системы отопления и охлаждения зданий**

Для работы с тепловыми насосами наиболее подходящими являются низкотемпературные системы отопления и охлаждения зданий. Благодаря большой поверхности теплообмена требуемая рабочая температура при отоплении лишь немного выше, а при охлаждении – немного ниже температуры помещения, что позволяет значительно увеличить эффективность работы геотермальных тепловых насосов.

В состав низкотемпературных систем входят следующие системы поверхностного отопления и охлаждения, в которых циркулирует вода:

- системы напольного отопления и охлаждения;
- системы настенного отопления и охлаждения;
- системы потолочного отопления и охлаждения (рис. 16).

Достоинства указанных низкотемпературных систем поверхностного отопления или охлаждения: энергия в основном передается с по-

мощью излучения, а не с помощью конвекции, что позволяет избежать сквозняков и распространения пыли. Кроме того, системы поверхностного отопления и охлаждения компактны, предлагают практически неограниченную свободу в отношении дизайна и отделки помещений, а также имеют оптимальное соотношение внутреннего и полезного пространства.

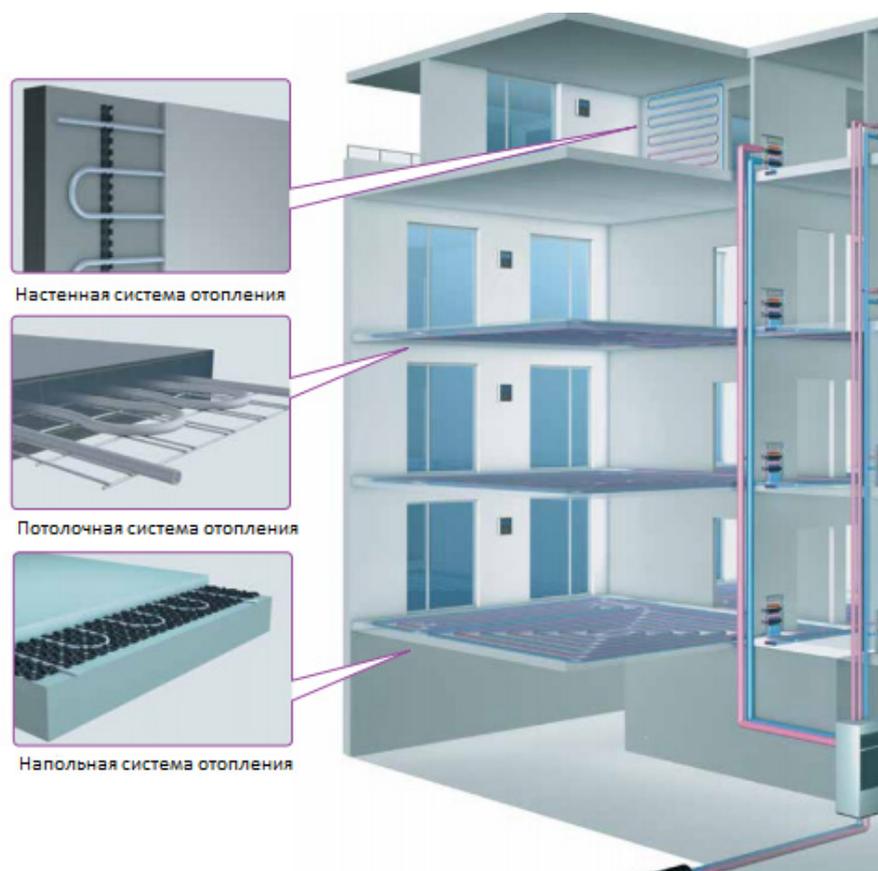


Рис. 16. Виды низкотемпературных систем поверхностного отопления и охлаждения

Напольные низкотемпературные системы могут быть использованы не только при проектировании и возведении новых зданий, но и для модернизации полов существующих зданий. Для увеличения комфорта данные системы могут быть также использованы для внутреннего охлаждения.

В качестве альтернативы или дополнения к системам напольного отопления или охлаждения могут использоваться системы настенного отопления и охлаждения. Среди них выделяются настенные системы «сухого» типа и настенные системы «мокрого» типа.

Настенные системы «сухого» типа применяются при реконструкции зданий и сооружений в тех случаях, когда в конструкцию перекрытия

запрещено вносить изменения. Кроме существующих стен для установки поверхностей для отопления и охлаждения могут использоваться дополнительные облегченные конструкции стен (каркасные стены). В зависимости от конструкции стены система устанавливается либо ниже уровня панельной обшивки, либо непосредственно на штукатурный слой.

Настенные системы «мокрого» типа используются в случае проведения частичной реконструкции или в случае обновления штукатурного слоя.

Системы потолочного отопления и охлаждения применяются как более комфортные и экономные по сравнению с системами кондиционирования воздуха. Выделяются следующие виды систем потолочного отопления и охлаждения: подвесные потолки или потолочные панели, термоактивные строительные конструкции.

Подвесные потолки могут быть использованы для новых и для реконструируемых зданий. Отопление и охлаждение при помощи потолочных панелей осуществляются путем встраивания труб, по которым циркулирует вода.

Термоактивные строительные конструкции представляют собой бетонные перекрытия, в которых размещается система отопления или охлаждения. Указанное решение позволяет запасать энергию в перекрытиях при помощи коллекторов, в которых циркулирует вода. Термоактивные строительные конструкции эффективны при строительстве высотных зданий. Применение железобетонной конструкции как аккумулятора теплоты для обеспечения комфорта в зданиях является простым, безопасным для окружающей среды и экономичным решением. Данную технологию рекомендуется использовать для зданий с низкими или средними тепловыми нагрузками для компенсации нагрева летом. Для зданий со средними или высокими тепловыми нагрузками технология аккумулирования может использоваться для компенсации базовых нагрузок.

### **1.3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ ГРУНТОВ**

Как известно, грунт – это многофазная система со сложным механизмом теплопередачи, который включает в себя [22]:

- проводимость;
- конвективную передачу (конвекцию);
- процессы испарения и конденсации (скрытая теплопередача);
- теплоизлучение;
- ионный обмен;
- процессы замерзания – оттаивания.

Теплопередача в незамерзшем грунте происходит в основном посредством *проводимости* ( $q_{cond}$ ) и в малой степени за счет конвекции ( $q_{l,conv}$ ,  $q_{v,conv}$ ).

*Конвективная теплопередача* происходит между термодинамическими системами, которые двигаются относительно друг друга (т.е. при помощи циркуляционных потоков). Твердая фаза в грунте является статической, вследствие чего следует различать конвекцию с использованием грунтовой воды и конвекцию с пара (порovým газом). Теплопередачу посредством конвекции с использованием жидкости можно представить как

$$q_{l,conv} = c_w \rho_w \bar{v}_w (t - t'), \quad (1)$$

где  $c_w$  – удельная теплоемкость грунтовой воды;  $\rho_w$  – плотность грунтовой воды;  $\bar{v}_w$  – вектор скорости воды;  $t'$  – исходная температура.

Подобное уравнение получают для конвекции с использованием пара (поровой газ):

$$q_{v,conv} = c_v \rho_v \bar{v}_v (t - t'), \quad (2)$$

где  $c_v$  – удельная теплоемкость пара в грунте;  $\rho_v$  – плотность пара в грунте;  $\bar{v}_v$  – вектор скорости пара;  $t'$  – исходная температура.

Конвективная теплопередача также происходит в том случае, если имеется фазовое изменение воды (скрытая теплота во время испарения и конденсации  $q_{lat}$ ).

*Скрытая теплопередача*, которая является результатом фазового изменения воды (испарения), зависит главным образом от количества паропередачи, происходящей в порах грунта. Она увеличивается с уменьшением содержания воды и может выражаться как

$$q_{lat} = L_0 \rho_w \bar{v}_v, \quad (3)$$

где  $L_0$  – скрытое тепло испарения при  $t'$ .

*Теплоизлучение* в грунтах обычно только незначительно способствует теплопередаче. Например, его действие в песке составляет менее 1 % от общей теплопередачи.

*Процессы замерзания и оттаивания* грунтов также могут передавать значительное количество тепла, но для энергоэффективных подземных конструкций эти процессы не допускаются.

*Теплопроводимость* – это процесс молекулярного переноса теплоты в сплошной среде, обусловленный наличием градиента температуры.

Согласно определению плотность теплового потока – это тепловой поток, отнесенный к единице площади поверхности. Согласно закону Фурье плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры, т.е. плотность теплового потока  $q_{cond}$  можно записать как

$$q_{cond} = \frac{Q}{A} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (4)$$

где  $Q$  – тепловой поток через поверхность площадью  $A$ ;  $\lambda$  – теплопроводность;  $\frac{\partial t}{\partial n}$  – температурный градиент в действительном направлении потока  $n$ ,

$$\frac{\partial t}{\partial n} = \frac{\partial t}{\partial x} e_x + \frac{\partial t}{\partial y} e_y + \frac{\partial t}{\partial z} e_z = \text{grad}t. \quad (5)$$

Таким образом, полную (суммарную) теплопередачу в грунте  $q_{tot}$  можно определить как

$$q_{tot} = q_{cond} + q_{l,conv} + q_{v,conv} + q_{lat}, \quad (6)$$

где  $q_{cond}$  – плотность теплового потока за счет проводимости;  $q_{l,conv}$  – плотность теплового потока, образованного конвекцией жидкости;  $q_{v,conv}$  – плотность теплового потока, образованного конвекцией пара;  $q_{lat}$  – плотность теплового потока при скрытой теплопередаче.

Если размеры частиц грунта и пор существенно малы по отношению к рассматриваемому объему грунта, то комплексный процесс теплопередачи можно свести только к *проводимости*, которая преобладает в случае использования энергоэффективных фундаментов, подпорных стен и туннелей.

Уравнение (6) можно записать в прямоугольных координатах как

$$q = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial x} e_x + \frac{\partial t}{\partial y} e_y + \frac{\partial t}{\partial z} e_z \right) = -\lambda \text{grad}t. \quad (7)$$

Если теплопроводность и температурный градиент постоянны по всей площади и в нормальном направлении, то уравнение (4) для энергоэффективной сваи с радиусом  $R$  и длиной  $l$  можно записать как

$$Q = 2\pi R l \lambda \frac{dt}{dr}, \quad (8)$$

где  $Q$  – тепловой поток через поверхность энергоэффективной сваи, Вт.

Изменение температуры вызывается переменной плотностью теплового потока в течение этого периода, что ведет к изменению внутренней энергии:

$$-\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial z}. \quad (9)$$

Дифференцирование уравнения (4) по отношению к пространственным координатам и соединение его с уравнением (9) дает

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = \alpha \operatorname{div}(\operatorname{grad} t) = \alpha \Delta t, \quad (10)$$

где  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\Delta t$  – оператор Лапласа.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}, \quad \Delta t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}, \quad (11)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/м·С;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/кг·С;  $\rho$  – плотность твердой среды, кг/м<sup>3</sup>.

Если в рассматриваемом объеме грунта есть внутренний источник тепла (внутреннее теплообразование), то основное уравнение теплопроводности принимает следующий вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \Delta t + \frac{q_v}{\rho c}, \quad (12)$$

где  $q_v$  – мощность внутренних источников теплоты.

Уравнения (10) и (12) называют *основными уравнениями теплопроводности* [18, 19, 22].

Уравнение (10) в прямоугольных координатах можно преобразовать в цилиндрические координаты с радиусом  $r$ , азимутом  $\varphi$  и осью  $z$ :

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (13)$$

В сферических координатах с радиусом  $r$ , углом склонения  $\varphi$  и углом восхождения  $\psi$  уравнение (10) принимает следующий вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \psi^2} + \frac{\cos \psi}{r^2 \sin \psi} \frac{\partial t}{\partial \psi} + \frac{1}{r^2 \sin \psi} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} \right). \quad (14)$$

## 1.4. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПОДЗЕМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### 1.4.1. Аналитические методы расчета энергоэффективных подземных конструкций

Дифференциальные уравнения теплопроводности (формулы (10), (12)–(14)) отображают общий характер процесса, каждое из приведенных уравнений имеет множество решений. Для получения решения конкретной задачи необходимо задание начальных и граничных условий.

Начальные условия определяют распределение температурного поля в начальный период времени и заключаются в том, что в начальный момент времени  $\tau_0$  должна быть известна функция  $t_c = f(x, y, z, \tau_0)$ .

Граничные условия определяют особенности протекания процесса на границах тела и могут быть заданы следующим образом:

*Граничное условие первого рода [19] (граничное условие Дирихле [21]).* Температура поверхности  $t_c$  постоянна или зависит только от времени  $\tau$ . Иначе говоря, известна функция распределения температуры по поверхности тела

$$t_c = f(x, y, z, \tau). \quad (15)$$

*Граничное условие второго рода [19] (граничное условие Неймана [21]).* Плотность теплового потока  $q_c$  на поверхности постоянна или зависит только от времени  $\tau$ , т.е. задана функция распределения плотности теплового потока по поверхности тела

$$q_c = f(x, y, z, \tau). \quad (16)$$

*Граничное условие третьего рода [19] (граничное условие Коши или смешанное условие Неймана [22]).* На поверхности рассматриваемого тела происходит теплообмен с жидким или газообразным окружением этого тела, имеющего температуру  $t_{ж}$ . По закону охлаждения Ньютона тепловой поток пропорционален разности температур между окружающей средой и температурой поверхности  $t_c$ . Коэффициент пропорциональности определяется как коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , Вт/м<sup>2</sup>·К. Плотность теплового потока также может быть выражена в соответствии с законом Фурье:

$$-\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} \right)_c = \alpha(t_{ж} - t_c). \quad (17)$$

Граничное условие четвертого рода [19] характеризуется равенством тепловых потоков, проходящих через поверхность контакта двух тел:

$$\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_1 = \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_2. \quad (18)$$

При совершенном тепловом контакте изотермы непрерывно переходят из одного тела в другое, а градиенты температур в точках контакта удовлетворяют условию (18).

Из-за математических трудностей аналитические решения этих уравнений возможны только для простых случаев. Можно легко решать одномерные задачи, поскольку уравнение (10) зависит только от одной координаты. Двухмерные и трехмерные задачи можно решать в некоторых случаях при помощи комбинирования одномерных решений.

Энергоэффективные конструкции фундаментов имеют различные геометрические формы. Более простые элементы, например сваи, можно смоделировать в виде цилиндров, тогда как сложные для конструирования фундаменты или туннели требуют сложных геометрических расчетов. Зарубежными авторами приводятся три основных случая, которые можно использовать для моделирования большинства проектируемых ЭЭФ [21].

#### Основные случаи теплопередачи в грунте

Случай	Дифференциальное уравнение
Полубесконечное тело	$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \Theta(x, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial}{\partial \tau} \Theta(x, t)$
Бесконечное тело с цилиндрическим отверстием	$\frac{\partial^2}{\partial r^2} \Theta(r, t) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \Theta(r, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial}{\partial \tau} \Theta(r, t)$
Бесконечное тело со сферическим отверстием	$\frac{\partial^2}{\partial r^2} \Theta(r, t) + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \Theta(r, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial}{\partial \tau} \Theta(r, t)$

Случай 1. *Полубесконечное тело.* Моделирует плоские границы раздела между грунтом и атмосферой или фундаментами (плитами, стенами подвального помещения, подпорными стенами, свайными стенами, «стенами в грунте»).

Случай 2. *Бесконечное тело с цилиндрическим зазором.* Моделирует длинные вертикальные теплообменники в грунте (сваи).

Случай 3. *Бесконечное тело со сферическим зазором.* Моделирует сферические термоактивные отверстия в грунте (подземные конструкции) и аппроксимирует область подножия энергоэффективных свай.

Аналитические решения имеются только для случая 1, учитывающего простые граничные условия. Более сложные граничные условия требуют полуаналитических решений, которые сводят дифференциальное уравнение к так называемой функции ошибок Гаусса [21], которая имеет численное решение:

$$\operatorname{erfc}(\zeta) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\zeta} e^{-\omega^2} d\omega, \quad (19)$$

где  $\zeta$  – предел интегрирования;  $\omega$  – переменная интегрирования.

Эта функция также является основой для решения случая 3. Независимо от граничных условий случай 2 можно численно рассчитать только используя программу для решения дифференциальных уравнений.

Случай 1 был решен для различных граничных условий [21].

*Первое решение* случая 1 предполагает *гармоничное колебание температуры* на поверхности (граничное условие Коши или смешанное условие Неймана) с теплопередачей между грунтом и воздухом. Рассматриваются дневные или годовые колебания температуры, причем учитывается отставание колебания температуры в грунте во времени. Предполагается, что поверхность полубесконечного тела обменивается теплом с воздухом, который производит синусоидальное температурное колебание  $f(\tau)$ . При этих условиях температура грунта колеблется согласно средней годовой температуре воздуха  $t_n$ , если не принимать во внимание эффекты излучения и геотермальный температурный градиент. Также учитывается уменьшение с глубиной  $d$  амплитуды колебания из-за тепловой инерции грунта. С учетом данных граничных условий дифференциальное уравнение примет вид

$$t(z, \tau) = t_{n.g} + \Delta t_{n.dh} \eta e^{-z/d} \cos \left[ \omega(\tau - \varepsilon) - \frac{z}{d} \right], \quad (20)$$

где

$$d = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} = \sqrt{\frac{aP}{\pi}}, \quad (21)$$

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1 + 2k + 2k^2}}, \quad (22)$$

$$\varepsilon = \operatorname{arctg} \frac{k}{1 + k}, \quad (23)$$

$$k = \frac{\lambda}{\alpha d} = \frac{\lambda}{\alpha} \sqrt{\frac{\pi}{aP}}, \quad (24)$$

где  $t_{н.г}$  – средняя годовая температура воздуха, °С;  $t_{н.дн}$  – средняя дневная температура воздуха, °С;  $\Delta t_n$  – амплитуда температуры, °С;  $\omega = 2\pi/P$ , с<sup>-1</sup>;  $P$  – продолжительность периода температурного колебания, с;  $d$  – глубина затухания;  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи из грунта в воздух, Вт/м<sup>2</sup>·°С.

На поверхности ( $z = 0$ ) решение сводится к следующему виду:

$$t(0, \tau) = t_{н.г} + \Delta t_n \eta \cos(\omega\tau - \omega\varepsilon). \quad (25)$$

Очевидно, что амплитуда температуры поверхности уменьшается на коэффициент  $\eta < 1$  относительно температуры воздуха и, более того, претерпевает отставание по времени  $\varepsilon$ .

Глубина затухания  $d$  зависит от продолжительности периода и теплопроводности  $a$ . В грунтах с высокими значениями  $a$  (например, влажный песок) температурная волна проникает глубже. Сравнение отклика почвы на годовые и дневные периоды дает следующее отношение:

$$\frac{d_{год}}{d_{дн}} = \sqrt{\frac{P_{год}}{P_{дн}}} = \sqrt{\frac{365}{1}} \approx 19:1. \quad (26)$$

Уравнение (26) показывает, что годовая температурная волна проникает в 19 раз глубже в грунт, чем ежедневная волна. Более того, тепловой поток в земле достигает своего максимума раньше, чем температура.

*Второе решение* основного случая 1 возможно путем допущения внезапного падения температуры на поверхности полубесконечного полупространства (граничное условие Дирихле) [22]. Это решение позволяет изучить теплопередачу между плоским энергоэффективными элементом и грунтом.

При допущении падения температуры от начальной  $t_0$  до заданной  $t_c$  в момент времени  $\tau = 0$  получают следующее решение уравнения (10):

$$\bar{t}(z, \tau) = t_c \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}}\right), \quad (27)$$

где  $\bar{t}(z, \tau)$  – функция температуры с исходной (начальной) температурой  $t_0$ ,

$$\bar{t}(z, \tau) = t(z, \tau) - t_0, \quad (28)$$

откуда

$$\bar{t}(z, 0) = 0. \quad (29)$$

### 1.4.2. Численные методы расчета энергоэффективных подземных конструкций

В настоящее время разработан ряд программных комплексов, позволяющих решать задачи теплопереноса в грунтах, в том числе расчеты энергоэффективных фундаментов.

Из общего ряда можно выделить следующие программные комплексы:

- GeoStudio (Канада);
- COSMOS/M (Россия);
- ANSIS (США) и др.

Термодинамические расчеты, выполняемые представленными комплексами, сводятся к решению основных дифференциальных уравнений термодинамики (формулы (10), (12)–(14)) методом конечных элементов (МКЭ).

При выполнении расчетов ЭЭФ огромную роль играют теплофизические свойства грунтов основания. К основным теплофизическим свойствам грунта принято относить *теплопроводность*  $\lambda$ , *теплоемкость*  $c$  и *температуропроводность*  $\alpha$ .

Теплопроводность  $\lambda$  и теплоемкость  $c$  – это зависящие от температуры параметры, которые соединены в уравнении теплопроводности (11) с температуропроводностью  $\alpha$ . Параметр  $\alpha$ , м<sup>2</sup>/с, описывает глубину и скорость проникновения температурной волны в грунт.

Коэффициент пропорциональности, который связывает плотность теплового потока с температурным градиентом, известен как *теплопроводность*  $\lambda$  (Дж/с·м·°С). На  $\lambda$  сильно влияют содержание воды и плотность грунта. Замораживание значительно увеличивает теплопроводность, потому что  $\lambda_{\text{воды}} = 0,57$  Дж/с·м·°С изменяется на  $\lambda_{\text{льда}} = 2,18$  Дж/с·м·°С.

*Теплоемкость*  $c$  (Дж/кг·°С) определяет количество энергии, запасенной в материале на единицу массы, на единицу изменения температуры. Теплоемкость не зависит от микроструктуры, поэтому в большинстве случаев можно вычислить теплоемкость грунта из удельной теплоемкости различных ее составляющих, зная их объемное соотношение:

$$c = c_{\text{гр}} x_{\text{гр}} + c_{\text{воз}} x_{\text{воз}} + c_{\text{вод}} x_{\text{вод}}, \quad (30)$$

где  $x$  – удельный объем,  $x_{\text{гр}} = 1 - e$  для твердой фазы,  $x_{\text{вод}} = eS$  для поровой воды и  $x_{\text{воз}} = e(1 - S)$  для порового воздуха, где  $S$  – степень влажности, а  $e$  – пористость грунта.

Общая теплоемкость увеличивается от содержания воды и уменьшается в случае замерзания. Удельная теплоемкость льда  $c_{\text{льда}} = 1884$  Дж/кг·°С по сравнению с  $c_{\text{воды}} = 4186$  Дж/кг·°С для воды.

Объемная теплоемкость  $c_v$  выводится из удельной теплоемкости и объемной плотности грунта и представляет собой взвешенное среднее арифметическое определенных компонентов грунта, поэтому

$$c_v = \sum \rho_i c_i x_i \quad (31)$$

или

$$c_v = \rho_{\text{гр}} \left( c_{\text{гр}} + c_{\text{вод}} \frac{w}{100} \right), \quad (32)$$

где  $c_{\text{гр}}$  – удельная теплоемкость минеральных компонентов (большинство минералов имеют  $c_{\text{гр}} = 1000$  Дж/кг·К при температуре 10 °С);  $c_{\text{вод}}$  – удельная теплоемкость воды,  $c_{\text{вод}} = 4186$  Дж/кг·К;  $w$  – влажность, %.

## 1.5. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

Структура потерь тепловой энергии через ограждающие конструкции различается для одного и того же типа зданий в зависимости от этажности, материала ограждающих конструкций, года строительства, срока эксплуатации, а также качества строительных работ. Например, для домов в зависимости от этажности она такова:

- на стены приходится 30–35 % теплопотерь в одно- и двухэтажных зданиях, до 42 % – в пятиэтажных, до 49 % – в девятиэтажных;
- теплопотери через окна составляют 25, 32 и 35 % для одно-, двухэтажных, пятиэтажных и девятиэтажных зданий соответственно;
- через цокольные и чердачные перекрытия, фундаменты здания теряется в среднем от 10 до 20 % тепла [4].

Эксплуатационная энергоэффективность здания формируется прежде всего его теплоэнергоэффективностью, которая, в свою очередь, зависит от теплозащитных свойств глухой и светопрозрачных частей ограждающих конструкций здания. Мировой опыт показывает, что повысить энергетическую эффективность зданий можно только в случае применения комплексных архитектурно-строительных решений.

Для сокращения потерь тепловой энергии в строительстве сегодня применяются различные планировочные решения, теплоизоляционные материалы и конструкции, энергоэффективные фасадные системы, технологии возведения монолитных домов с несъемной опалубкой, энергоэффективные светопрозрачные конструкции. Ограждающие конструкции в зданиях низкого энергопотребления необходимо устраивать максимально герметичными, воздухонепроницаемыми, без так называемых «мостиков холода». «Мостики холода» – это участки в ограждающих конструкциях здания, где вследствие геометрических условий и применения материалов с различными параметрами создаются условия для распространения тепла в двух или трех измерениях [2]. В качестве примера таких участков можно привести стыки стен из различных материалов, стыки оконных проемов и стен, места сопряжения строительных материалов с различной теплопроводностью (рис. 17).



Рис. 17. Схема участков, где образуются «мостики холода»

Использование современных энергоэффективных конструкций, материалов и технологий позволяет проектировать здания и сооружения не только с низким потреблением энергии, но и с различными показателями ценового диапазона, комфортабельности и экологичности.

### 1.5.1. Энергоэффективные архитектурно-планировочные и объемно-пространственные решения

Для увеличения энергоэффективности с планировочной точки зрения малоэтажные здания должны проектироваться максимально компактными и с меньшей изрезанностью фасада. Это позволит сократить площадь наружных ограждений и снизить теплопотери в зимний период и теплопоступления в летний период. Таким образом, чем меньше отношение площади ограждающих конструкций к объему здания, тем менее подвержено здание влияниям климата.

Одним из примеров энергоэффективных малоэтажных зданий являются ширококорпусные дома. Главная их особенность состоит в увеличенной ширине корпуса (до 23,6 м) с соблюдением всех норм инсоляции и воздухообмена. В этом случае отношение полезной жилой площади к площади наружных стен увеличивается, а тепловые потери снижаются на 20–40 %.

Инновационными являются купольные здания (рис. 18).



Рис. 18. Пример энергоэффективного дома в виде купола

Согласно расчетам, идеальной формой энергоэффективного здания является полусфера, обращенная срезом к земле. Форма сферы имеет наименьшее отношение площади наружных стен к внутреннему объему здания, что обеспечивает экономию строительных материалов и сокращение затрат на отопление и кондиционирование на 70–90 % [1]. Помимо этого купол имеет на 60–70 % меньше деталей в каркасе конструкции, отличается световыми характеристиками, так как сферическая форма имеет свойство рассеивать свет, а благодаря аэродинамическому эффекту конструкции ветер огибает купол с меньшим сопротивлением, кроме того,

купольная конструкция является идеальным вариантом для установки солнечных батарей и использования альтернативных источников энергии. Совмещенные в одной конструкции круг и купол составляют стены, перекрытия и кровлю. Такая конструкция в случае изготовления из сборных элементов и «мягких» материалов устойчива к динамическим нагрузкам и снеговым заносам [1]. Универсальность купольного сооружения позволяет вписать его практически в любой ландшафт, а также пристроить к нему дополнительные комнаты такой же формы. К недостаткам купольной конструкции можно отнести дорогостоящие решения, связанные с оконными проемами, а также необходимость выбора просторного участка для строительства. Такая конструкция требует проведения грамотных и точных расчетов геодезического купола. Оптимальными материалами для купольного дома являются дерево, а также бетон.

Ориентация дома должна быть широтной, с учетом господствующего направления ветра в зимний период. Вход должен быть с подветренной стороны, жилые комнаты в самой теплой зоне с южной стороны дома, кухня – с восточной стороны дома, а хозяйственные помещения – с восточной или западной стороны. Ориентация основного фасада здания на южную сторону позволит получить дополнительную возможность обогрева помещений за счет солнечной энергии в зимние месяцы, увеличить использование светового дня. Кроме того, такая ориентация здания может использоваться для получения солнечной энергии или нагрева воды для отопления самого здания. Необходимо предусматривать максимальное остекление южных фасадов и минимальное остекление северных фасадов здания. С северной стороны можно расположить мастерскую или гараж, неотапливаемый зимний сад или веранду. Обязательным условием также является наличие входного тамбура. Затененность дома деревьями и другими строениями должна быть исключена.

Пример планировки энергоэффективного малоэтажного здания показан на рис. 19.

В регионах с холодным климатом оптимальным решением является устройство только одного окна для освещения кухни. Минимальное количество окон должно быть предусмотрено также в западной и восточной стенах здания, а южная стена должна быть полностью остеклена. В некоторых проектных решениях для увеличения энергоэффективности здания только треть остекленной поверхности используется для естественного освещения и инсоляции жилой комнаты. В остальной части стены за остеклением размещается железобетонная стеновая панель (стена Тромба) с окрашенной в черный цвет наружной поверхностью. Зазор между этой

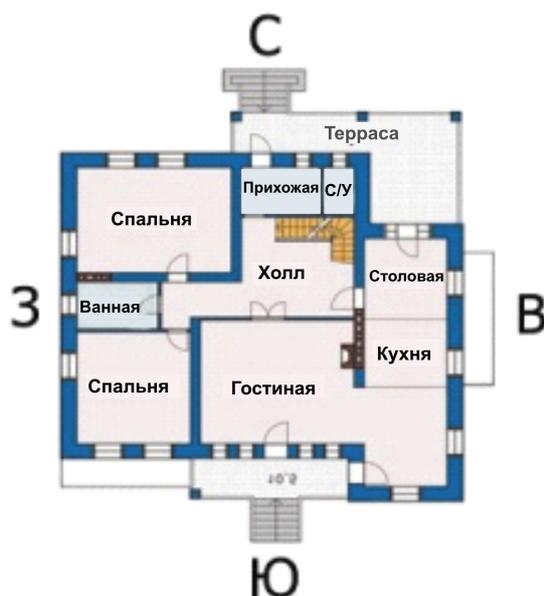


Рис. 19. Планировка и ориентация малоэтажного здания относительно сторон света

стеновой панелью и внутренним стеклом образует своего рода солнечную теплицу. Таким образом, солнечная радиация, проходя через остекление, поглощается черной поверхностью бетонной стены и нагревает ее.

### 1.5.2. Энергоэффективные строительные материалы

Существуют разные варианты утепления ограждающих конструкций здания энергоэффективными строительными материалами. Выбор конкретного варианта зависит от климатических условий и принимаемого на этапе строительного проектирования конструктивного решения [4]. Можно выделить два основных варианта утепления ограждающих конструкций:

- 1) многослойная стена с конструктивным слоем и слоем утеплителя (теплотехнически неоднородная ограждающая конструкция);
- 2) стена, в которой слой утеплителя и конструктивный слой совпадают (теплотехнически однородная ограждающая конструкция).

Одним из самых эффективных теплоизоляторов в строительстве является воздух, поэтому энергоэффективность строительных материалов во многом определяется процентным отношением объема пор, заполненных воздухом, к объему скелета каркаса, образующего эти поры. При этом есть прямая зависимость между теплопроводностью материала, удельным весом и его прочностными характеристиками. Также воздух может быть самостоятельным слоем утепления в многослойных стенах и таким образом обеспечивать теплоизоляцию.

Паропроницаемостью называется способность строительного материала проводить некоторое количество водяного пара через себя за

единицу времени. При проектировании энергоэффективного дома следует помнить, что наружные элементы здания должны быть паропроницаемыми, при этом паропроницаемость материалов должна возрастать по направлению изнутри наружу здания. В противном случае возможно образование точки росы в холодной зоне и накопление влаги в ограждающей конструкции с последующим ухудшением ее теплоизоляционных свойств и образованием плесени и грибка.

Точка росы – это значение температуры, до которой должен охладиться воздух, чтобы содержащийся в нем пар начал конденсироваться в росу. Необходимо избегать образования точки росы либо максимально переносить точку росы к внешним слоям ограждающей конструкции и обеспечивать вентиляцию этих увлажненных внешних слоев. Чтобы избежать повреждения конструкций вследствие их увлажнения (диффузии пара), могут быть использованы два метода:

1. На теплую и влажную внутреннюю сторону наружной стены необходимо нанести слой пароизоляции из строительных материалов, замедляющих диффузию пара, а на наружную сухую и холодную сторону стены необходимо нанести теплоизолирующий слой из материала, не препятствующего диффузии пара.

2. Утеплить внешнюю стену снаружи, тогда слой теплоизоляции покроет большую часть конструктивного элемента и температура внутри стены повысится. В этом случае риск выпадения конденсата снижается. Напротив, при установке внутренней теплоизоляции температура в наружных слоях ограждающей конструкции снижается и риск выпадения конденсата возрастает, особенно если внутренняя теплоизоляция не защищена пароизолирующими слоями.

Рынок энергоэффективных строительных материалов в России сегодня достаточно широк, поэтому их выбор должен основываться на теплотехнических расчетах и исходить из проектных конструктивных и объемно-планировочных решений энергосбережения. Примеры значений некоторых характеристик теплотехнических показателей строительных материалов, изделий и конструкций приведены в СП 50.13330.2012 [16]. Ниже приводится описание некоторых энергоэффективных строительных материалов, изделий и конструкций.

### **Теплоизоляционные строительные материалы**

**Пенополистирол (вспененный полистирол)** производится путем вспенивания полистирола, помещенного в блок-форму. Водопоглощение этого материала при длительном пребывании в контакте с водой возрастает.

тает до 5 %, что отрицательно сказывается на морозостойкости материала и ухудшает его теплотехнические характеристики. Область применения: плиты из вспененного полистирола применяются в качестве внутренней теплоизоляции (например, в трехслойных панелях). Данный материал не рекомендуется применять для утепления помещений изнутри, а также при устройстве вентилируемых фасадов, поскольку это пожароопасный строительный материал, требующий наличия в своем составе антипиреновых добавок. Кроме того, при нагреве и естественном старении данный материал может выделять летучие соединения, опасные для здоровья человека. Применение данного материала при утеплении фундамента также имеет существенные ограничения и возможно лишь в том случае, когда полностью отсутствует угроза подтопления фундамента подземными водами. Низкая прочность при кратковременном сжатии и длительной сжимающей нагрузке не позволяет применять этот материал для утепления фундамента снаружи, поскольку в этом случае пенополистерол будет испытывать на себе боковое давление грунта.

**Экструдированный пенополистирол** производят из гранулированного полистирола методом экструзии. Экструдированный пенополистирол имеет низкие значения водопоглощения (не более 0,4–0,5 %) и высокую морозостойкость (выдерживает более 1000 циклов замораживания-оттаивания), биостойкость. Способен выдерживать достаточно большие нагрузки, при контакте с растворами солей, кислотами, щелочами, маслами, спиртами, цементом не разрушается и не повреждается. Недостатки экструдированного пенополистирола: высокая стоимость, отсутствие паропроницаемости, в случае возникновения пожара тлеет с выделением токсичных веществ. Данный материал следует защищать от воздействия органических растворителей (например, бензина, керосина), высоких температур, а также не рекомендуется длительное время хранить под солнечными лучами. Этот материал не подойдет для теплоизоляции крыш в банях и саунах. Область применения: для утепления фундамента и изготовления несъемной опалубки, утепления фасадов, балконов и лоджий, цокольных этажей, подвалов, кровли, может применяться как для внешней, так и для внутренней теплоизоляции зданий. Для изоляции стен фундамента подходят плиты экструдированного пенополистирола с удельным весом не менее 20 кг/м. При утеплении стен экструдированным пенополистиролом необходимо предусматривать систему дополнительной вентиляции.

**Пеностекло** (газостекло) является универсальным теплоизоляционным материалом, который состоит из вспененной стекломассы и об-

ладает полной паронепроницаемостью и водонепроницаемостью. Данный материал нерастворим в воде и не подвержен действию кислот и органических растворителей, является прочным, влагостойким, долговечным (срок службы не менее 70 лет), экологичным, морозостойким. Пеностекло не горит и не выделяет дыма и токсичных веществ, поэтому может применяться для утепления горизонтальной кровли, полов и фундаментов. Недостатки пеностекла: высокая стоимость, значительный вес по сравнению с другими видами утеплителя, кроме того, это материал, требующий четкого соблюдения рекомендаций при производстве и работе с ним.

При утеплении фасадов необходимо использовать паропроницаемое пеностекло, полученное методом холодного вспенивания. Совместное использование утеплителя и защитной штукатурки на базе пеностекла позволяет создать независимую от климатических зон изоляционную систему. Такой защитный штукатурный слой из пеностекла исключает впитывание воды утеплителем, а также возможность образования мостиков холода, что повышает энергоэффективность всего здания. Как правило, пеностекло применяется при утеплении здания снаружи. В случае утепления помещений изнутри необходимо избегать попадания влаги между утеплителем и стеной. Существуют также готовые фасадные панели из вспененного стекла. Небольшая толщина ограждающей конструкции из вспененного стекла существенно увеличивает полезную площадь застройки, поскольку тепловой контур вынесен за пределы каркаса здания. Применение готовых фасадных панелей позволяет компенсировать возможные отклонения от геометрии каркаса здания и обеспечивает высокое качество и скорость монтажа.

Плиты из паропроницаемого вспененного стекла можно применять для теплоизоляции и шумоизоляции потолков. Для утепления пола можно использовать блоки и плиты из паропроницаемого вспененного стекла. Блоки пеностекла рекомендуется также применять для теплоизоляции цоколей в грунте и выше отмостки.

Пеностекольный гравий и пенокрошка могут применяться в качестве теплоизоляционного слоя под фундаментом мелкого заложения и по периметру фундамента.

**Пенополиуретан** – это гидроизоляционный, теплоизоляционный и звукоизоляционный материал, являющийся разновидностью газонаполненной пластмассы. Принцип действия пенополиуретана: два жидких компонента независимо друг от друга подаются в распылитель, перемешиваются. После попадания на заданное основание смесь вспенива-

ется и твердеет. Адгезия к основанию возникает по всей поверхности, что позволяет не использовать крепеж. Толщина напыляемого слоя не ограничена [1]. Может применяться для теплоизоляции наружных и внутренних стен, кровли, оконных проемов, утепления фундамента, путем послойного напыления на фундамент.

Его достоинства: монолитность и отсутствие швов, гидроизолирующие, теплоизолирующие и шумоизолирующие свойства, прочность, малый вес, плотное прилегание к утепляемой поверхности, стойкость к воздействию кислот и щелочей, отсутствие «мостиков холода», экологичность, устойчивость к воздействию микроорганизмов, продолжительный срок эксплуатации (более 30–50 лет при правильных условиях эксплуатации). Недостатки: неустойчивость к ультрафиолетовому излучению, низкая паропроницаемость, высокая стоимость, трудоемкость нанесения, горючесть. Наносить пенополиуретан следует непосредственно на сухую и чистую утепляемую поверхность с помощью специального оборудования.

**Базальтовая минеральная плита (каменная вата)** состоит из искусственных минеральных волокон и может быть использована для утепления практически всех конструкций: стен, кровель, перекрытий, покрытий и перегородок. За счет наличия пустот между волокнами каменной ваты обеспечивается ее высокая теплоизолирующая способность и звукоизоляция. В настоящее время является одним из самых востребованных теплоизоляционных материалов в странах СНГ и Европы. В качестве сырья для изготовления минеральных плит используются горные породы (базальт, диабаз, известняк, доломит, глина и др.).

Достоинства данного материала: устойчивость к перепадам температур и атмосферным осадкам, низкий коэффициент теплопроводности, негорючесть и устойчивость к высоким температурам, паропроницаемость, биостойкость, высокая прочность на сжатие, малый вес, доступная цена. Недостатки каменной ваты: нестойкость к длительному воздействию воды и ультрафиолета, образование в процессе монтажных работ большого количества пыли.

Каменная вата выпускается в виде мягких матов и плит, в том числе армированных и фольгированных для утепления зданий, а также в виде жестких цилиндров и плит с армированием и фольгированием для утепления труб, дымоходов и воздуховодов. Область применения: базальтовая минеральная вата с меньшими значениями плотности может применяться как утеплитель для внутренних стен, перегородок, нежилых чердаков, бань и саун (при условии наличия гидроизоляции утеплителя); с большими значениями плотности – как утеплитель для

фасадов любого типа, потолков, полов, межэтажных перекрытий, кровли, мансардных помещений, трубопроводов, каминов, вентиляционного оборудования.

**Стекловолоконная вата** – это материал, состоящий из минеральных волокон, как и каменная вата. В отличие от каменной ваты стекловолоконная вата имеет более толстые и длинные волокна, что позволяет ей обладать повышенной упругостью и прочностью. Достоинства стекловолоконной ваты: обеспечивает хорошую теплоизоляцию и звукоизоляцию, обладает химической стойкостью, высокой вибростойкостью, негигроскопична, пожаростойчива, не выделяет токсичных веществ под воздействием огня, характеризуется малой плотностью и весом; прочность, эластичность и гибкость.

Недостатки: температуростойкость стекловолоконной ваты существенно ниже, чем у базальтовой минеральной ваты; при монтаже может образовывать большое количество пыли, требует работы с использованием средств индивидуальной защиты.

Область применения: для тепловой изоляции строительных конструкций, для утепления любых неровных поверхностей и конструкций любой формы. Жесткие плиты из стекловолоконной ваты, облицованные стекловолокном, способны выдерживать значительные нагрузки и являются хорошей ветрозащитой. Стекловолоконные материалы обычно прессуются в рулоны и благодаря упругим свойствам быстро восстанавливают первоначальный объем практически сразу после вскрытия рулона.

**Эковата** – это целлюлозное волокно, которое на 80 % состоит из волокон целлюлозы, 12 % составляет борная кислота, обладающая свойством антисептика для защиты от грибка и бактерий, 8 % – тетраборат натрия, являющийся антипиреном, снижающим уровень горючести. Благодаря добавкам антисептиков и антипиренов (нетоксичных и безопасных для человека) эковата относится к группе огнестойких материалов, исключает появление грибка и плесени.

Данный материал обладает хорошими теплоизоляционными и механическими свойствами, позволяющими создать бесшовный однородный слой. Преимуществами эковаты является способность поглощать влагу без существенного ухудшения теплоизоляционных свойств, даже при значительном увлажнении материала (до 20 %). Однако условия эксплуатации эковаты должны предполагать проветриваемость слоя утеплителя. Такую теплоизоляцию не стоит использовать при утеплении цокольного этажа и перекрытий над подвальными помещениями, в которых уровень влажности стабильно высокий и вла-

га не покидает теплоизолирующий слой. Эковата, которая подается в конструкцию по шлангу выдувной машиной, проникает в самые труднодоступные полости и образует непрерывный и бесшовный теплоизоляционный контур. Бесшовность теплоизолирующего слоя из эковаты препятствует образованию «мостиков холода» и пустот. Звукоизолирующие свойства эковаты позволяют ей амортизировать звуковые волны в отличие от пенополистирола и надежно защищать внутренние помещения от шума снаружи здания.

Утепление здания с использованием эковаты можно выполнить несколькими способами:

1) промышленный вариант предполагает распыление эковаты на утепляемую поверхность, а также укладку в каркас сухой эковаты (сухой способ);

2) мокрый способ предполагает использование в качестве клеящего вещества лигнина, что подходит для утепления кирпичных и блочных зданий.

Срок окупаемости утепления фасада здания эковатой составляет не более трех лет. Затраты на отопление снижены в восемь раз [1].

К недостаткам можно отнести дороговизну оборудования для утепления эковатой и необходимость привлечения высококвалифицированных специалистов. Жесткость эковаты по сравнению с пенополистирольными плитами гораздо ниже, что не позволяет использовать ее для бескаркасной самостоятельной теплоизоляции при устройстве напольных стяжек. Экономичным и технологичным решением для хорошо утепленного здания в случае утепления эковатой будет являться каркасная стена толщиной 45–50 см [1].

**Керамзит** – пористый и легкий материал, образованный путем обжига глины. Материал имеет форму овальных или круглых гранул, производится также в виде песка – керамзитовый песок. Достоинства керамзита: его невысокая стоимость, экологичность, морозоустойчивость, долговечность, прочность, огнестойкость, отсутствие грызунов. Область применения: утепление фундаментов, полов первого этажа, крыши, мансарды и перекрытий между этажами; может использоваться в качестве заполнителя в легком бетоне, для изготовления «теплого» кладочного раствора, для производства керамзитобетонных блоков, в качестве обратной засыпки, имеющей теплоизоляционное и звукоизоляционное значение.

Область применения: изготовление «теплого» кладочного раствора, утепление и звукоизоляция полов, фундамента, стен и кровли, теплоизоляция трубопроводов, в качестве теплоизолирующей обратной засыпки.

Виды керамзита:

1) гравий керамзитовый фракции 20–40 мм используется для засыпки чердачных помещений, фундаментов и помещений, где необходим достаточно большой теплоизолирующий слой;

2) гравий керамзитовый фракции 10–20 мм применяется в качестве утеплителя для кровли, деревянных полов и стен;

3) гравий керамзитовый фракции 5–10 мм наиболее востребован и широко применяется при изготовлении «теплых» полов, утеплении фасадов по технологии «капсимет», производстве бетонных изделий и конструкций (керамзитобетонные блоки);

4) песок керамзитовый фракции 0–5 мм применяется при устройстве цементных стяжек для полов, при изготовлении различных бетонных изделий;

5) песок керамзитовый фракции 0–3 мм применяется при изготовлении «теплого» кладочного раствора.

Для утепления потолка керамзитом можно использовать керамзит двух разных фракций для более плотной засыпки и более надежной теплоизоляции.

Утепление фундамента керамзитом можно выполнять снаружи фундамента либо изнутри. При утеплении фундамента снаружи большое внимание следует уделить устройству дренажа и экранированию гидроизоляционным материалом от внешней среды, поскольку при смачивании подземными водами керамзит теряет свои теплоизоляционные свойства. Устройство отмостки по периметру здания позволяет улучшить теплоизоляционные свойства керамзитового слоя. В случае утепления подпольного пространства изнутри выполняется засыпка керамзитом всего внутреннего пространства под полом или по периметру помещения, вдоль стенок фундамента, с выполнением при этом опалубки. В этом случае между слоем керамзитовой засыпки и черновым полом не должно быть щелей.

Для утепления и звукоизоляции глухой части стены в области кладочных швов могут применяться теплоизоляционная штукатурка и кладочные смеси. **Теплоизоляционная штукатурка** – это сухая штукатурная смесь на основе цемента, полимерных и пластифицирующих добавок и пеностекла, применяемая для выравнивания и утепления прочных недеформирующихся стен из бетона, кирпича, пенобетона, газобетона и других материалов. На стенах они образуют теплоизоляционный бесшовный слой с коэффициентом теплопроводности 0,11–0,13 Вт/(м·К) и паропроницаемостью от 0,14 мг/(м·ч·Па) у смесей для внутренних ра-

бот до 0,21 мг/(м·ч·Па) у смесей для наружных работ [4]. Их преимуществом является простота нанесения. Теплоизоляционная штукатурка наносится вручную или машинным способом в отличие от длительной процедуры укладывания многослойной конструкции из утеплителя, штукатурки, крепежных материалов и сетки. Такая штукатурка может применяться как для наружных, так и для внутренних работ.

**Теплоизоляционная кладочная смесь** («теплый» кладочный раствор) состоит из легкого минерального наполнителя, обладает низкой теплопроводностью и предназначена для выполнения кладки с функцией теплоизоляции. Может применяться в качестве раствора для кирпичной и каменной кладки, для кладки поризованных блоков и камней, а также для заполнения и замоноличивания крупных пустот и щелей. Исследования показывают, что использование в качестве раствора теплоизоляционной кладочной смеси повышает термическое сопротивление ограждающей конструкции по сравнению с использованием обычного цементно-песчаного раствора примерно на 20 %. Некоторые кладочные смеси изготавливаются с применением системы внутреннего армирования, что повышает прочность на изгиб и устойчивость шва к деформациям при перепадах температур.

Основание для теплоизоляционной штукатурки и кладочной смеси должно быть сухим, чистым, прочным, не должно подвергаться усадке или деформациям.

**Теплоизоляционное покрытие из наногеля (аэрогеля)** – это одно из инновационных решений для теплоизоляции и звукоизоляции ограждающих конструкций зданий. Структура аэрогеля представляет собой древовидную сеть из объединенных в кластеры частиц размером 2–5 нм и заполненных воздухом пор размером до 100 нм. Его достоинства: хорошие теплоизоляционные свойства, экологичность, светопрозрачность, малый вес, водонепроницаемость, стойкость к перепадам температур, пожаростойкость. Данный материал можно применять при реконструкции существующих зданий. Размер частиц наногеля колеблется в интервале от 0,5 до 4,0 мкм, диаметр пор – 20 нм. По данным работы [1] теплоизоляционная панель толщиной 25 мм, наполненная наногелем, изолирует тепло в 1,5 раза лучше минераловатной панели той же толщины и в два раза лучше, чем стекловата. Область применения наногеля: утепление внутренних и наружных поверхностей стен, в том числе многослойных, кровли, при устройстве теплых полов.

**Термопена (заливочный пенопласт, пеноизол)** – это теплоизоляционный материал, полученный из пеноизола. Для его производства

используются карбамидные смолы, пенообразователи и кислоты, которые, перемешиваясь, формируют пену. Достоинства термопены: хорошие теплоизоляционные и звукоизоляционные свойства, паропроницаемость, малая плотность материала, пожаростойкость, отсутствие мостиков холода и меньшая стоимость по сравнению с теплоизоляцией готовыми плитами. Недостатки: низкая прочность на разрыв по сравнению с экструдированным полистиролом; при длительном увлажнении может снижать свои теплоизоляционные свойства; в период полимеризации и сушки выделяет вместе с водой незначительное количество газообразного формальдегида; из-за гигроскопичности этот материал нельзя использовать для утепления подземной части фундаментов и в качестве утеплителя под железобетонную стяжку, может давать усадку в процессе сушки до 1 %.

Область применения: в качестве утеплителя при реконструкции зданий, для заполнения пустот и полостей, например в кирпичной кладке, мест сопряжений оконных проемов и дверных проемов со стеной, для заполнения полостей, образовавшихся из-за некачественного монтажа и усадки минеральной ваты или сыпучего утеплителя, для заполнения полостей, образовавшихся от уничтоженного грызунами пенополистирола, для наружного утепления стен, фасадов, балконов, полов, перекрытий.

**Вакуумная изоляционная плита** обладает хорошей теплоизоляцией и обычно применяется при промышленных методах теплоизоляционных работ. Сборные вакуумные изоляционные плиты широко применяются в холодильной промышленности и в строительной отрасли. Вакуумная изоляционная плита состоит из заполнителя, диафрагмы и газопоглотителя. Достоинства такой плиты: малая масса, повышенная надежность, огнестойкость, экологичность, длительный срок службы при условии правильной эксплуатации.

**Древесно-цементные плиты и изделия** имеют ряд достоинств: хорошие теплоизоляционные и звукоизоляционные свойства, влагостойкость, морозостойкость, огнестойкость, стойкость к воздействию микроорганизмов и насекомых.

**Фибролит** – еще один пример строительного материала из спрессованной древесной стружки. Можно выделить следующие виды плит из цементного фибролита:

- стандартные плиты из цементного фибролита;
- композитные плиты из цементного фибролита (сэндвич-плиты с наполнителем из полистирола, пенополиуретана, минеральной ваты или другого изоляционного материала);

– армированные кровельные плиты из цементного фибролита [1].

Достоинства использования фибролитовых магнезиальных плит в качестве материала для обшивки каркаса: негорючесть материала, экологичность, теплоизоляция и звукоизоляция, простота использования, материал легко пилится и монтируется.

**Материал Durisol** («Дюрисол») на 80–90 % состоит из щепы хвойных деревьев, обработанной минеральными добавками и скрепленной портландцементом. Это экологичный, легкий, прочный и долговечный материал, который обладает отличными теплоизоляционными и звукоизоляционными характеристиками, огнестойкостью, не подвержен воздействию микроорганизмов, морозоустойчив, не требует привлечения тяжелой грузоподъемной техники. Материал имеет повышенную адгезию к штукатурным составам, что значительно упрощает процесс отделки стен и, в совокупности, ведет к значительному снижению трудоемкости, сроков работ и стоимости готовой конструкции по сравнению с традиционными технологиями. Это легкий в обработке материал, пористая структура которого облегчает финишную отделку штукатурными составами.

Область применения: при монолитном строительстве жилых (индивидуальных и многоквартирных) домов, административных, общественных и производственных зданий и сооружений.

### Теплоизоляционно-конструкционные энергоэффективные материалы

В качестве примера теплотехнически неоднородной ограждающей конструкции можно привести строительные блоки из **кремнегранита (тепlobлоки, теплоэффективные блоки)**. Такие блоки представляют собой многослойную конструкцию, которая обеспечивает несущую способность стены, теплоизоляцию, звукоизоляцию и наружную облицовку (рис. 20).

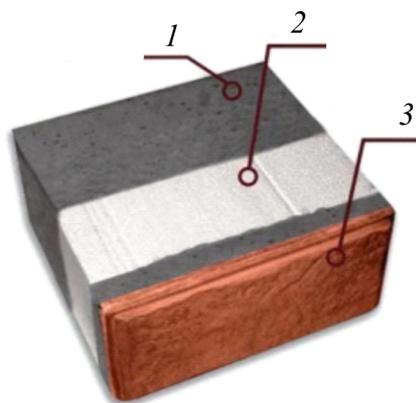


Рис. 20. Схема блока из кремнегранита:

1 – керамзитобетон; 2 – пенополистирол; 3 – фактурный бетон

Лицевая сторона блока (фасадный слой) может иметь самую разнообразную фактуру (например, облицовочная плитка, кирпичная кладка, натуральный камень). Внутренний слой (утепляющий слой) состоит из утеплителя (например, пенополистирола). Третий слой блока (несущий слой) состоит из керамзитобетона и является несущим элементом стены. Слои соединяются друг с другом базальтовыми стяжками. Достоинствами данного строительного материала являются его высокие теплоизоляционные свойства, долговечность, экологичность, малый вес, малый расход клея. Из блоков формируется готовая стена с облицовкой и утеплением [4]. Технология возведения стен из теплоблоков предусматривает почти полное отсутствие «мокрых» процессов. Среди недостатков можно отметить хрупкость лицевой стороны блока и связей между составными частями блока.

Данная технология позволяет выполнять скоростное строительство малоэтажных домов с ограждающими конструкциями из многослойных теплоэффективных блоков и включает в себя следующие подсистемы:

- стены зданий из теплоэффективных блоков с наружным декоративным защитным слоем;
- мелкозаглубленные утепленные монолитные железобетонные фундаменты, совмещенные с цоколем, на песчаной подушке (возможны сваи на слабонесущих грунтах);
- монолитные пространственные железобетонные каркасы (допускается возведение сооружений до трех этажей включительно без использования каркаса);
- малые архитектурные формы для украшения фасада и другие технологии [1].

Экономия затрат на отопление и кондиционирование при эксплуатации домов, построенных из теплоблоков, по сравнению с кирпичными домами составляет 3–3,5 раза. Кладка стен из многослойных теплоэффективных блоков с декоративным наружным слоем выполняется в один ряд (цепная система), что позволяет достигнуть большей скорости возведения стен [1]. Экономия при сооружении фундаментов зданий из теплоблоков составляет примерно 15–20 % за счет малого веса кладки из теплоблоков по сравнению с кирпичной кладкой.

Для решения проблемы снижения расходов энергетических ресурсов при эксплуатации кирпичных зданий в настоящее время разработаны **керамические камни и блоки** крупных размеров с пустотами рациональных размеров (рис. 21).



Рис. 21. Керамический камень

Данный материал обладает всеми преимуществами традиционного кирпича, но имеет более высокие теплоизоляционные свойства. Наружные стены из керамических блоков могут устраиваться однослойными, двухслойными и трехслойными.

Для территорий с теплыми климатическими условиями возможно применение **легкого бетона**, выполняющего сразу две функции: конструктивную и утепляющую.

В качестве примера можно привести **полистиролбетон**, который обладает высоким сопротивлением теплопередаче, низкой объемной плотностью ( $300 \text{ кг/м}^3$  и менее), относительно высокой прочностью на изгиб (по сравнению с керамзитобетоном), морозостойкостью и пожароустойчивостью. Область применения: блоки из полистиролбетона, предназначенные для возведения наружных стен зданий и перегородок, монолитной теплоизоляции стен, полов, чердаков, кровель, каркасных конструкций с неснимаемой опалубкой; плиты утепления фасада и кровли; малые архитектурные формы; замоноличивание стыков наружных панелей. Опыт использования полистиролбетона в наружных ограждающих конструкциях позволяет охарактеризовать полистиролбетон как один из лучших теплоизоляционно-конструкционных материалов [1]. Среди его достоинств можно отметить низкие транспортные расходы и возможность приготовления раствора непосредственно на площадке строительства. При их производстве может быть применен метод объемного вибропрессования, что позволяет ускорить и упростить процесс производства. Однако этот строительный материал имеет ряд недостатков: высокую стоимость гранул полистиролбетона, сложность производственного процесса, необходимость выдержки предвспененных полистирольных гранул перед их использованием.

По сравнению с пенобетоном и газосиликатом полистиролбетон имеет ряд преимуществ:

- быстрее схватывается и твердеет, не дает усадки, что сокращает сроки распалубки;

- в среднем полистиролбетон на 20 % прочнее, а также хорошо работает на растяжение и изгиб;

- его теплопроводность в два раза ниже, кроме того, при эксплуатации содержание влаги в полистиролбетоне будет в пять раз ниже;

- морозостойкость полистиролбетона марки Д500 на 50 % выше, чем у пенобетона и газосиликата той же марки;

- устойчивость к воздействию растворителей, бензина, масел, слабых растворов кислот и щелочей [1].

Кладка полистиролбетонных блоков может выполняться как при помощи специального клея, так и на растворе. Прочностные характеристики этого материала позволяют возводить здания с перекрытиями из пустотных плит высотой до трех этажей. Пенополистиролбетонные блоки отвечают всем требованиям, предъявляемым к массивной однорядной и двухрядной кладке, и при их использовании себестоимость кладки снижается примерно в полтора раза.

**Ячеистый бетон** – разновидность легкого бетона, полученная в результате затвердевания смеси кремнеземистого компонента и воды. В результате вспучивания смеси образуется ячеистая структура бетона с равномерно распределенными по всему объему воздушными порами (рис. 22).



Рис. 22. Блоки из ячеистого бетона

В зависимости от способа изготовления ячеистый бетон подразделяется на **газобетон** и **пенобетон**. При одинаковой плотности газобетон прочнее пенобетона, однако себестоимость производства пенобетона примерно на 20–25 % ниже, чем у газобетона. Кроме того, пенобетон

менее гигроскопичен, чем газобетон. Оптимальным решением может быть сочетание пенобетонных и газобетонных блоков, например: несущие стены здания выполнить из более прочных газобетонных блоков, а перегородки – из пенобетонных блоков.

Ячеистые бетоны обладают малым весом, являются огнестойкими материалами. Кладка стен из блоков осуществляется на легких теплоизоляционных растворах или специальных клеях. Наименее трудоемкими являются однослойные стены, возводимые из пенобетонных блоков. Их толщина должна составлять не менее 240 мм, а штукатурные слои выполняются из минеральных гидрофобизированных растворов, обладающих высокой паропроницаемостью, поскольку применение плотных паронепроницаемых штукатурок способствует накоплению влаги в стенах, появлению грибка и плесени.

С целью рационального использования объемного пространства здания со скатной крышей и использования чердака в качестве жилого помещения для ограждающих конструкций покрытий эффективными будут являться армированные пенобетонные плиты. Последние могут исполнять роль сплошных несущих стропильных систем либо укладываться вдоль ската крыши с опорой на кирпичные поперечные стены – перегородки [1].

Достоинства данного строительного материала: небольшая объемная масса, малая теплопроводность, доступность сырья и простота технологии изготовления.

Недостатки ячеистого бетона: высокое влагопоглощение материала; прочность ниже, чем у кирпича и тяжелого бетона; чувствительность к перепадам температуры. Для укладки блоков необходимо использовать специальный клей, а не цементный раствор. Следует также отметить, что длительно протекающие деформационные процессы усадки в кладке из пенобетона могут вызывать ее растрескивание, особенно в области сопряжения стен с оконными и дверными проемами.

Сорбционная влажность и воздухопроницаемость ячеистого бетона в 5–10 раз больше, чем у тяжелого бетона, поэтому наружная поверхность ограждающей конструкции из ячеистого бетона должна быть покрыта более плотными слоями раствора, керамической плиткой, гидрофобными покрытиями. Эти защитные покрытия и слои предохраняют бетон от увлажнения атмосферной влагой, должны иметь прочное сцепление с поверхностью бетона и морозостойкость не менее 35 циклов, а также достаточную паропроницаемость. Также можно предусмотреть устройство вентилируемого фасада или вентиляционного зазора между

блоками и кладкой облицовочного кирпича. В регионах с влажным климатом наружные стены рекомендуется выполнять щелевыми, состоящими из внутреннего несущего слоя из пенобетонных блоков, воздушной прослойки толщиной 40–150 мм и лицевого защитного слоя толщиной 120 мм в виде кирпичной кладки. Возведение наружных и внутренних стен подвалов из пенобетона стен допускается только при гидроизоляции фундамента и при уровне грунтовых вод ниже подошвы фундаментов.

**Пескоцементные стеновые блоки** для ограждающих конструкций изготавливаются с различной пустотностью и показателями прочности (рис. 23).



Рис. 23. Пескоцементный стеновой блок

Основу блока составляют легкие заполнители, которые занимают до 50 % его объема. При производстве пескоцементных стеновых блоков также может применяться метод объемного вибропрессования, что значительно ускоряет процесс производства. Однако следует учитывать, что пескоцементный блок даже при 75-процентной пустотности является самым тяжелым среди энергосберегающих материалов, используемых при возведении несущих стен.

Большое внимание следует уделить качеству и плотности сопряжения оконных проемов, дверей и ограждающих конструкций. При оценке теплопроводности теплоизоляционных материалов зачастую не учитывается инфильтрация холодного воздуха через стены, стыки и неплотности оконных проемов. Холодный воздух вызывает снижение температуры ограждающих конструкций, а проникая в помещение, охлаждает воздух и вызывает дополнительные тепловые потери. Такая фильтрация воздуха через стыки приводит к увеличению тепловых потерь через ограждающие конструкции почти в два раза.

Другим слабым местом является сопряжение окон с наружными стенами. В случае некачественного сопряжения атмосферная вода здесь

может попадать в тело ограждающих элементов здания, снижая их теплозащитные свойства и приводя к разрушению строительной конструкции. Ухудшение теплозащитных свойств ограждающих конструкций в холодные месяцы года ведет к образованию конденсата, промерзанию панелей и плесени. В результате термическое сопротивление ограждающих конструкций в четыре-пять раз ниже нормативного значения, а затраты на отопление таких зданий значительно увеличиваются. Тепловизионный контроль качества строительно-монтажных работ (с использованием инфракрасной съемки) позволяет предотвратить потери тепла вследствие некачественного выполнения «скрытых работ», а также дает информацию разработчикам и производителям конструкций по совершенствованию строительных конструкций и инженерного оборудования.

### **1.5.3. Энергоэффективные строительные технологии и системы**

По некоторым подсчетам грамотное комплексное утепление ограждающих конструкций позволяет сократить расходы на отопление здания на 30–70 %. В данном разделе рассмотрены различные варианты утепления ограждающих конструкций и фундаментов зданий. При проектировании новых и реконструкции существующих зданий выделяются два способа утепления – с наружной и внутренней стороны. Выбор оптимального способа утепления зависит от материала конструкций, от облика фасада и требований заказчика.

Оптимальным вариантом утепления ограждающей конструкции с точки зрения влагообмена является утепление с наружной стороны ограждения. В этом случае большая часть ограждающей конструкции будет иметь положительную температуру. Кроме того, система наружного утепления позволит защитить ограждающую конструкцию от осадков, ветра, перепадов температур, водного конденсата. Утепление стен может производиться не только в процессе строительства нового здания, но и при реконструкции существующих зданий и сооружений для повышения теплозащитных характеристик стен.

При выборе системы теплоизоляции необходимо проверить расчетом, удовлетворяет ли конструкция нормам по защите от накопления и конденсации влаги внутри стены. При проектировании и строительстве многослойных ограждающих конструкций необходимо, чтобы паропроницаемость каждого последующего слоя конструкции стены увеличивалась от помещения к наружной стороне стены, что позволит влаге

выходить наружу. В противном случае в ограждающей конструкции будет накапливаться влага, образовываться плесень и грибок.

Зачастую здания могут иметь неотапливаемые чердаки, подвалы, пристроенные гаражи и прочие неотапливаемые помещения. В связи с этим термические границы не всегда совпадают с наружными поверхностями здания. Именно поэтому перед проектированием и выполнением теплоизоляционных работ следует определиться, где будет проходить граница между отапливаемыми и неотапливаемыми помещениями.

### Утепление фундамента

Утепление заглубленных частей зданий и сооружений позволяет сократить тепловые потери, защитить конструкцию фундамента от промерзания, избежать конденсации водяного пара и предотвратить появление сырости, а также развитие плесени. В случае заложения фундаментов выше глубины промерзания пучинистых грунтов или в случае, когда в процессе строительства в зимний период фундаментная плита не была утеплена, в грунтовом основании под ее подошвой могут возникать нормальные силы морозного пучения. Кроме того, теплоизоляционная защита является важным составным элементом гидроизоляционной системы: предохраняет от разрушения и температурного старения гидроизоляционное покрытие.

К материалам, применяемым для утепления фундамента снаружи, предъявляются следующие требования:

- малое водопоглощение;
- низкая теплопроводность;
- высокая прочность при сжатии;
- стойкость к агрессивным подземным водам;
- неподверженность гниению и воздействию грызунов.

Грамотное утепление фундамента здания позволит не только сократить теплопотери, но и защитить фундамент от циклов заморозки-оттаивания. **Утепление фундамента снаружи** является наиболее рациональным и обеспечивает низкий уровень тепловых потерь. Утепление грунта под отмосткой по периметру дома позволит уменьшить глубину промерзания грунтов вдоль стен и под фундаментом, а также удерживать границу промерзания в слое непучинистого грунта – песчаной или гравийной подушке, грунтах обратной засыпки. При этом экструдированный пенополистирол следует укладывать с заданным уклоном отмостки  $\geq 2\%$  от здания. При утеплении вертикальной части фундамента здания утеплитель (например, экструдированный пенополистирол) уста-

навливают на глубину промерзания грунта, определенную для региона строительства. Толщина горизонтальной теплоизоляции должна быть не менее толщины вертикальной теплоизоляции фундамента. Эффективность утепления при более глубокой установке резко снижается. Толщина утепления в угловых зонах (на расстоянии не менее 1,5–2,0 м от угла фундамента в обе стороны) должна быть увеличена в 1,5 раза (рис. 24).

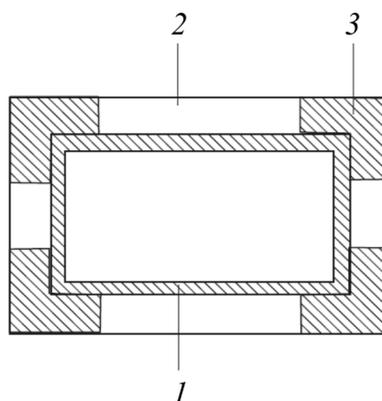


Рис. 24. Схема утепления фундамента: 1 – контур здания; 2 – утепление по периметру здания; 3 – дополнительное утепление в угловых зонах фундамента

Чтобы предупредить проникновение дождевых и талых вод в подземные части здания, следует выполнить планировку поверхности участка под застройку, создавая необходимый уклон для отвода поверхностных вод от здания. Вдоль наружных стен здания устраивают отмостку из плотных водонепроницаемых материалов (асфальт, асфальтобетон). Для защиты от проникновения грунтовой влаги в конструкции здания при новом строительстве обычно выполняется наружная изоляция конструкций со стороны воздействия воды. Для защиты существующей застройки от проникновения грунтовой влаги применяется внутренняя гидроизоляция в подвальных помещениях.

Устройство гидроизоляции подвалов, как правило, определяется характером воздействия воды, особенностью дренируемых конструкций и материалов, а также функциональными требованиями к подвальным помещениям по эксплуатации и допустимой влажности [2]. Существуют различные методы гидроизоляции наружной поверхности стен:

- основные – оклеечные, окрасочные, обмазочные, штукатурные, листовые (кессонные) и глиняные;
- специальные – инъекционные, проникающие (пенетрационные), геомембранные, пропиточные, шовные, подводные, ликвидации активных течей и др.

Для предохранения стен от капиллярной сырости устраивают горизонтальную и вертикальную гидроизоляцию (рис. 25).

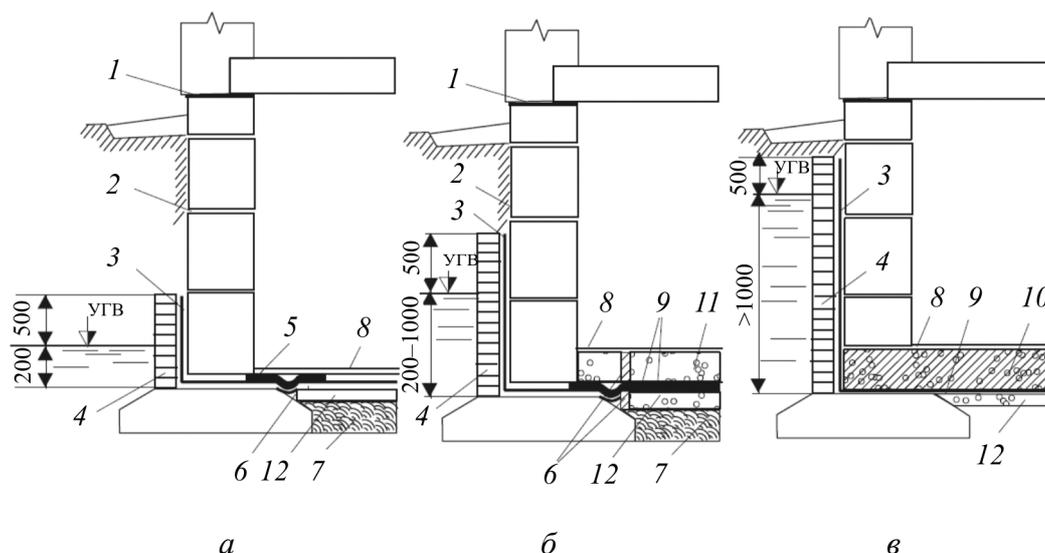


Рис. 25. Примеры гидроизоляции фундамента: *а* – при напоре грунтовых вод менее 200 мм; *б* – при напоре 200–1000 мм; *в* – при напоре свыше 1000 мм; 1 – рулонная гидроизоляция; 2 – окрасочная гидроизоляция (промазка горячим битумом за два раза); 3 – оклеечная гидроизоляция; 4 – защитная стенка из глиняного кирпича-сырца; 5 – стеклоткань; 6 – деформационный шов; 7 – глина; 8 – пол подвала; 9 – стяжка; 10 – железобетонная плита; 11 – пригрузочный слой из бетона; 12 – подготовка [2]

По методу устройства различают гидроизоляцию: окрасочную, штукатурную (цементную или асфальтную), литую асфальтную, оклеечную (из рулонных материалов) и оболочковую (из металла).

Горизонтальную гидроизоляцию при отсутствии подвалов необходимо укладывать в уровне бетонной подготовки пола первого этажа, на 15–20 см выше уровня отмостки (см. рис. 25). При наличии подвала гидроизоляцию устраивают также под полом подвала. Горизонтальная гидроизоляция чаще всего представляет собой два слоя рубероида или толя на мастике, слой асфальтобетона толщиной 10–12 мм или слой цементного раствора толщиной 20–30 мм [2].

Вертикальную гидроизоляцию устраивают для защиты стен подвала. Тип гидроизоляции зависит от степени влажности грунта. В случае маловлажных грунтов можно ограничиться двухразовой обмазкой горячим битумом. В случае увлажненных грунтов выполняют слой цементно-известковой штукатурки, после просушки которой производят обмазку битумом за два раза или оклейку рулонными материалами. При этом следует уделить особое внимание обеспечению совместной работы всех видов гидроизоляции [2].

Пример устройства теплоизоляции и гидроизоляции фундамента приведен на рис. 26.

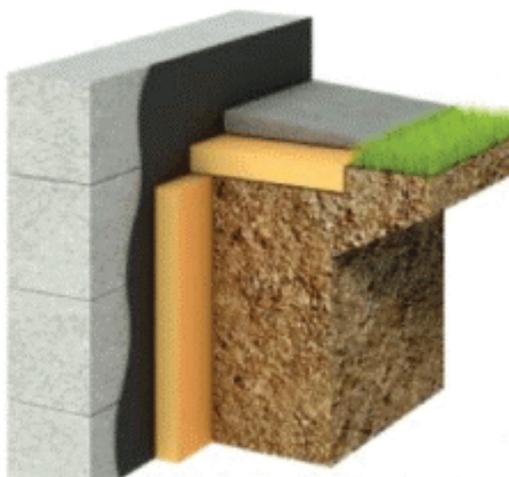


Рис. 26. Теплоизоляция и гидроизоляция фундамента

В строительстве монолитных зданий широкое распространение получили технологии с применением **несъемной опалубки**. В качестве несъемной опалубки может использоваться экструдированный пенополистирол. При применении данной технологии экструдированный пенополистирол выполняет две основные функции: является формой для несъемной опалубки при возведении монолитного здания, а затем является утеплителем ограждающих конструкций этого здания [4].

**Утепление фундамента изнутри** допускается при невозможности утепления фундамента снаружи. Необходимость в теплоизоляции изнутри возникает при обустройстве неутепленных подвальных помещений, а также промерзании внешних стен и углов панельных домов, лоджий. Дополнительное утепление может производиться в ванных комнатах. Расчеты конструкции стены с утеплением изнутри экструдированным пенополистиролом на накопление влаги свидетельствуют о том, что такая конструкция допустима.

Преимуществами данного вида утепления являются:

- отсутствие ограничений по внешним погодным условиям;
- отсутствие сложных технологических процессов;
- отсутствие большого количества комплектующих материалов;
- помещение с внутренней теплоизоляцией прогревается быстрее, чем с внешней теплоизоляцией.

Основными недостатками данного вида утепления являются:

- вероятность возникновения ущерба вследствие влажности и мороза при таком виде теплоизоляции намного выше по сравнению с внешней теплоизоляцией;

– утепление изнутри приводит к сокращению полезной площади помещений. При этом обязательной является проверка стен изолируемой конструкции на возможность накопления в ней конденсационной влаги;

– при внутреннем утеплении фундаменты и наружная стена здания оказываются в зоне низкой температуры, отчасти захватывающей и утеплитель, что приводит к снижению тепловой инерции ограждающей конструкции и утрате стенами своих теплоаккумулирующих свойств. Это значительно ухудшает климат в помещениях здания, утепленных таким образом.

Для защиты фундамента от морозного пучения необходимо произвести его утепление по периметру всего здания. Для этого делают выемку на глубину 700 мм ниже подошвы крыльца или лестницы. На дне выемки устраивают песчаную подушку толщиной не менее 400 мм из непучинистого грунта. На уплотненное песчаное основание укладывают плиты экструдированного пенополистирола требуемой толщины. Поверх утеплителя насыпают слой песка не менее 50 мм, на который устанавливается лестничный марш или крыльцо. Для защиты основания крыльца от промерзания утеплитель должен выступать за границы крыльца не менее чем на 1,2 м.

На подъезде к гаражу в результате морозного пучения грунтов также могут проявиться деформации основания. Такая площадка перед гаражом постоянно очищается от снега, а значит, грунт основания под ней промерзает на большую глубину. Предотвратить деформации основания можно путем устройства теплоизоляции под площадкой или дорогой, ведущей к гаражу. Для этого под площадкой выкапывают небольшой котлован глубиной около 0,4 м. Его ширина с каждой стороны должна быть минимум на 1,2 м больше ширины дороги [2].

На дне котлована устраивают песчаную подушку толщиной не менее 100–200 мм, на которую укладывают плиты из экструдированного пенополистирола требуемой толщины. Далее утеплитель засыпают дополнительным слоем песка толщиной 200 мм, по которому укладывают покрытие из плит или асфальта. Утеплитель, расположенный за пределами эксплуатируемого покрытия, засыпается слоем песка (около 20–30 мм), после чего выемка заполняется грунтом и выравнивается.

Аналогичным образом можно утеплить площадки перед домом и пешеходные дорожки, покрытые плиткой. При этом выемка под утеплитель должна быть с каждой стороны площадки или дорожки на 1,2 м шире.

Трубопроводы можно утеплить, расположив теплоизоляционные плиты сверху и по бокам (рис. 27).

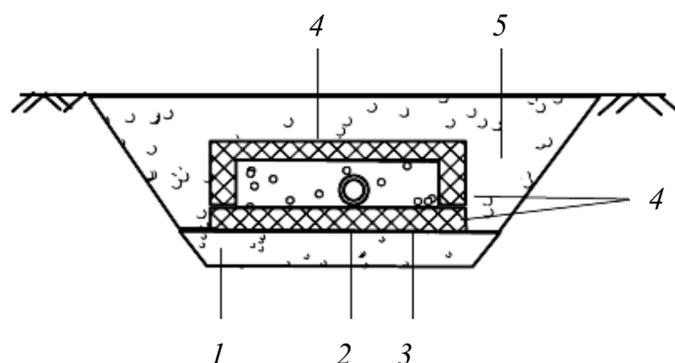


Рис. 27. Теплоизоляция трубопровода: 1 – песчаная или гравийная подсыпка толщиной 100 мм; 2 – изолируемые трубы; 3 – песчано-гравийная смесь толщиной 100 мм; 4 – экструдированный пенополистирол; 5 – засыпка песком, гравием или грунтом [2]

Особое внимание следует уделить утеплению цоколя здания – переходной конструкции от фундамента к наружным стенам здания. Зачастую цоколь является стеной, ограждающей помещения подполья, и участвует в формировании температурно-влажностного режима подпольного пространства и всего дома. Цоколь здания находится в неблагоприятных условиях грунтовой влаги, росы, атмосферных осадков, многократных циклов замораживания и оттаивания, поэтому его необходимо выполнять из прочных водоустойчивых и морозостойких строительных материалов. Для облицовки цоколя применяют каменные плиты, керамическую плитку или штукатурный раствор на цементной основе, а в качестве утеплителя при наличии отапливаемого подвала чаще всего используют экструдированный пенополистирол. К теплозащите цоколя предъявляют те же требования, что и к наружным стенам.

По отношению к наружной плоскости стены цоколь может быть западающим (рис. 28), выступающим (рис. 29) или находиться в одной плоскости со стеной.



Рис. 28. Пример западающего цоколя



Рис. 29. Пример выступающего цоколя

Устройство западающего цоколя имеет ряд преимуществ, поскольку такая конструкция цоколя имеет меньшую толщину, защищена от воздействия воды, стекающей со стены. Однако устройство такого цоколя не всегда возможно. В ряде случаев целесообразно выполнить цоколь в одной плоскости со стеной, при этом устрой по верху цоколя выступающий поясok для защиты гидроизоляционного слоя.

Для круглогодично эксплуатируемых зданий изнутри цокольного ограждения необходимо устраивать теплоизолирующую отсыпку, минераловатную или плитную прокладку. В полах обязательна установка вентиляционных решеток, в противном случае в помещениях подполья будет затхлый воздух [2]. При утеплении цоколя теплоизоляционный материал, как правило, располагается с наружной стороны (рис. 30).

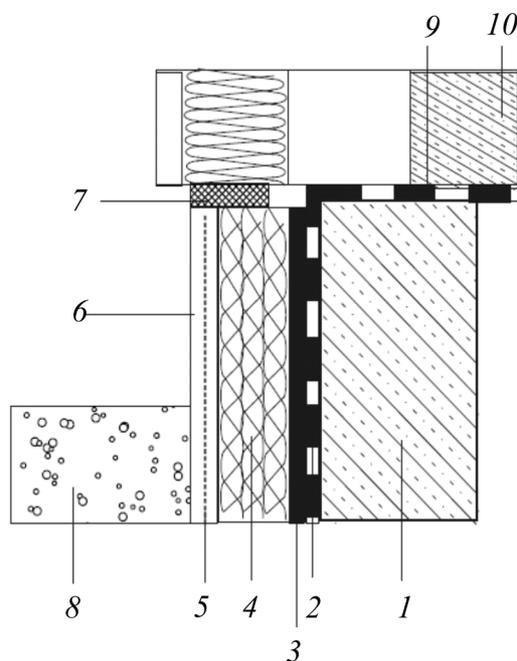


Рис. 30. Пример утепления цоколя здания: 1 – фундамент; 2 – вертикальная гидроизоляция подвала; 3 – клеящая мастика; 4 – экструдированный пенополистирол; 5 – армирующая сетка; 6 – наружный штукатурный слой; 7 – уплотняющая лента; 8 – дренажный слой (гравий); 9 – горизонтальная гидроизоляция; 10 – плита цокольного перекрытия [2]

Для монтажа пенополистироловых плит следует использовать клеи и мастики, не содержащие компонентов, растворяющих полистирол. Горячие битумные мастики также непригодны для крепления этого материала. Установленные плиты экструдированного пенополистирола с наружной стороны должны быть защищены от разрушительного воздействия окружающей среды (солнечных лучей) слоем штукатурки по

сетке. Можно использовать тонкие сетки из стекловолокна или металлические сетки. Наружный штукатурный слой не должен контактировать с влажным грунтом. Для этого удаляют грунт, прилегающий к цоколю; штукатурку, находящуюся ниже уровня земли, защищают от влаги битумной мастикой, а образовавшуюся выемку засыпают гравием (рис. 31).

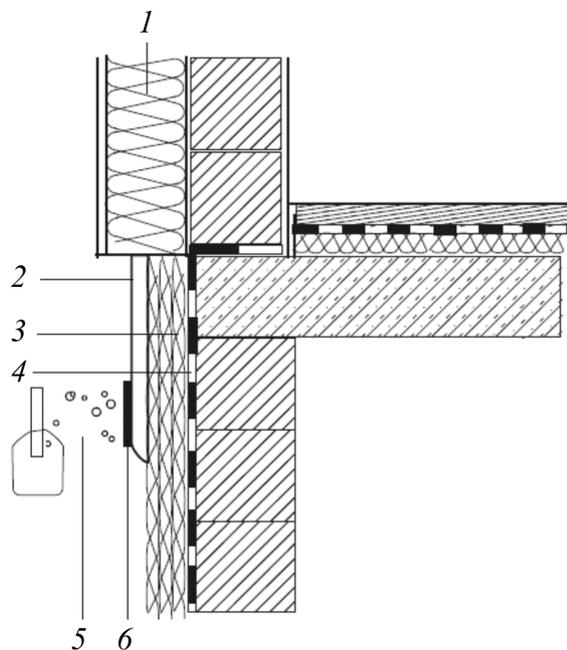


Рис. 31. Пример защиты утеплителя цоколя от воздействия окружающей среды: 1 – система наружного утепления стены; 2 – цокольная штукатурка; 3 – экструдированный пенополистирол; 4 – гидроизоляция фундамента; 5 – гравий; 6 – гидроизоляция битумной мастикой [2]

В том случае, когда в здании предполагается устройство теплого пола, вместо цоколя можно устроить забирку. При строительстве зданий на столчатых фундаментах цокольную часть между столбами заполняют конструкциями, выполняемыми из атмосферостойких материалов и называемыми забирками (рис. 32).

Минимальная толщина стенки забирки принимается [2]:

- для бутовой кладки – 200 мм;
- для кирпичной кладки – 120 мм;
- для армированного бетона – 100–120 мм.

Забирка заглубляется в грунт на глубину 200–300 мм. Если грунт пучинистый, то под забиркой следует устроить песчаную подушку толщиной 150–200 мм. Ширина устраиваемой песчаной подушки должна на 200 мм превышать ширину забирки.

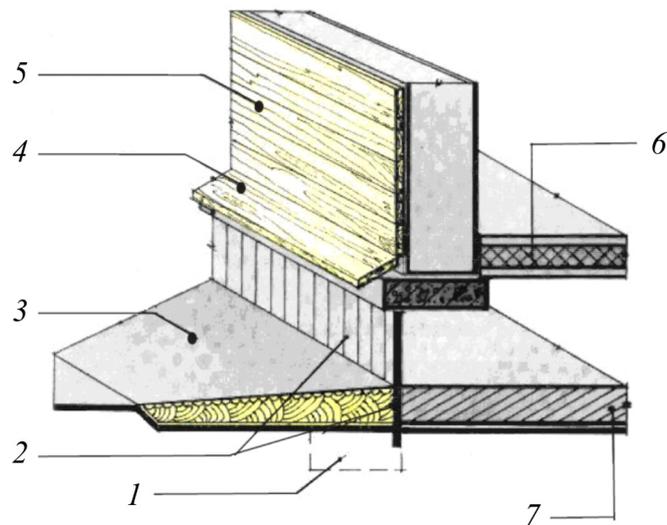


Рис. 32. Пример конструкции фундамента с забиркой:  
 1 – фундаментный столб; 2 – забирка; 3 – отмосвка; 4 – сливная доска;  
 5 – обшивка стены; 6 – теплый пол; 7 – грунт уплотненный

Фундаментный столб выводят выше планировочной отметки земли на 45–60 см. По верху фундамента ставят монолитную переемычку, и с наружной стороны крепят плоский или волнистый асбестоцементный лист (забирку). Для повышения водостойкости асбестоцементные листы можно отделать масляной краской для наружных работ, предварительно промазав их горячей олифой. В забирке должны быть предусмотрены 2–3 вентиляционных отверстия (размером 150×150 мм) с каждой стороны здания на расстоянии 150 мм от отмосвки. Такие отверстия располагают одно напротив другого. На зиму отверстия закрывают пробками, а в летнее время продухи открывают.

Зачастую фундамента совмещают со стенами подвалов. В этом случае их надежная эксплуатация может быть обеспечена только при наличии теплоизоляции наружных конструкций, соприкасающихся с грунтом.

### Утепление ограждающих конструкций

Энергоэффективность наружных ограждающих конструкций зданий может обеспечиваться за счет использования фасадных систем, включающих в себя минеральные теплоизоляционные материалы. Как уже было сказано ранее, различные теплоизоляционные материалы обладают различной паропроницаемостью и могут препятствовать влагопереносу через ограждающую конструкцию.

К наиболее известным и распространенным строительным стеновым системам относятся:

1) вентилируемые конструкции утепления наружных стен (вентилируемые фасады) – рис. 33;

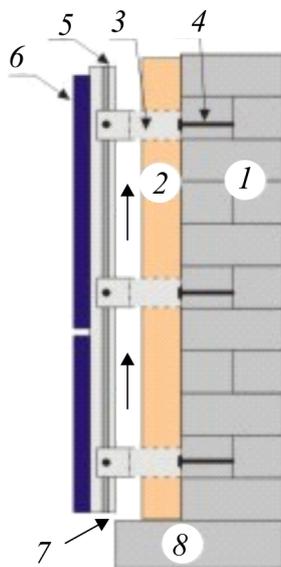


Рис. 33. Схема вентилируемого фасада: 1 – стена;  
2 – утеплитель; 3 – кронштейн; 4 – анкерный болт;  
5 – профиль-основа; 6 – кассеты из композитной панели;  
7 – воздушный поток; 8 – цоколь

2) невентилируемые конструкции утепления наружных стен с использованием минераловатных и полистирольных плит с креплением их непосредственно на стены или на каркас (рис. 34);

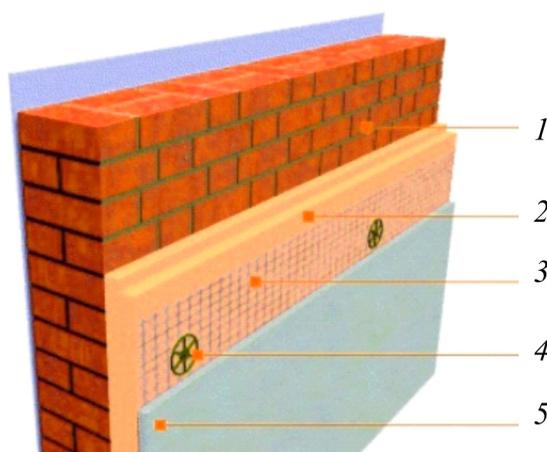


Рис. 34. Схема невентилируемого фасада:  
1 – стена; 2 – утеплитель; 3 – армирующая сетка;  
4 – крепежный дюбель (грибок); 5 – фасадная штукатурка

3) различные сочетания предыдущих двух вариантов систем с использованием местных утеплителей.

Навесные **вентилируемые фасады** (см. рис. 33) применяют в тех случаях, когда фасад здания или сооружения подвергается активному воздействию окружающей среды (осадки, ветер), а также когда необходимо сделать акцент на художественном оформлении фасада. Такая фасадная система состоит:

- из металлической или деревянной конструкции, прикрепленной к несущей стене;
- слоя утеплителя и вентилируемой воздушной прослойки (утеплитель должен быть огнестойким, паропроницаемым и жестким);
- внешней облицовки (виниловый, деревянный и металлический сайдинг, ПВХ-панели, блокхаус, керамогранит, фиброцементные плиты и алюминиевые композитные панели).

Благодаря такому строению фасада и наличию воздушной прослойки и отверстий для вентиляции диффузионная влага удаляется наружу и не скапливается в утеплителе. Таким образом, утеплитель сохраняет свои теплоизоляционные свойства.

В качестве утеплителя в данных фасадных системах широко применяется каменная вата плотностью 45–90 кг/м<sup>3</sup>.

Такая система фасада сложнее и дороже системы штукатурного фасада, однако она позволяет выполнять самое разнообразное архитектурно-художественное оформление фасада.

Широко распространенным вариантом навесного вентилируемого фасада является деревянный каркас, на котором закреплен виниловый сайдинг (рис. 35).

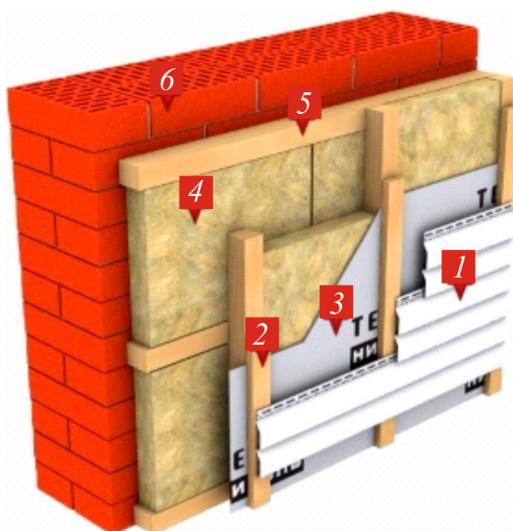


Рис. 35. Пример конструкции навесного вентилируемого фасада:

- 1 – виниловый сайдинг; 2 – контррейка толщиной 3–5 см;
- 3 – диффузионная мембрана; 4 – утеплитель (каменная вата);
- 5 – деревянный каркас; 6 – несущая стена

Деревянный каркас необходим для надежной фиксации плит минеральной ваты снаружи несущей стены. Для защиты минеральной ваты от атмосферной влаги плиты покрываются ветрозащитной пленкой. Пленка крепится контррейками, на которых затем монтируется виниловый сайдинг. Для вентиляции и удаления лишней диффузной влаги в нижних краях панелей сайдинга находятся специальные отверстия.

Пример устройства **невентилируемого фасада** приведен на рис. 36

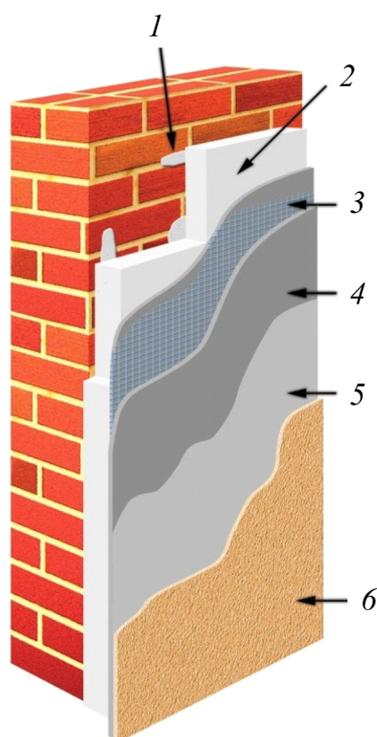


Рис. 36. Конструкция невентилируемого фасада:  
1 – клей; 2 – пенополистирол; 3 – армирующая сетка;  
4 – армированный стекловолокном клеевой слой;  
5 – грунтовка под штукатурку; 6 – штукатурка

Как уже говорилось ранее, утепление таких фасадов целесообразно выполнять снаружи несущей стены, что позволит надежно утеплить стену, предотвратить образование «мостиков холода», сократить толщину ограждающей конструкции, снизить нагрузку на несущие конструкции и фундамент.

Применение **слоистой кладки** (рис. 37), состоящей из несущей стены, утеплителя и облицовочного материала (утеплитель размещается в центральной части ограждающей конструкции), имеет ряд преимуществ:

- респектабельный вид фасада в случае использования дорогостоящих облицовочных материалов;
- долговечность, но при условии квалифицированного проектирования и монтажа конструкции.

Недостатки слоистой кладки:

- большая трудоемкость возведения;
- малая воздухопроницаемость и возможность конденсации влаги между слоями такой ограждающей конструкции.

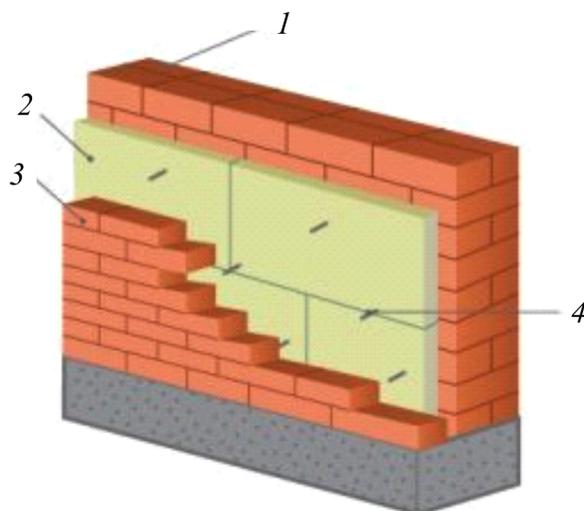


Рис. 37. Конструкция слоистой кладки:

- 1 – внутренняя часть стены; 2 – слой утеплителя (каменная вата);  
3 – наружная часть кирпичной стены; 4 – связи

Слоистая кладка может выполняться с устройством воздушного зазора для удаления влаги из несущей стены и без воздушного зазора. Утепление такой конструкции минеральной ватой (например, полужестким минераловатным плитным утеплителем) является наиболее оптимальным вариантом, в этом случае необходимо утроить зазор между слоем утеплителя и наружной стеной (рис. 38).

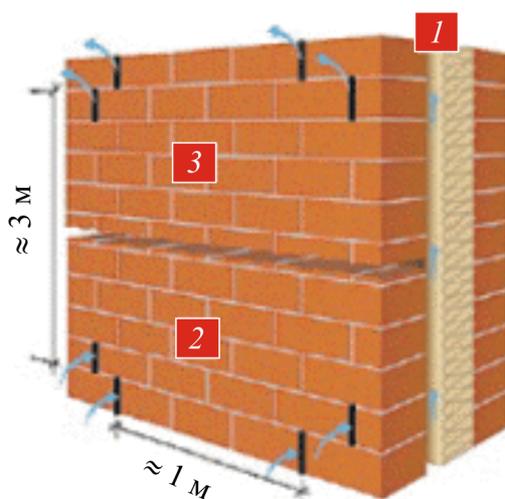


Рис. 38. Схема устройства слоистой кладки с зазором:

- 1 – воздушный зазор между слоем утеплителя и наружной стеной; 2 – нижняя часть здания; 3 – верхняя часть здания

В случае устройства ограждающей конструкции из слоистой кладки с воздушным зазором для вентиляции и удаления парообразной влаги устраиваются отверстия (продухи) в нижней и верхней частях стены. Верхние вентиляционные продухи располагаются у карнизов, нижние – у цоколя. Для осуществления вентиляции в нижней части стены устанавливаются щелевые кирпичи, положенные на ребро на некотором расстоянии друг от друга, а образовавшийся зазор не заполняется кладочным раствором.

Внутренняя и наружная части трехслойной кирпичной стены связываются между собой связями (специальными закладными деталями). Связи, как правило, выполняются из стеклопластика, базальтопластика или стальной арматуры диаметром 4,5–6 мм. Использование стальных связей менее предпочтительно, поскольку сталь обладает большей теплопроводностью.

Одновременно эти связи выполняют функцию крепежа плит утеплителя (утеплитель накладывают на них). Их устанавливают в процессе кладки в несущую стену. Для обеспечения вентилируемого зазора по всей площади утеплителя на стержни крепятся фиксирующие шайбы.

Плиты утеплителя устанавливают с перевязкой швов вплотную друг к другу, чтобы между отдельными плитами не было щелей. На углах здания устраивают зубчатое зацепление плит, чтобы предотвратить возможность образования мостиков холода.

В случае, когда утепление стен выполняется **изнутри**, необходимо выровнять поверхность стены штукатурными составами. Далее к стене на клей крепится утеплитель (аналогично наружной теплоизоляции). Устройство утепления со стороны помещения, как правило, производится путем приклеивания экструдированного пенополистирола к поверхности стены посредством составов, не содержащих растворителей, либо закреплением плит утеплителя механическим способом с последующим устройством отделочного слоя (рис. 39).

При данном виде утепления наиболее важна зона на границе стены и утеплителя, где температура немного выше наружной температуры и значительно ниже точки росы. На стыке утеплителя и холодной стены происходит конденсация влаги, что приводит к прогрессирующему отсыреванию стен и развитию плесени, а значит, к ухудшению санитарно-гигиенических показателей помещения.

Чтобы снизить вероятность выпадения конденсата и развития плесени, утепление изнутри рекомендуется выполнять теплоизоляционными материалами с низкой паропроницаемостью (например, экструдиро-

ванный пенополистирол, пеностекло), не допускающими проникновение водяного пара в зону конденсации на стыке утеплителя и холодной стены. Со стороны помещения также необходимо устраивать пароизоляционный слой из пленки или полимерной штукатурки, плитки или выполнять окраску паронепроницаемыми красками. Важно проклеить нахлесты пленок между собой и место примыкания пленки к ограждающим конструкциям.

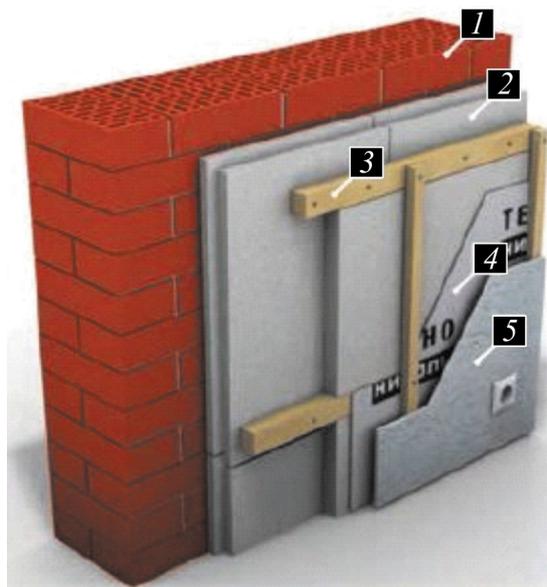


Рис. 39. Схема утепления стены изнутри: 1 – несущая стена; 2 – утеплитель; 3 – прижимные рейки из дерева; 4 – пароизоляционная пленка; 5 – внутренняя отделка помещения

В ванной комнате поверхность плит оштукатуривается по сетке цементно-песчаными составами. На подготовленную поверхность наклеивается керамическая плитка.

**Система утепления фасадов Capatect** – это многослойная система теплоизоляции фасада, которую можно отнести к разновидности «легкого» метода утепления наружных стен зданий. В качестве теплоизоляционного слоя в системе утепления фасадов Capatect используются плиты из минеральной ваты или плиты из пенополистирола. Фасадным слоем системы утепления такого фасада является тонкослойная фактурная штукатурка, которая дает широкий выбор для оформления внешнего облика фасада после утепления.

Преимущества системы утепления фасада Capatect:

- надежная теплозащита здания и стабильная температура внутренней поверхности стены;
- эффективная звукоизоляция;

- уменьшение толщины наружных стен строящегося здания;
- создание сплошного покрытия, что дает возможность качественно нового оформления фасадов зданий (особенно панельных).

**Строительная система «Термокаркас».** Строительство каркасных домов с использованием термокаркасных строительных панелей является одной из перспективных технологий малоэтажного строительства. Термокаркасная строительная панель представляет собой конструкцию из металлодеревянного каркаса с пенополистирольным заполнением, торцы которой обрамлены тонколистовым оцинкованным профилем (швеллером или уголком). Термокаркасная панель выполняет несущую, ограждающую и теплозащитную функции. Открытый каркас панелей позволяет применять любые облицовочные материалы для внутренней и внешней отделки здания.

Термокаркасные панели монтируются открытым каркасом без облицовки в отличие от сэндвич-панелей, что позволяет выполнять работы по инженерному благоустройству и чистовой отделке непосредственно под крышей готового здания. Достоинства термокаркасных панелей: доступная стоимость, простота устройства, теплоизолирующие свойства, экологичность, использование средств малой механизации.

**Технология клееных деревянных конструкций (HAUS-KONZEPT)** применяется при строительстве панельно-каркасных домов и строительстве панельно-каркасных деревянных домов из элементов полной заводской готовности с использованием большепролетных клееных деревянных конструкций завода. Изготовление панелей в заводских условиях гарантирует высокое качество деревянного дома. Такая многослойная панель выполняется на основе деревянного рамного каркаса из клееного бруса, обшитого с наружной и внутренней сторон плитами. Внутреннее пространство панели заполняет базальтовый утеплитель, который обеспечивает необходимую теплозащиту, а пароизоляционная мембрана защищает конструкцию дома и утеплитель от влаги [1]. Современные экологически чистые материалы и сухая клееная древесина позволяют панельно-каркасным домам соперничать с каменными по таким важным параметрам, как качество, скорость строительства, экономичность в эксплуатации и комфортность проживания.

**Технология строительства с использованием SIP-панелей (Structural Insulated Panel)** широко применяется в странах Северной Америки и Европы и относится к панельно-каркасному строительству. Конструкционные теплоизоляционные SIP-панели применяют для возведения стен, перекрытий, стропильной системы.

SIP-панели производят в заводских условиях методом прессования и раскраивают в соответствии с проектом на детали будущего дома. На строительной площадке происходит только монтаж готовых панелей. SIP-панели соединяются при помощи деревянного бруса и доски узлом «шип-паз», что позволяет формировать жесткий деревянный каркас. Такое соединение двух систем – деревянного каркаса и SIP-панели – приводит к тому, что дома из SIP в несколько раз прочнее обычных каркасных [1].

SIP-панель представляет собой монолитную трехслойную конструкцию, состоящую из двух деревянных плит OSB-3, между которыми под давлением вклеен слой пенополистирола. Зачастую SIP-панели соединяют между собой с помощью шпонок из OSB-3 или с помощью «сплайнов» (термовставок).

Достоинства данной технологии: хорошая теплоизоляция, малый вес панелей, отсутствие усадки, прочность, экологичность, невысокая стоимость, высокая скорость строительства и простота сборки, заводское изготовление панелей.

**Несъемная опалубка Velox** (Австрия) изготавливается из щепоцементных плит, произведенных методом прессования из минерализованной древесной щепы (95 %) и цемента, с добавлением сульфата алюминия (катализатор) и жидкого стекла (антисептик, связующее). Достоинства такой опалубки: экологичность, хорошая теплоизоляция и звукоизоляция, огнестойкость, долговечность, паропроницаемость.

Строительная система Velox, применяемая для монолитного строительства в несъемной опалубке из щепоцементных плит, запатентована в 1956 г. в Австрии и в настоящее время получила широкое распространение в мире. Полностью соответствует требованиям современных стандартов по энергоэффективности и экологической устойчивости.

Достоинства данной технологии: снижение себестоимости строительства до 50 %; сокращение сроков возведения объектов до 2,5 раз; экономия тепла при эксплуатации до 40 %; срок службы домов более 100 лет [1].

Несущие конструкции системы **несъемной опалубки «Фортмастер»** (Италия) представляют собой сплошную монолитную железобетонную пространственную структуру, состоящую из перекрестных продольных и поперечных стен, ребристых монолитных перекрытий и обвязочных горизонтальных рам, соединяющих стены и перекрытия [1]. Все несущие и самонесущие элементы железобетонной пространственной структуры возводят в несъемной опалубке из вспененного жесткого пе-

нополистирола. Элементы несъемной опалубки, выполненные из твердого самозатухающего пенополистирола в форме пустотелых блоков, армированные и заполненные бетоном, представляют собой универсальную систему для возведения стен зданий любого типа высотой до 75 м. Смонтированная полая стена заливается бетоном, что позволяет в ходе одной технологической операции сооружать монолитную бетонную стену, обрамленную с внутренней и наружной сторон пенополистиролом.

После установки опалубочных элементов стен и перекрытий в проектное положение и установки технологической оснастки проводятся работы по их армированию и последующему бетонированию. Для обеспечения прочности и жесткости здания перпендикулярно направлению основных несущих ребер перекрытия (в поперечном направлении) в системе несъемной опалубки предусмотрено устройство промежуточных (поперечных) балок жесткости, образующих сетку из продольных и поперечных ребер [1].

После завершения работ по бетонированию стен, перекрытий и покрытий образуется структура из перекрестных железобетонных конструкций, которая в сочетании с лестничными клетками, лифтовыми шахтами и другими элементами жесткости обеспечивает пространственную жесткость всей системы несъемной опалубки.

Для защиты наружной поверхности опалубки наружных стен используют два способа. Первый способ предусматривает применение цементно-песчаного штукатурного слоя толщиной не менее 25 мм по одному ряду стальной оцинкованной сетки и 40 мм по откосам оконных проемов по двум рядам оцинкованных сеток. Второй способ отделки основан на технологиях, применяемых в фасадных системах теплоизоляции с использованием плитного пенополистирола. Этот способ отделки предусматривает нанесение многослойных декоративных и защитных штукатурных слоев толщиной 6–9 мм на предварительно наклеенную на пенополистирол щелочестойкую сетку. Эта технология предусматривает устройство наружного и внутреннего обрамления из негорючих минераловатных плит шириной не менее 150 мм и толщиной, равной толщине пенополистирола, по всему периметру оконных и дверных проемов, а также сплошных противопожарных рассечек по всему периметру фасадов здания в уровне верхних горизонтальных откосов оконных проемов [1].

Технология имеет ряд принципиальных отличий от традиционно применяемых в строительстве технологий:

- высокие прочностные, теплоизоляционные и звукоизоляционные характеристики;

- минимальные сроки монтажа, круглогодичный цикл строительства, кроме того, технология не требует применения тяжелой строительной техники;
- простота монтажа системы несъемной опалубки, которая предотвращает возможность ошибок и брака в процессе возведения домов;
- экономичность зданий в эксплуатации и минимизация себестоимости строительства;
- пенополистирольная опалубка обеспечивает подходящий для застывания температурный и влажностный режим;
- благодаря легкости конструкции длина потолочного перекрытия составляет до 9 м, что позволяет свести к минимуму количество внутренних несущих стен и делает возможной практически любую планировку;
- низкая плотность пенополистирола предотвращает усадку блоков на стадии монтажа и в процессе эксплуатации;
- долговечность и стойкость к биологическому и химическому разрушению.

**Технология PLASTBAU** (Германия) позволяет обеспечивать разнообразные объемно-планировочные и конструктивные решения зданий различной этажности. Наличие внутреннего арматурного каркаса в опалубке несущих стен и перегородок позволяет снизить объем арматурных работ на строительной площадке [1]. Достоинства:

- технология монтажа достаточно простая, не требует применения специальных инструментов и подъемно-транспортных механизмов;
- снижение трудовых затрат и расхода основных строительных материалов (бетона – на 35–40 % и арматуры – на 25–30 %), сокращение сроков строительства в 1,5–2 раза;
- экономия на размерах фундамента за счет малого веса возводимых конструкций;
- возможность выполнения бетонирования при отрицательных температурах. Данная конструкция опалубки позволяет создавать высокоэффективные железобетонные ребристые перекрытия пролетом до 9 м без дополнительных опор;
- срок эксплуатации зданий, возведенных по технологии PLASTBAU, более 100 лет.

**Технология ABS-бетонирования в несъемной опалубке** из мелкоштучных теплоизолирующих элементов является образцом новых энергосберегающих технологий возведения стен. Данная технология позволяет возводить монолитные бетонные стены одновременно с двойной тепло- и звукоизоляцией из блоков-модулей, собранных из пенополисти-

рольных плит. Специальная конструкция замков позволяет соединять блоки и препятствует вытеканию бетона (рис. 40).



Рис. 40. Пример бетонирования в несъемной опалубке

Технология широко применяется в Канаде, на севере США и в Европе. Высокие теплоизоляционные свойства блоков позволяют выполнять работы по бетонированию при отрицательных температурах.

**Технология «ИЗОДОМ»** разработана для быстрого возведения стен из монолитного железобетона с помощью несъемной опалубки из специального твердого самозатухающего пенополистирола.

Блоки «ИЗОДОМ» состоят из двух пластин специального строительного пенополистирола, соединенных перемычками из пенополистирола или поливинилхлорида. Блоки имеют малый вес, а полости в процессе строительства армируются и заполняются бетоном. Верхняя и нижняя плоскости элементов системы «ИЗОДОМ» снабжены специальными замками, конструкция которых позволяет отказаться от применения временных подпорных элементов и обеспечивает герметичность соединений, препятствуя вытеканию бетона. Опалубка имеет идеально ровную поверхность, готовую для отделки любыми материалами. Широкий ассортимент блоков позволяет подобрать модули с толщиной наружного утепления, соответствующей климатической зоне строительства.

При возведении зданий по данной технологии можно использовать любые виды перекрытий: пустотные бетонные плиты, монолитную плиту перекрытия, классические конструкции деревянных перекрытий. Для наружной отделки стен подходят любые системы фасадных конструкций: системы мокрого типа, сайдинг, облицовочный кирпич [1].

**Технология строительства «Теплый дом»** является разновидностью каркасно-монолитной технологии, при которой опалубка остается

на стене здания в качестве утеплителя. Основной элемент данной строительной технологии – стеновой блок несъемной опалубки из специального плотного самозатухающего пенополистирола, который представляет собой две пластины, соединенные перемычками. Перемычки могут быть металлические или пенополистирольные. В зависимости от модели блока расстояние между пластинами может варьироваться: стандартное расстояние – 150 мм, для фундаментных блоков – 200 мм, для межкомнатных перегородок – 70 мм. Блоки соединяются друг с другом системой пазогребень, такая замковая система не позволяет бетону вытекать в местах соединения.

**Технология армосистемы «СОТА» (США)** является новой строительной системой, основу которой составляет несъемная опалубка из армированных универсальных стеновых панелей с применением модифицированного бетона. Современный подход к строительству предполагает использование трехслойных панелей, в которых между наружным и внутренним слоями бетона находится теплоизоляционный материал (например, пенополистирол, ROCKWOOL, PAROC и др.). Здание, построенное из таких трехслойных панелей по технологии торкретирования, не имеет открытых швов и «мостиков холода». Одной из главных инноваций данной технологии является использование легкого модифицированного водонепроницаемого судостроительного бетона, что позволяет применить тонкостенные конструкции с одновременной защитой их несущей способности. Модифицированный судостроительный бетон готовится прямо на строительной площадке непосредственно перед нанесением на стены, что позволяет экономить 20–25 % на 1 м<sup>3</sup>.

Область применения: несъемная опалубка «СОТА» предназначена для устройства фундаментов, стен и перекрытий для зданий и сооружений различного назначения. Трехслойные панели несъемной опалубки «СОТА» также могут быть использованы при реконструкции и утеплении фасадов зданий, при устройстве бассейнов, бань, саун и других объектов с повышенной влажностью. Небольшой вес армированных панелей «СОТА» позволяет выполнять надстройку этажей над существующими зданиями без работ по усилению фундаментов и стен, что позволяет значительно сократить расход средств.

Применение армированных панелей позволяет снизить расход основных строительных материалов (бетона, арматуры, изоляционных материалов). Строительство по данной технологии в два раза дешевле, чем по технологии строительства в блок-оболочках по принципу несъемной опалубки.

Еще один способ возведения монолитных зданий заключается в установке блоков **несъемной опалубки, выполненных из облицовочных плит** и последующем заполнении полостей композиционной смесью. Такие блоки несъемной опалубки выполняют из облицовочных плит, которые имеют канавку по наружной поверхности периметра. Дверные и оконные блоки устанавливаются одновременно с облицовочными плитами, а их крепление осуществляют путем соединения облицовочных плит штампованными элементами. Композиционную смесь получают путем вспенивания раствора цемента, при этом высота разовой заливки смеси не превышает 300 мм.

Устройство **несъемной опалубки из древесно-минеральных материалов** включает в себя установку на технологическом горизонте одновременно внешних и внутренних отдельных щитов опалубки из древесно-минеральных материалов и последующую их фиксацию гибкими связями в виде монтажных хомутов, которые закрепляют верхние грани отдельных внешних и внутренних щитов в проектом положении. Первый ряд из отдельных внешних и внутренних щитов устанавливают на захватку, секцию или этаж по всему периметру ограждающих стен и перегородок. Далее по гибким связям первого ряда внешних и внутренних щитов устанавливают второй ряд внешних и внутренних опалубочных панелей. После укладки бетонной смеси в несъемную опалубку смесь равномерно распирает щиты каждого ряда до упора по гибким связям и фиксирует плоскости панелей в проектом положении.

**Система «ТеРем»** – это относительно новая энергосберегающая технология возведения здания [1]. Ее достоинства: легкость и простота монтажа конструкций; низкая трудоемкость строительно-монтажных работ; отсутствие необходимости использования тяжелой строительной техники; хорошая теплоизоляция и звукоизоляция здания, огнестойкость. Опалубочные элементы могут быть выполнены из плит пеностекла и объединены между собой с помощью связевых элементов (фиксаторов) из полипропилена, объединяющих элементы конструкции стены и фиксирующих слои опалубки между собой.

Защита наружной поверхности элементов несъемной опалубки (плит опалубки наружных стен) может осуществляться путем устройства цементно-песчаной штукатурки по стальной сетке толщиной не менее 25 мм (по поверхности) и 40 мм (по откосам оконных проемов и на фасадах здания).

Элементы несъемной опалубки «ТеРем» конструктивно предусматривают шесть стяжек на один опалубочный модуль стены, т.е. для восприятия нагрузки от бокового давления бетонной смеси на элементы

несъемной опалубки и предотвращения их изгиба в продольном направлении требуются дополнительные крепления в виде стоек и распределительных прогонов, монтируемых по боковым поверхностям стен [1].

**Система монолитного строительства на основе несъемной опалубки из мелкоштучных блоков (технология «Симпролит»)** – это технология строительства, основанная на использовании блоков «Симпролит» – разновидности легкого бетона, состоящей из гранул пенополистирола, цемента, специальных добавок и воды. При кладке блоками «Симпролит» арматура для вертикальных обвязок устраивается непосредственно в пустоты блоков. Опалубка горизонтальных обвязок формируется путем резки блоков и раскладки полученных частей по уже построенной стене, а у оконных и дверных перемычек по подпорной доске. Бетон, отлитый в блоках из «Симпролит», термически защищен и не требует дополнительного утепления.

Достоинства данной технологии:

- небольшая толщина ограждающей конструкции;
- меньшие затраты материалов;
- хорошие теплотехнические свойства;
- высокая скорость выполнения работ.

**Опалубка для несущих стен системы Dobeles panelis** состоит из двух пенополистирольных плит, которые на определенном расстоянии друг от друга удерживают специальные стальные арматурные каркасы [1]. После бетонирования стальная конструкция выполняет функцию арматурного каркаса, а пенополистирол – функцию теплоизоляции.

Система включает в себя три вида конструктивных элементов:

- 1) несъемная опалубка для наружных и внутренних несущих стен;
- 2) несъемная опалубка для межэтажных перекрытий и крыши;
- 3) панели перегородки пенополистирольные.

Достоинства системы: малый вес, небольшие трудозатраты, возможность применения при реконструкции и устройстве мансард, возможность выполнять работы по бетонированию без подогрева бетона даже при отрицательной температуре, высокая скорость строительства.

**Строительная технология Durisol** основана на производстве и применении стеновых блоков несъемной опалубки стандартной формы: длиной 50 см, высотой 25 см и толщиной 15, 22, 25, 30 и 37,5 см в зависимости от функционального назначения [1]. Функциональный спектр конфигураций блоков (рядные, угловые, торцевые, универсальные) для устройства перегородок, наружных и внутренних стен с различной несущей способностью дает возможность создавать разнообразные архитектурные формы и планировки зданий и сооружений.

Процесс монтажа стен из строительных блоков Durisol заключается в следующем: блоки устанавливаются друг на друга без какого-либо связующего в четыре ряда, после чего полости в блоках заполняют бетоном. Затем устанавливают следующие четыре ряда. В результате внутри деревянной стены получается монолитная бетонная решетка с мощными вертикальными несущими столбами и горизонтальными рядными перемычками.

Бетонная смесь для заливки внутренних полостей в кладке из блоков Durisol выполняет функцию статически прочного каркаса стены, несущего нагрузку здания. Конструкция блоков с пенополистирольными вставками для наружных стен препятствует возникновению мостиков холода и гарантирует теплоизоляцию. Стена из блоков Durisol имеет небольшую толщину, что увеличивает полезную площадь помещений.

### **Утепление перекрытия (покрытия) кровли**

Утепление кровли обеспечивает снижение теплопотерь в отопительный период и снижение перегрева подкровельных помещений в теплый период года. Теплоизоляция скатных крыш позволяет создать утепленную мансарду и увеличить площадь частного дома до 40 %.

В современной практике, как правило, используются три схемы утепления:

- 1) слой утеплителя укладывается между стропилами;
- 2) слой утеплителя укладывается между стропилами и в каркасе под стропилами;
- 3) слой утеплителя укладывается между стропилами и в каркасе над стропилами.

Первый способ применяется в случае, если толщина слоя утеплителя, полученная в результате теплотехнического расчета, не превышает толщину стропил.

Второй способ утепления кровли применяется, когда высока вероятность неблагоприятных погодных условий и приоритетной является максимально быстрая установка кровельного покрытия для защиты дома от осадков.

Третий способ используется, если толщины стропил недостаточно для установки утеплителя требуемой толщины и необходимо максимально увеличить полезный объем мансарды.

Для утепления скатных крыш применяются негорючие плитные или рулонные материалы из каменной и стеклянной ваты. Большое внимание следует уделить тому, чтобы утеплитель не давал усадку и не про-

седал под собственным весом. Этот эффект зачастую возникает при использовании стекловолоконной ваты небольшой плотности.

Применение в качестве утеплителя кровли пенополистирола и экструдированного пенополистирола требует проведения противопожарных мероприятий, включающих антипиреновую пропитку деревянных конструкций и устройство огнезащитных слоев.

Для защиты утеплителя и несущих конструкций крыши от проникновения атмосферной влаги и безопасного удаления излишней влаги из под кровельного пространства наружу необходимо предусмотреть гидроизоляцию крыши. Кроме того, теплый воздух перемещается из нижних частей здания в мансарду и переносит с собой большое количество влаги, которая, попав в утеплитель, может снизить его теплозащитные свойства. Для защиты утеплителя и стропильной конструкции от воздействия влаги, поступающей из помещения, применяются пароизоляционные пленки, а также устраиваются вентиляционные зазоры. Для сложных конструкций крыш, а также при наличии различных архитектурных элементов (аттиков, парапетов, мансардных окон и др.) следует предусматривать организацию дополнительных вентиляционных отверстий под свесом кровли (по всему периметру) и в коньке крыши.

Традиционная плоская крыша («мягкая» кровля) защищена от воздействия атмосферных осадков гидроизоляционным ковром на основе битумосодержащих рулонных материалов (рис. 41).

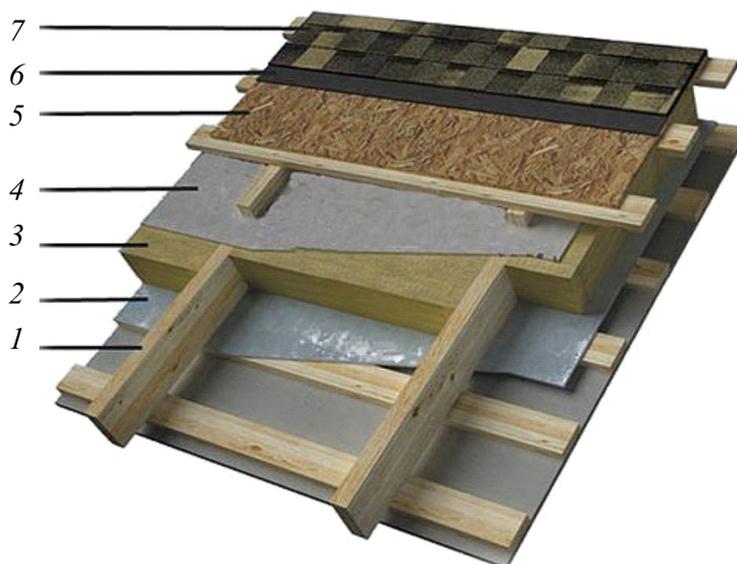


Рис. 41. Схема конструкции «мягкой» кровли:  
1 – стропило; 2 – пароизоляционная пленка; 3 – утеплитель;  
4 – гидроизоляционная пленка; 5 – плита OSB;  
6 – подкладочный ковер; 7 – гибкая черепица

**Инверсионная кровля** перевернута по сравнению с традиционной кровлей. Гидроизоляционный слой располагается под слоем утеплителя непосредственно на поверхности железобетонного покрытия (основание кровли), выполняя одновременно роль пароизоляции (рис. 42).

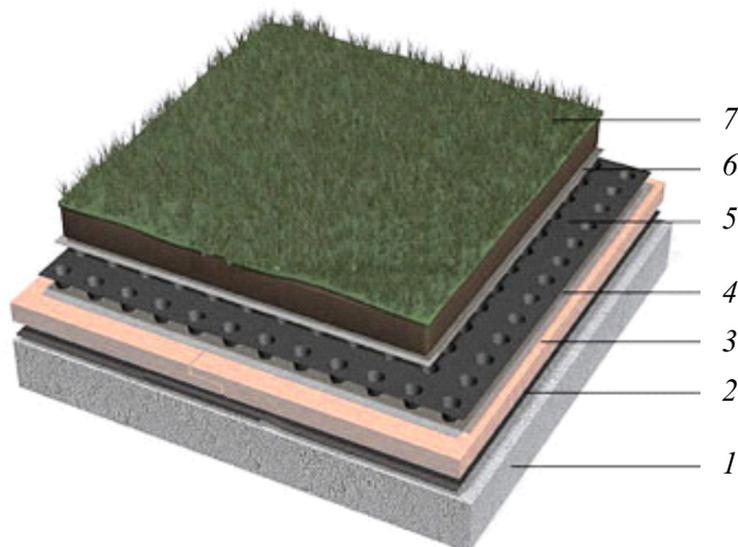


Рис. 42. Схема конструкции инверсионной кровли:

- 1 – бетонное основание; 2 – битумно-полимерная кровельная мембрана;
- 3 – теплоизоляция; 4 – разделительный слой (геотекстиль); 5 – дренажная профилированная мембрана; 6 – фильтрующий слой (геотекстиль);
- 7 – плодородный слой с растениями

Такая конструкция кровли позволяет предохранить гидроизоляционный слой от воздействия ультрафиолетовых лучей, резких перепадов температуры, циклов замораживания-оттаивания, механических повреждений, а значит, обеспечивает увеличение срока службы инверсионной кровли по сравнению с традиционной «мягкой» кровлей.

Схема конструкции инверсионной кровли следующая:

- гидроизоляционный слой (прямо на основании);
- теплоизоляционные плиты (например, материалы из экструдированного полистирола);
- геотекстильное покрытие;
- дренирующий слой;
- защитный верхний слой является необходимым условием для противопожарной безопасности – пригрузка из гравия или гальки (см. рис. 42).

Преимущества инверсионной кровли:

- возможность быстрого устройства при любой погоде;
- гидроизоляция в составе данной конструкции выполняет функции пароизоляции, что снижает риск внутренней конденсации влаги и уменьшает сметную стоимость конструкции;

– слой теплоизоляции и защитный слой гравия защищают гидроизоляционную мембрану от любых механических воздействий при последующей эксплуатации;

– при демонтаже кровельного перекрытия плиты теплоизоляционного материала могут использоваться повторно;

– места нарушения гидроизоляции легко обнаружить и восстановить.

Недостатки инверсионной кровли: толщина слоя пенополистирола должна быть на 5–20 % больше, чем в традиционной кровле.

Все достоинства технологии строительства инверсионной эксплуатируемой кровли полностью реализуются при устройстве на ней **зеленой крыши** (рис. 43)



Рис. 43. Пример устройства зеленой крыши

Гидроизоляционный слой эксплуатируемой зеленой крыши из рулонных наплавляемых материалов на кровлях должен быть защищен от воздействия корней растений путем использования специального противокорневого материала. Уклоны покрытия зеленой крыши и отверстия для стока воды необходимо устраивать таким образом, чтобы полностью исключить скопление воды в дренажном слое эксплуатируемой кровли.

Самый простой дренажный слой выполняется из гравия, однако для растений лучше применять материалы, которые способны аккумулировать в себе влагу, а затем постепенно отдавать ее растениям.

В случае эксплуатируемой инверсионной кровли должно быть предусмотрено защитное покрытие из тротуарных плит.

### **Утепление чердачного перекрытия**

Чердачное перекрытие – один из тех элементов ограждающих конструкций здания, мероприятия по теплоизоляции которых являются про-

стыми и эффективными. Теплоизоляцию межэтажных перекрытий верхних этажей и чердачных перекрытий можно выполнить путем укладки теплоизолирующих матов или теплоизолирующих плит толщиной до 40 см. Утеплитель должен повсюду герметично прилегать к полу [1].

Чердачные перекрытия могут быть выполнены по железобетонному сборному или монолитному основанию или деревянным балкам. Укладку утеплителя по железобетонному основанию чердачного перекрытия выполняют между деревянными лагами каркаса.

В качестве утеплителя чердачного перекрытия неотапливаемой крыши обычно применяются теплоизоляционные материалы, которые не подвергаются значительным механическим нагрузкам на сжатие. В качестве утеплителя для чердачного перекрытия хорошо подходят минеральная вата (на основе каменного волокна или стекловолокна) и пенополистирол плотностью 10–15 кг/м<sup>3</sup>.

Чтобы не допустить в теплоизоляционном слое перекрытия конденсации влаги, поступающей с теплым воздухом из помещения, под утеплитель укладывают пароизоляционную пленку.

В балочных перекрытиях пароизоляция выполняет также функцию изоляции против инфильтрации нежелательного воздуха через щели, трещины и швы. Однако для этого необходимо основательно склеить перекрывающие друг друга пароизоляционные пленки.

При утеплении балочных перекрытий в существующих зданиях часто невозможно установить пароизоляцию под балками перекрытия. В данном случае пароизоляцию следует располагать сразу под выполненным впоследствии теплоизоляционным слоем. В связи с физическими тепловыми мостами, которые образуют балки, при устройстве данного варианта пароизоляции необходимо установить дополнительный слой утеплителя над балками, чтобы не допустить образования конденсата в дереве балок или использовать специальную пароизоляционную пленку с переменной паропроницаемостью.

Утеплитель укладывают по пароизоляции между балками или лагами деревянного каркаса. Если толщина слоя утепления больше высоты сечения несущих элементов деревянного каркаса, то применяют доборные бруски, высота которых равна требуемой толщине дополнительного слоя теплоизоляции. При этом бруски прибивают к балкам или лагам каркаса в перпендикулярном направлении, что придает дополнительную жесткость и устойчивость каркасу.

Для обеспечения хорошей теплозащиты плиты утеплителя должны укладываться непрерывно для предотвращения возможности образова-

ния «мостиков холода». С этой целью утепление на чердачных перекрытиях обычно выполняется в два слоя, с перекрытием стыков плит утеплителя нижнего слоя плитами верхнего слоя.

Если между балками устанавливаются твердые теплоизоляционные материалы, например плиты пенополистирола, то крайние швы с балками следует сделать герметичными.

Зачастую кирпичная кладка фасадов или внутренних стен возвышается над чердачным перекрытием. В неотапливаемых и проветриваемых чердачных помещениях преобладают внешние температуры и такие неутепленные изнутри участки образуют «мостики холода», которые могут привести к конструктивным повреждениям. Необходимая защита от конструктивных повреждений, как правило, обеспечивается, если устанавливается слой вертикальной теплоизоляции на высоте около 50 см (рис. 44).

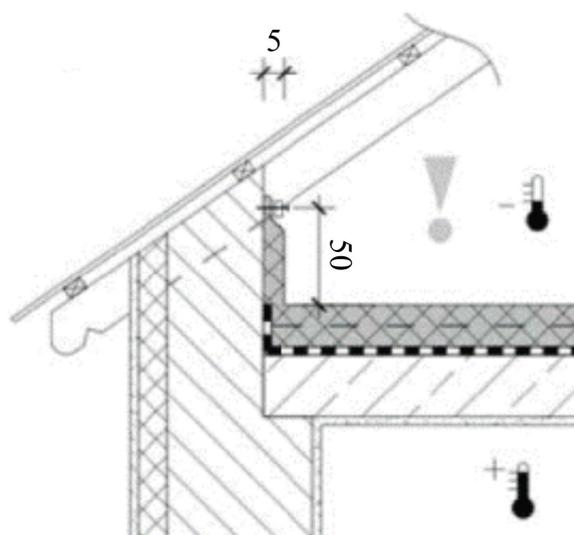


Рис. 44. Пример устройства вертикальной теплоизоляции

На неэксплуатируемых чердачных перекрытиях по утеплителю укладывается паропроницаемая ветрозащитная мембрана с ходовыми дорожками для возможных кровельных работ. Такая ветрозащитная мембрана помогает снизить риск образования «мостиков холода» по стыкам утеплителя.

На эксплуатируемых чердачных перекрытиях по балкам или лагам каркаса настилают черновой пол, который будет служить основанием под финишную отделку.

Вентиляция чердака обеспечивается через слуховые окна, отверстия на фронтонах, щелевые отверстия в нижней части карниза и на коньке, площадь которых, как правило, должна быть не менее  $1/300$ – $1/500$  пло-

щади перекрытия чердака. Вентиляционные отверстия располагаются так, чтобы проветривание осуществлялось по всему объему чердака без образования застойных зон.

### **Утепление пола и подвальных перекрытий**

В случае устройства полов по грунту утепление пола, поверхность которого находится ниже границы промерзания, производить необязательно, но в отапливаемых помещениях следует уложить утеплитель и предусмотреть гидроизоляцию. Теплоизоляция такого пола должна обеспечивать температуру пола близкую к температуре воздуха в помещении.

В полах по грунту утеплитель укладывается на слой гидроизоляции и должен обладать высокой прочностью на сжатие. Подходящими материалами в этом случае могут являться пенополистирол плотностью не менее  $25 \text{ кг/м}^3$  и экструдированный пенополистирол.

Если в здании есть отапливаемые подвальные помещения, то утеплять перекрытие над подвалом нет особой необходимости. При наличии в здании неотапливаемых подвальных помещений для обеспечения сокращения потерь тепла и обеспечения требуемых температур на поверхности пола необходимо выполнить утепление перекрытия над холодным подвалом или подпольем. Температура на поверхности пола должна соответствовать СП 50.13330.2012 [16] и быть не более чем на  $2-2,5 \text{ }^\circ\text{C}$  ниже температуры воздуха в помещении.

Для утепления перекрытия над холодным подвалом или подпольем обычно используются мягкие плиты и маты из минеральной ваты, которые плотно устанавливаются в пространстве между балками и лагами.

Через перекрытие подвала водяные пары из теплых помещений здания выходят наружу, как и через наружные стены здания. Поскольку холодный подвал расположен под перекрытием первого этажа, то направление движения водяных паров будет сверху вниз. Для защиты утеплителя от увлажнения его необходимо изолировать слоем пароизоляционного материала, который следует располагать над утеплителем (а не под ним), поскольку водяные пары диффундируют из теплых верхних помещений в более холодные нижние (подвальные). Для предотвращения увлажнения утеплителя перекрытий и появления сырости, грибка и плесени необходимо обеспечить вентиляцию подполья и подвалов. С этой целью следует устраивать специальные отверстия и продухи, через которые водяные пары будут удаляться наружу.

В этом случае для защиты слоя утеплителя от увлажнения водяными парами с теплой стороны укладывают слой пароизоляции из поли-

этиленовой пленки с нахлестом соседних полотнищ не менее 10 см. Края полотнищ пароизоляции заводят на высоту не менее 10 см над поверхностью утеплителя и прикрепляют плинтусом к стене. Далее по деревянным лагам укладывают половые доски и покрытие пола.

Для утепления железобетонного перекрытия над вентилируемым подвалом или подпольем также используются мягкие плиты или маты из минеральной ваты, уложенные по плите между лагами, а сам пол устраивается по лагам.

Утепление пола по жесткому основанию можно выполнить, используя плиты пенополистирола плотностью не менее  $25 \text{ кг/м}^3$ , экструдированного пенополистирола и жесткие плиты из минеральной ваты. Слой теплоизоляции в этом случае укладывают на предварительно выровненную поверхность перекрытия, выше утеплителя укладывается пароизоляционная пленка и выполняется монолитная или сборная стяжка.

Для обеспечения температурного расширения в месте сопряжения монолитных стяжек с другими конструкциями здания (например, стенами и перегородками) следует предусмотреть зазоры шириной до 2 см на всю толщину стяжки, заполненные эластичным материалом (например, вспененным пенополиэтиленом).

Отдельно следует остановиться на устройстве полов с подогревом («теплый пол»). Устройство пола с подогревом повышает комфортность помещения, является экономным вариантом по сравнению с затратами на основное отопление. Покрытием для такого пола чаще всего служит керамическая плитка. Такие полы зачастую устраиваются в ванной комнате, на кухне, утепленной лоджии. Схема утепленного пола приведена на рис. 45.

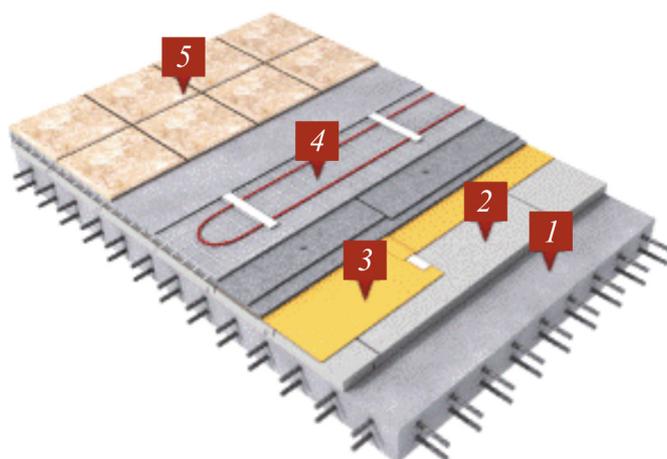


Рис. 45. Система «теплый пол»: 1 – железобетонная плита перекрытия; 2 – экструдированный пенополистирол; 3 – полиэтиленовая пленка; 4 – цементно-песчаная стяжка с нагревательными элементами; 5 – плитка, покрытие пола

Для обеспечения температурного расширения в месте сопряжения утепленного пола со стеной следует предусмотреть зазор до 2 см шириной.

Применение слоя утеплителя, например плит экструдированного пенополистирола, увеличивает эффективность системы теплого пола, препятствует выходу тепла в нижележащее пространство и даже при выключенном электронагревательном элементе обеспечивает работу теплого пола в течение 24 часов.

При устройстве теплого пола используются кабельные системы обогрева с нагревательными элементами. Такие системы имеют более низкую стоимость и обеспечивают требуемую жесткость и распределение тепла по всей поверхности пола.

При теплоизоляции ограждающих конструкций необходимо позаботиться об устранении «мостиков холода».

#### **Утепление участков с возможным образованием «мостиков холода»**

Принцип конструирования здания без «мостиков холода» можно выразить следующим образом:

$$\Delta U_{WB} \leq 0, \quad (33)$$

где  $\Delta U_{WB}$  – коэффициент теплопередачи, учитывающий тепловые потери от «мостиков холода».

Для получения точных результатов тепловых потерь необходимы расчеты с использованием двухмерных или трехмерных математических моделей. Однако для некоторых видов соединений конструкций предварительно может быть выполнено подтверждение критерию

$$\Psi \leq 0,01 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), \quad (34)$$

где  $\Psi$  – линейный коэффициент теплопередачи.

В качестве примера можно привести соединение стены из силикатных блоков и утепленной фундаментной плиты, утепленное при помощи термовкладышей (рис. 46).

На рис. 47 представлена зависимость линейных коэффициентов теплопередачи  $\Psi$  от коэффициента теплопроводности  $\lambda$  термовкладыша.

Из рис. 47 видно, что если коэффициент теплопроводности меньше, чем 0,25 Вт/(м·К), то коэффициент теплопередачи меньше 0,01 Вт/(м·К), а значит, «мостиков холода» не образуется.

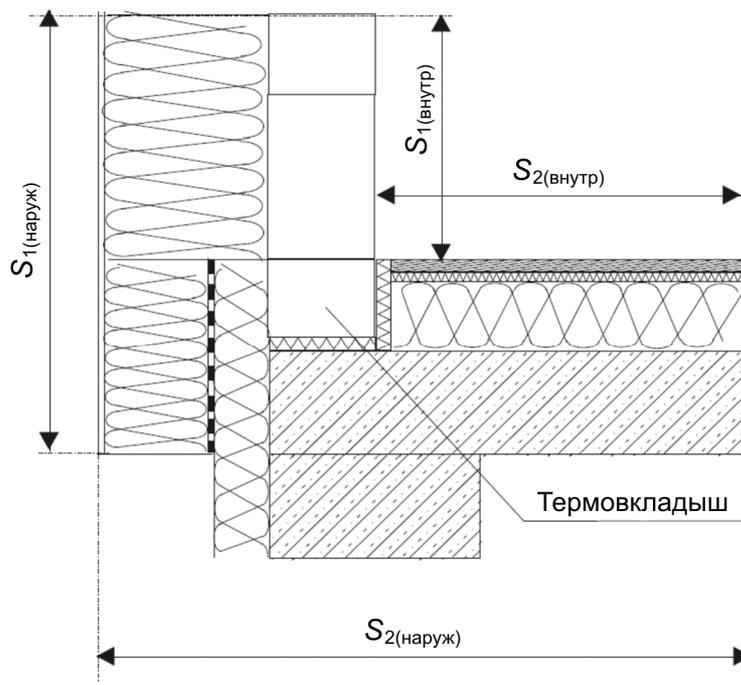


Рис. 46. Пример устройства соединения стены и фундаментной плиты [2]

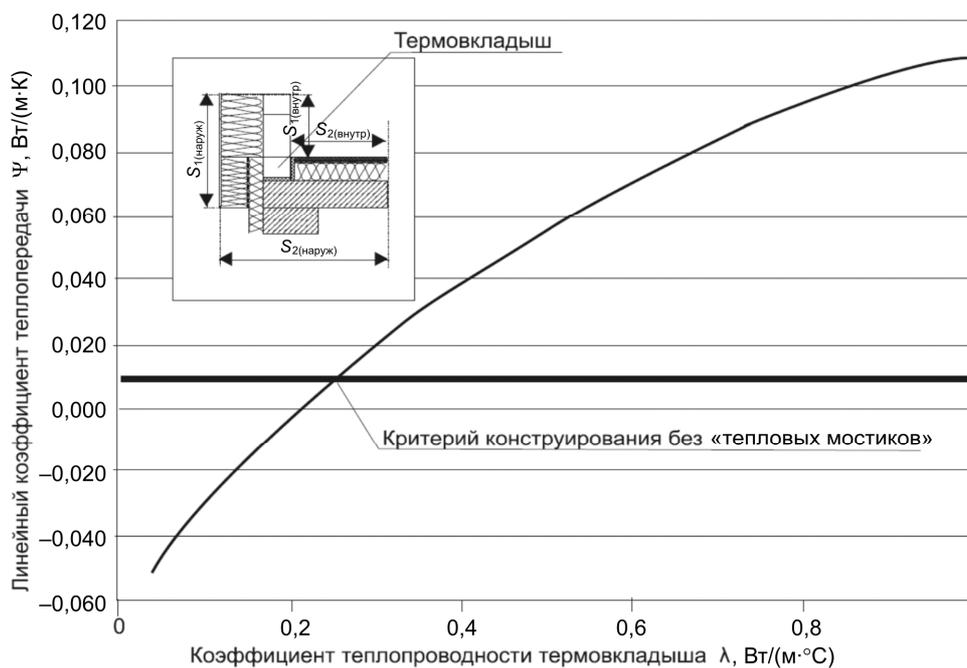


Рис. 47. График зависимости коэффициента теплопередачи от коэффициента теплопроводности [2]

В случае теплоизоляции стыка между одноблочной наружной стеной и подвальным перекрытием «мостик холода» будет образовываться при применении материалов с коэффициентом теплопроводности больше 0,12 Вт/(м·К). Устранить эту проблему позволит термовкладыш с ко-

эффицентом теплопроводности меньше  $0,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Схема такого утепления приведена на рис. 48.

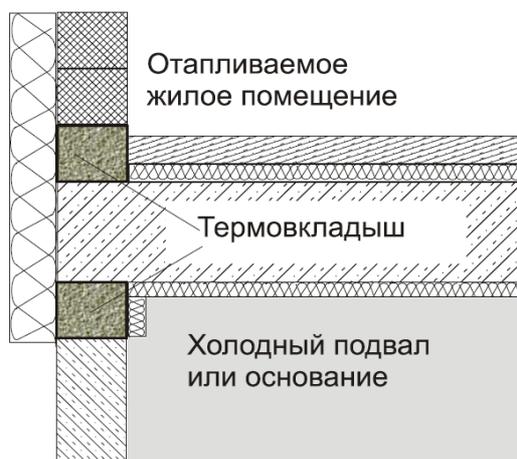


Рис. 48. Схема утепления стыка между одноблочной наружной стеной и подвальным перекрытием [2]

На рис. 49 показано устранение «мостика холода» в месте стыка перекрытия с наружной стеной здания.

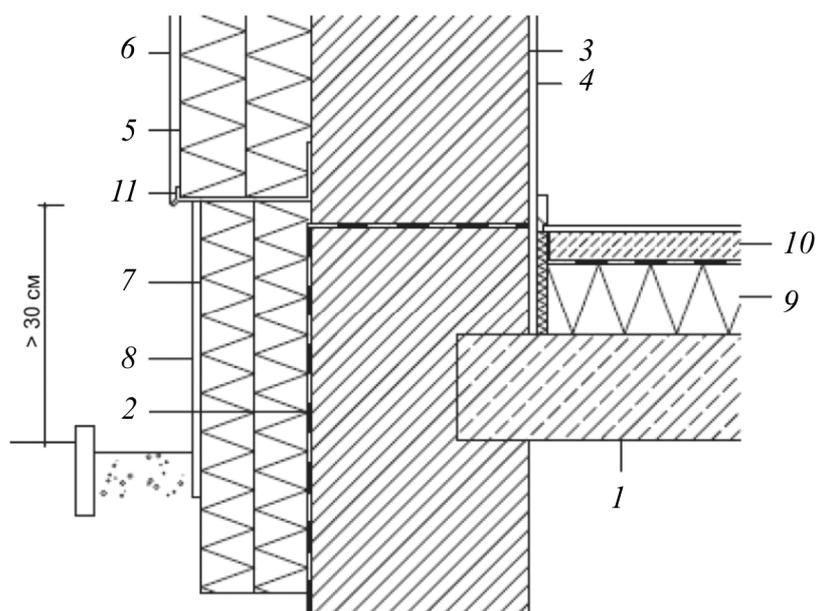


Рис. 49. Схема утепления стыка перекрытия с наружной стеной здания:  
 1 – бетонное перекрытие; 2 – гидроизолирующая перемычка; 3 – наружная стена;  
 4 – внутренняя штукатурка; 5 – теплоизолирующие плиты; 6 – наружная штукатурка поверх армирующего материала; 7 – теплоизоляция цоколя;  
 8 – штукатурка цоколя; 9 – теплоизоляция подвального перекрытия;  
 10 – плавающая стяжка с напольным покрытием; 11 – монтажный профиль [2]

На рис. 50 показано устранение «мостика холода» в месте стыка перекрытия с внутренней разделительной стеной.

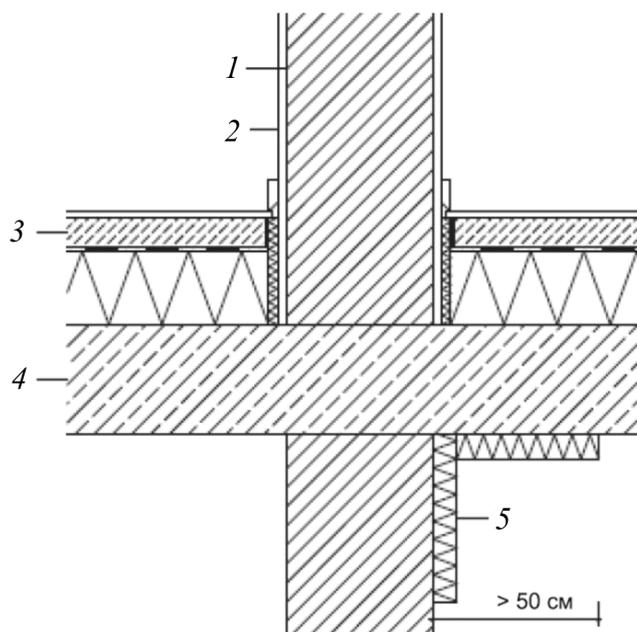


Рис. 50. Схема утепления стыка перекрытия с внутренней разделительной стеной: 1 – внутренняя стена; 2 – внутренняя штукатурка; 3 – пол с плавающей стяжкой; 4 – бетонное покрытие; 5 – дополнительная теплоизоляция стыка перекрытия с внутренней разделительной стеной [2]

Для устранения «мостика холода» между лестничными пролетами и теплоизолированными стенами также можно использовать термовкладыш, в качестве которого может выступать фундаментный камень с низкой теплопроводностью.

«Мостики холода» могут возникать также в местах стыка внешней стены с чердачным перекрытием, отделяющим отапливаемое жилое помещение от неотапливаемого чердака при условии, что теплопроводность материала наружной стены  $\lambda > 0,12$  Вт/(м·К). Устранить этот «мостик холода» позволяет устройство вертикальной внутренней теплоизоляции наружной стены неотапливаемого чердака на высоту не менее 60 см (рис. 51).

Данный метод применим также для внутренних стен (рис. 52).

Для устранения «мостиков холода», образующихся на стыках теплых и холодных стен, с холодной стороны устраивается теплоизоляция на уровень не менее 60 см на все стыки с холодной стороной.

Еще один источник образования «мостиков холода» – выступающие строительные конструкции (балконы, козырьки, ступени крыльца).

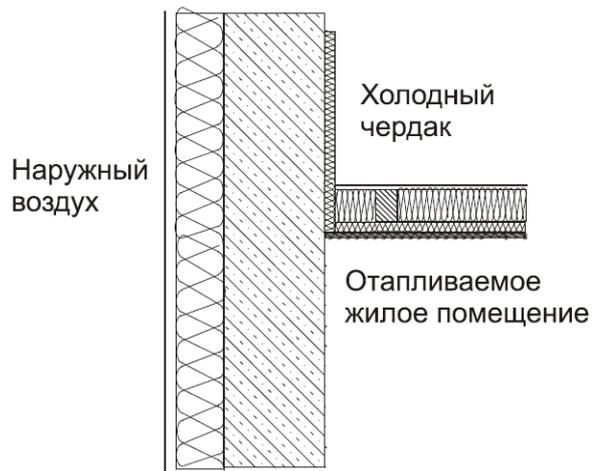


Рис. 51. Схема утепления стыка внешней стены с чердачным перекрытием [2]

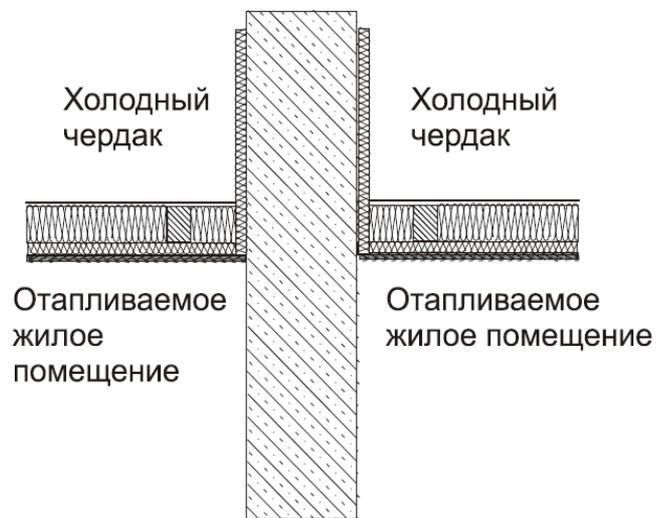


Рис. 52. Схема утепления стыка внутренней стены с чердачным перекрытием [2]

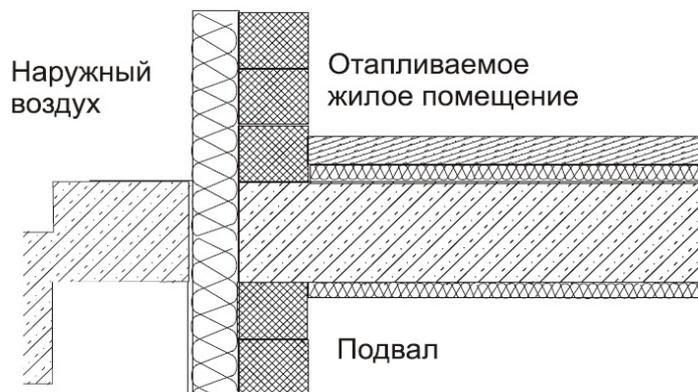


Рис. 53. Схема утепления стыка внешней стены со ступенями крыльца [2]

В этом случае оптимальным вариантом будет решение, при котором конструкция, поддерживающая балкон или другой выступающий элемент, полностью изолирована от здания. Пример такого решения представлен на рис. 53.

#### 1.5.4. Энергосберегающие окна

Основной задачей энергосбережения в зданиях и сооружениях является повышение теплозащитных качеств светопрозрачных ограждающих конструкций, и прежде всего оконных проемов. Важную роль в увеличении теплоизоляции оконного проема играет стеклопакет, поскольку именно через стеклопакет, а не через оконный профиль проникает наибольшее количество тепла. Существуют различные виды энергоэффективного стекла: *i*-стекло, *K*-стекло, энергосберегающее, теплосберегающее, теплоотражающее, теплопоглощающее и др. [4].

Особо следует отметить ***i*-стекло** (Double Low-E) – низкоэмиссионное стекло с многослойным покрытием из серебра, нанесенным путем плазменного напыления в вакууме, обладающее улучшенными показателями теплозащиты. В стеклопакете стекло с таким напылением должно быть обращено только во внутреннее пространство.

В качестве примера энергоэффективности *i*-стекла по сравнению со стеклопакетом с обычными стеклами можно привести следующие данные: при температуре наружного воздуха  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$  и внутренней температуре в помещении  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  температура на поверхности внутри помещения у стеклопакета с обычными стеклами будет составлять  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а с энергосберегающим стеклом  $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$  [4]. При этом прозрачность *i*-стекла аналогична прозрачности обычного стекла. По сравнению с обыкновенным стеклом *i*-стекло способно обеспечить экономию в течение одного отопительного сезона с каждого квадратного метра стеклопакета около 230 кВт.

Кроме этого можно отметить другие преимущества стеклопакета с энергосберегающим *i*-стеклом:

- отражает длинноволновые тепловые лучи в сторону их излучателя (т.е. зимой в сторону квартиры, где работают отопительные приборы, а летом в сторону улицы, где температура выше), что снижает расходы на отопление помещений зимой и на кондиционирование летом;

- уменьшает вероятность выпадения конденсата на стекле по сравнению с обычным стеклом;

- препятствует выгоранию обивки и предметов интерьера помещения.

На данный момент *i*-стекло является наиболее привлекательным среди стекол для энергосберегающих стеклопакетов по совокупности качества, срока службы и стоимости.

**К-стекло (Low-E)** является одним из первых видов стекла, производимых для энергосберегающих стеклопакетов. Технология производства такого стекла заключается в нанесении тонкого слоя окиси металла толщиной до 0,5 мкм на расплавленное стекло. Недостатки *K*-стекла – высокая стоимость и неравномерная толщина металлического слоя, которая вызывает появление бликов и радужные разводы на поверхности стекла. Однако покрытие *K*-стекла отличается высокой прочностью и для производителя более экономично, поскольку не требует приобретения дополнительного дорогостоящего оборудования.

**Стекло с теплоотражающими пленками.** Преимуществом такого стекла является невысокая стоимость, простота использования и возможность наклеить пленку на уже существующий стеклопакет или обычное стекло. Многослойная пленка содержит металлический теплоотражающий слой, что позволяет ей не уступать отмеченным выше разновидностям стекол по эффективности энергосбережения. Также можно отметить энергосберегающие керамические пленки, теплоотражение в которых осуществляется керамическими нанотрубками. Среди недостатков данного покрытия – его относительная недолговечность по сравнению с другими видами энергосберегающих стекол – срок службы составляет примерно 15 лет.

**Рефлекторное стекло** позволяет более эффективно предотвратить проникновение ультрафиолетовых лучей через стеклопакет. Рефлекторное стекло имеет зеркальную поверхность и действует как отражатель солнечной энергии. Такое стекло может быть полностью зеркальным или полупрозрачным. Дополнительным преимуществом зеркального стекла является защищенность от просмотра внутреннего интерьера здания извне.

**Тонирующие и светоотражающие пленки** позволяют снизить поток проникающих световых лучей. Наиболее эффективными среди них будут являться зеркальные пленки, принцип действия которых аналогичен рефлекторному стеклу. Такие пленки могут быть выполнены в различных цветовых вариантах, что позволит создать дополнительные акценты во внешнем виде здания или оригинальную цветовую подсветку внутренних помещений.

Кроме использования специальных видов стекол для повышения энергоэффективности стеклопакетов можно заполнить внутреннее про-

странство стеклопакета **аргоном**. Этот инертный газ значительно сокращает теплопередачу между слоями стеклопакета.

Кроме указанных выше способов повышения энергоэффективности здания для обеспечения герметичности окон и наружных дверей необходимо предусмотреть эффективные уплотнители.

### **1.5.5. Вентиляция помещений энергоэффективного здания**

Основным недостатком энергоэффективных и пассивных домов является проблема с качеством воздуха в герметичных непрветриваемых жилых помещениях, а также при использовании ненатуральных строительных материалов: утеплителей, отделочных материалов, пластиков, синтетических смол, которые в процессе эксплуатации могут выделять в воздух помещений вещества, неблагоприятно влияющие на человека. Затраты на вентиляцию современных зданий при составлении энергетических паспортов оцениваются примерно в 20–40 % всех затрат на отопление. Полное исключение инфильтрации воздуха через ограждающие конструкции и использование механической приточной вентиляции позволяют снизить теплопотери примерно на 1/3 от общих теплопотерь здания.

Основное охлаждение помещений в зимнее время происходит через щели и неплотности в окнах, поэтому повышение теплозащитных качеств окон связано с уменьшением воздухопроницаемости за счет применения герметизирующих прокладок. Это снижает теплопотери, но в то же время сокращает количество свежего воздуха, поступающего в помещение. В связи с этим необходим переход от неорганизованного притока наружного воздуха к организованному притоку, регулируемому с помощью специальных устройств, которые должны отвечать следующим требованиям:

- отсутствие дискомфорта по температуре и подвижности воздуха в помещении;
- герметичность устройства в закрытом положении;
- термическое сопротивление клапана приточного устройства должно быть не менее термического сопротивления оконного заполнения;
- возможность плавного регулирования притока воздуха от полностью открытого до полностью закрытого положения устройства;
- эстетичность.

Указанным выше требованиям отвечает рекуперация – способ вентиляции помещений через регулируемые вентилируемые окна и вентилируемые наружные стены. Суть такого способа вентиляции заключается

ся в том, что наружный холодный воздух, проходя через наружное ограждение, нагревается и выходит в помещение, возвращая часть потеряемого тепла.

Принципиальная схема рекуператора представляет собой двухстенный теплообменник, где, не перемешиваясь, встречаются два потока воздуха – вытяжной и приточный (рис. 54).

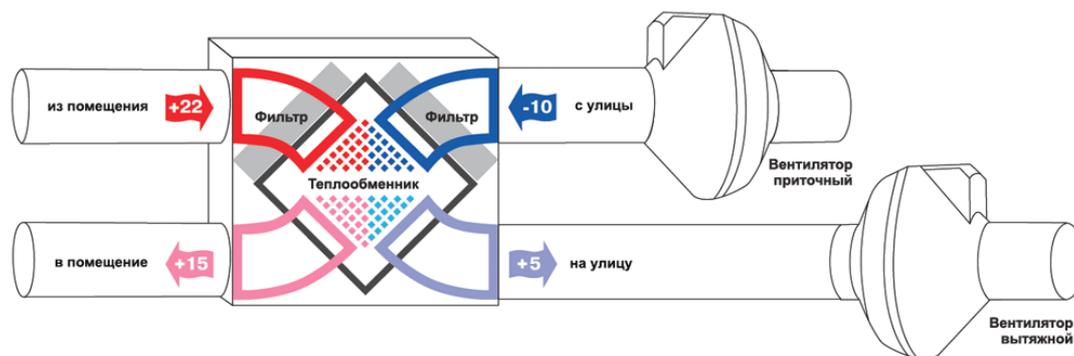


Рис. 54. Пример устройства вытяжной системы с рекуперацией воздуха

Имея разность температур, эти два воздушных потока обмениваются тепловой энергией между собой. В результате холодный воздух нагревается, а теплый воздух охлаждается. При помощи рекуперации можно сохранить более 70 % тепла, проходящего через рекуператор.

Выделяется несколько видов эффективности рекуперации:

1. Нулевая эффективность (эффективность открытого окна) наблюдается в случае, когда теплый воздух удаляется без дополнительного использования, а холодный воздух, попавший в помещение, понижает температуру воздуха в помещении.

2. Эффективность 100 % (на практике невозможна) могла бы возникнуть в случае, если приточный воздух нагреется до температуры удаляемого из помещения воздуха, потери энергии при этом не происходит.

3. Эффективность 30–90 % достигается использованием в системе вентиляции рекуператоров.

Рекуператоры могут быть классифицированы в зависимости от конструктивного исполнения и предназначения на следующие виды:

– по типу движения воздуха (теплоносителя) – прямоток или противоток;

– по принципу действия и конструктивному исполнению теплообменника – роторный рекуператор и пластинчатый рекуператор.

Среди недостатков системы рекуперации воздуха можно отметить ее стоимость, а также необходимость систематического поддержания системы в работоспособном состоянии (очистка каналов и фильтров).

## 2. ПРИМЕР РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

### Задание на расчетно-графические работы по дисциплине «Энергоэффективные конструкции в строительстве»

Студент \_\_\_\_\_ группа \_\_\_\_\_  
Опорный план \_\_\_\_\_

Место строительства (город) и план здания принимать согласно заданию по дисциплине «Архитектура».

Задание: разработать проект повышения энергоэффективности здания.

#### Варианты расчетов (на усмотрение преподавателя):

Выполнить расчет количества теплоты, получаемой от энергоэффективного фундамента малоэтажного здания.

Выполнить теплотехнический расчет наружной стены малоэтажного здания. Сравнение вариантов.

Выполнить теплотехнический расчет утепления фундамента малоэтажного здания. Сравнение вариантов.

Выполнить теплотехнический расчет вариантов утепления кровли (покрытия) малоэтажного здания. Сравнение вариантов.

Выполнить теплотехнический расчет вариантов утепления полов малоэтажного здания. Сравнение вариантов.

Выполнить теплотехнический расчет наружной стены малоэтажного здания при устройстве энергосберегающих окон. Сравнение вариантов.

### 3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

Отчет по расчетно-графической работе должен состоять из пояснительной записки и графического материала.

Пояснительная записка включает в себя:

- введение, где приведено краткое описание местоположения объекта малоэтажного строительства;
- основную часть, куда входят исходные данные, описание природных условий района строительства, расчеты и сравнение вариантов повышения энергоэффективности здания;
- заключение, где приводятся краткие итоги и ответы на поставленные во введении задачи;
- список использованных источников, оформленный в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 [5];
- приложения, содержащие необходимые графические материалы.

Пояснительная записка оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32–2001 [6] на листах формата А4 в редакторе Microsoft Word.

Образец титульного листа приведен в приложении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадьин Г.М., Сычев С.А. Современные технологии строительства и реконструкции зданий. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 288 с.
2. Бадьин Г.М. Строительство и реконструкция малоэтажного энергоэффективного дома. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 432 с.
3. Бобров И.А., Захаров А.В. Применение тепловой энергии грунтового основания для отопления и кондиционирования зданий // Вестник Пермского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2011. – № 1. – С. 10–14.
4. Голованова Л.А. Энергосбережение в жилищном строительстве. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2005. – 146 с.
5. ГОСТ 7.1–2003 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. – М., 2004. – 166 с.
6. ГОСТ 7.32–2001. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. – М., 2001. – 26 с.
7. Горизонтальный теплообменник: пат. 2296284 Рос. Федерация: МПК F 28 D 21/00 / Енисеев Г.А.; заявитель и патентообладатель Енисеев Г.А. – № 2004123608/06; заявл. 30.07.2004; опубл. 27.03.2007, Бюл. № 9. – 6 с.
8. Грунтовый теплообменник: пат. 2472076 Рос. Федерация: МПК F 24 J 3/08 / Игнатов Ю.Н., Игнатов В.Н., Игнатов М.В., Игнатов И.Ю.; заявители и патентообладатели Игнатов Ю.Н., Игнатов В.Н., Игнатов М.В., Игнатов И.Ю. – № 2011117920/06; заявл. 04.05.2011; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1. – 7 с.
9. Колечкина А.Ю., Захаров А.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет использования систем горизонтальных теплообменников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2016. – Т. 7, № 1. – С. 112–122.
10. Крамина Т.А. Нетрадиционные методы получения геотермальной энергии // Известия Казан. гос. архит.-строит. ун-та. – 2015. – № 2. – С. 213–219.
11. Лапина О.А., Лапина А.П. Энергоэффективные технологии [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 1, ч. 2. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2849](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2849).

12. Лукутин Б.В. Возобновляемые источники энергии: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2008. – 187 с.
13. Овчаров П.В., Садыков Р.А. Применение тепловых насосов в энергосберегающем комплексе // Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. Известия КГАСУ. – 2012. – № 2(20). – С. 125–134.
14. Пономарев А.Б., Захаров А.В. Использование геотермальной энергии для отопления и кондиционирования зданий // Вестник Волгоград. гос. архит.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2010. – Вып. 17(36). – С. 119–122.
15. Рей Д., Макмайкл Д. Тепловые насосы: пер. на рус. яз. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
16. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02–2003. – М., 2012. – 95 с.
17. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В. Энергоэффективные здания. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200 с.
18. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
19. Чечеткин А.В., Занемонец Н.А. Теплотехника: учебник для хим.-технол. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1986. – 344 с.
20. Шамигулов П.В. Определение оптимальной глубины закладки горизонтального теплообменника теплового насоса // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – Вып. 17(18). – С. 48–53.
21. Asrar G., Kanemasu E.T. Estimating thermal diffusivity near the soil surface using Laplace transform: Uniform initial conditions // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1983. – № 47. – P. 397–401.
22. Brandl H. Energy foundation and other thermo-active ground structures // Geotechnique. – 2006. – № 56. – P. 81–122.
23. Geothermal energy: an underground idea starts to surface // Engineered Systems. – 1998. – № 4. – P. 25–26.
24. Katzenbach R., Waberseck T. Geothermics as an element of developed and sustainable energy supply to prevent the world climate change // Geotechnical Problems of the 21st Century in the Construction of Buildings and Foundations. – Perm, 2007. – P. 146–148.

ПРИЛОЖЕНИЕ

**Форма титульного листа  
отчета по расчетно-графической работе**

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»**

Строительный факультет  
Кафедра «Строительное производство и геотехника»  
Направление: 08.04.01 – Строительство

**О Т Ч Е Т**  
**по расчетно-графической работе по дисциплине**  
**«Энергоэффективные конструкции в строительстве»**

Выполнил студент гр. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(Фамилия, имя, отчество)

\_\_\_\_\_  
(подпись)

**Проверил:**

\_\_\_\_\_  
(должность, Ф.И.О. преподавателя)

\_\_\_\_\_  
(оценка)

\_\_\_\_\_  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
(дата)

Пермь 20\_\_

Учебное электронное издание

Захаров Александр Викторович,  
Сычкина Евгения Николаевна,  
Пономарев Андрей Будимирович

## **ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Учебное электронное пособие

Редактор и корректор *В.В. Мальцева*

---

Подписано к использованию 29.05.2017.

Тираж 10 экз. Заказ № 121/2017.

---

Издательство

Пермского национального исследовательского  
политехнического университета.

Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, к. 113.

Тел. (342) 219-80-33.