

В.И. БОДРОВ, М.В. БОДРОВ, В.Ю. КУЗИН, Ж.А. ШЕВЧЕНКО

ИНЖЕНЕРНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ПАССИВНЫХ ДОМОВ

Учебник

Международный проект *TEMPUS* 530793
«Магистерские программы по возобновляемым источникам энергии
и энергоэффективности в зданиях в Центральной Азии и России» (*MAPREE*)



Нижний Новгород
2015

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

В.И. Бодров, М.В. Бодров, В.Ю. Кузин, Ж.А. Шевченко

Инженерные основы создания пассивных домов

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебника

Нижний Новгород
ННГАСУ
2015

ББК 38
И 62
УДК 620.9:69.03:697

Печатается в авторской редакции

Рецензенты:

А. М. Береговой – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Е. Г. Ионычев – кандидат технических наук, генеральный директор ЗАО «Проект-промвентиляция»

Бодров, В. И. Инженерные основы создания пассивных домов: учебник / В. И. Бодров, М. В. Бодров, В. Ю. Кузин, Ж. А. Шевченко; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2015. – 110 с. ISBN 978-5-528-00126-5

Ключевые слова: вентиляция, ветроэлектрогенератор, возобновляемые источники энергии, пассивный дом, повышение энергетической эффективности, тепловой насос, фотоэлектрическая батарея, энергосбережение

Изложены общие основы создания пассивных домов, в том числе особенности конструирования их пассивных (тепловой контур) и активных (отопление, вентиляция, тепло-снабжение) систем обеспечения параметров микроклимата, а также электроснабжения с применением современного оборудования, использующего возобновляемые источники энергии: ветроэлектрогенераторы, фотоэлементы, солнечные коллекторы, тепловые насосы.

Предназначено для магистрантов, обучающихся по направлениям подготовки 08.04.01 Строительство, профиль «Возобновляемые источники энергии и энергоэффективность в зданиях» в соответствии с Международным проектом TEMPUS 530793 «Магистерские программы по возобновляемым источникам энергии и энергоэффективности в зданиях в Центральной Азии и России» (MAPREE). Учебник может быть полезен также для научных работников и аспирантов технических специальностей.

ББК 38

ВВЕДЕНИЕ

Учебник «Инженерные основы создания пассивных домов» предназначен для формирования общих и специальных знаний о конструировании активных и пассивных систем обеспечения параметров микроклимата современных энергетически пассивных зданий.

Данный учебник разработан и предназначен для магистрантов, обучающихся в ННГАСУ по направлению подготовки магистратуры 08.04.01 Строительство, профиль «Возобновляемые источники энергии и энергоэффективность в зданиях» в соответствии с Международным проектом TEMPUS 530793 «Магистерские программы по возобновляемым источникам энергии и энергоэффективности в зданиях в Центральной Азии и России» (MAPREE).

Учебник может быть успешно использован для обучения студентов по направлениям подготовки магистратуры – 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль «Тепломассообменные процессы и установки», 08.04.01 Строительство, профиль «Системы обеспечения микроклимата зданий и сооружений» и бакалавриата – 08.03.01 Строительство, профиль «Теплогазоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение зданий, сооружений, населенных пунктов», а также 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль «Промышленная теплоэнергетика».

В настоящее время в странах Западной Европы особое внимание уделяется возведению современных энергетически пассивных зданий, позволяющих многократно снизить потребление невозобновляемых энергетических ресурсов. При этом комфорт в помещениях данных зданий не только не снижается по сравнению с общепринятыми в существующем строительстве решениями, но даже повышается.

Поддержание комфортных параметров микроклимата в них достигается за счет: повышения теплотехнической однородности наружных ограждающих конструкций и, как следствие, снижения градиента полей температур на их внутренних поверхностях; равномерного распределения температур внутренне-

го воздуха по всем направлениям помещений; выполнения обязательного нормативного воздухообмена средствами механической вентиляции.

Следующим шагом в возведении энергетически пассивных зданий является создание эко-зданий, соответствующих современным стандартам «зеленого» строительства, являющегося одним из важнейших направлений в мировой строительной индустрии. Конечной целью проектирования эко-зданий является повышение устойчивости среды обитания людей, которая характеризует максимальное удовлетворение потребностей человека в здании, как среде его жизнедеятельности, при минимальном воздействии на экологию и потреблении невозобновляемых ресурсов на протяжении всего цикла жизни объекта.

Строительство пассивных домов также развивается в направлении возведения зданий с нулевым выбросом CO₂, способных генерировать дополнительную энергию. Инженерные системы дома с нулевым выбросом CO₂ полностью обеспечивают себя энергией из возобновляемых источников (ветроэлектрогенераторы, фотоэлектрические модули, тепловые насосы и пр.).

Пассивный дом – это здание, возведенное по строительному стандарту, который обеспечивает пониженное потребление тепловой энергии и предполагает либо отсутствие отдельной системы отопления в нем, либо наличие отопительной системы малой мощности.

Наибольшее распространение пассивные дома получили в странах Западной, Центральной и Северной Европы, в которых устанавливаются следующие обязательные стандарты их проектирования:

- 1) максимальное использование теплоты солнечной радиации, предусматривающее расположение большей части окон на южном фасаде;
- 2) использование систем воздушного отопления или их совместное использование в наиболее холодные месяцы отопительного периода с радиаторным или напольным отоплением;
- 3) суммарная мощность отопительно-вентиляционных систем не должна превышать 10 Вт на 1 м² отапливаемой площади пола здания;

4) удельный расход тепловой энергии на отопление 1 м^2 площади пола здания не должен превышать величины $q_{\text{от}} = 15 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$;

5) общее потребление первичной энергии для всех бытовых нужд (отопление, горячее водоснабжение и электроснабжение), приведенное к 1 м^2 площади пола здания, не должно превышать величины $q_{\text{об}} = 120 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$;

6) пониженная воздухопроницаемость ограждающих конструкций – средняя кратность воздухообмена через все наружные ограждающие конструкции при перепаде давления на них 50 Па не более $n_{50} = 0,3 \dots 0,5 \text{ ч}^{-1}$;

7) использование ограждающих конструкций, не предполагающих наличие точечных и линейных теплотехнических неоднородностей (тепловых мостов), с высокими значениями дополнительных потерь теплоты через них;

8) максимальное использование бытовых и биологических тепловыделений, по величине достигающих значений $q_{\text{быт}} = 10 \dots 17 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Безусловно, капитальная стоимость возведения пассивного дома значительно выше, чем обычного дома, возведенного по действующим в РФ стандартам проектирования, однако, их возведение имеет ряд важных преимуществ:

1) использование автоматизированных механических приточно-вытяжных систем вентиляции и отопления позволяет организовать более комфортный микроклимат в помещениях, исключая повышенную влажность внутреннего воздуха и присутствие сквозняков, которые приводят к наличию плесени на внутренних поверхностях наружных ограждающих конструкций;

2) снижение потребления энергетических ресурсов на нужды отопления здания более чем в десять раз, по сравнению со зданием, оборудованным классическими системами отопления и вентиляции;

3) уменьшение эксплуатационных расходов по энергообеспечению здания, даже при растущих ценах на энергоносители;

4) применение экологических технологий способствующих защите окружающей среды и влияющих на снижение вредных выбросов котельно-печного оборудования в атмосферу;

5) практически полная независимость от внешних инженерных коммуникаций (наружных систем теплоснабжения, газоснабжения, электроснабжения), при использовании в наиболее холодные периоды дизельгенераторов.

Дома, генерирующие дополнительную энергию, предполагают наличие инженерных систем способных производить энергию большую, чем требуется для собственных нужд здания, что позволяет продавать её излишки энергетическим компаниям, например, вырабатываемую фотоэлектрическими батареями электрическую энергию в теплый период года.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам учебника: доктору технических наук, профессору А.М. Береговому (Пензенский государственный университет архитектуры и строительства); кандидату технических наук, генеральному директору ЗАО «Проектпромвентиляция» Е.Г. Ионычеву за ценные советы и замечания, сделанные при рецензировании рукописи.

Глава 1. ТЕПЛОВОЙ КОНТУР ПАССИВНЫХ ДОМОВ

1.1. Общие принципы конструирования

К теплозащитной оболочке пассивных домов предъявляются следующие общепринятые в практике строительства требования:

- 1) геометрические размеры здания должны по возможности обеспечивать его минимальный коэффициент компактности $K_{\text{комп}}, \text{м}^2/\text{м}^3$;
- 2) наружные ограждения должны иметь высокие значения условного $R_o^{\text{усл}}, \text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, и приведенного $R_o^{\text{пр}}, \text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, сопротивлений теплопередаче;
- 3) требуется применять такие узлы сопряжения наружных ограждающих конструкций, которые обеспечивают наиболее высокие значения коэффициентов теплотехнической однородности ограждений ($r \rightarrow 1$);
- 4) рекомендуется отдавать предпочтения пристраиваемым домам вместо новых отдельно стоящих зданий;
- 5) следует избегать сложных геометрических форм здания.

Коэффициент компактности $K_{\text{комп}}, \text{м}^2/\text{м}^3$ определяется по формуле [34]:

$$K_{\text{комп}} = \frac{A_{\text{н}}^{\text{сум}}}{V_{\text{от}}}, \quad (1.1)$$

где $A_{\text{н}}^{\text{сум}}$ – сумма площадей по внутреннему обмеру всех наружных ограждений теплозащитной оболочки здания, м^2 ; $V_{\text{от}}$ – отапливаемый объем здания, измеряемый по внутреннему обмеру наружных ограждающих конструкций, м^3 .

Коэффициент компактности здания связан с общим коэффициентом теплопередачи наружных ограждающих конструкций $K_{\text{общ}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$, и удельной теплозащитной характеристикой здания $k_{\text{об}}, \text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$, зависимостью:

$$k_{\text{об}} = \frac{1}{V_{\text{от}}} \sum \frac{A_i}{R_{0i}^{\text{пр}}} n_{ii} = K_{\text{комп}} K_{\text{общ}}, \quad (1.2)$$

где A_i – площадь i -го типа наружной ограждающей конструкции здания (стена, пол, потолок, окно, входная дверь), м^2 ; n_{ii} – коэффициент, учитывающий несоответствие температуры наружного или внутреннего воздуха расчетному тем-

пературному перепаду для i -го типа наружной ограждающей конструкции; R_{oi}^{np} – приведенное сопротивление теплопередаче i -го типа наружной ограждающей конструкции.

Общий коэффициент теплопередачи здания $K_{общ}$, Вт/(м²·°C), равен:

$$K_{общ} = \frac{1}{A_n^{сум}} \sum \frac{A_i}{R_{oi}^{np}} n_{ii}. \quad (1.3)$$

Приведенное сопротивление теплопередаче R_o^{np} , м²·°C/Вт, фрагмента теплозащитной оболочки здания или любой выделенной ограждающей конструкции определяется по формуле [34, 37]:

$$R_o^{np} = \frac{1}{\frac{1}{R_o^{усл}} + \sum l_j \Psi_j + \sum n_k \chi_k}, \quad (1.4)$$

где $R_o^{усл}$ – осредненное по площади условное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки здания либо выделенной ограждающей конструкции, м²·°C/Вт; l_j – протяженность линейной неоднородности j -го вида, приходящаяся на 1 м² фрагмента теплозащитной оболочки здания, или выделенной ограждающей конструкции, м/м²; Ψ_j – удельные потери теплоты через линейную неоднородность j -го вида, Вт/м·°C [34]; n_k – количество точечных неоднородностей k -го типа, приходящихся на 1 м² фрагмента теплозащитной оболочки здания, или выделенной ограждающей конструкции, шт./м²; χ_k – удельные потери теплоты через точечную неоднородность k -го вида, Вт/шт.·°C.

Перечень теплотехнических неоднородностей учитываемых при проектировании тепловой защиты наружных ограждающих конструкций зданий приведен в Приложении А [22]. Коэффициент теплотехнической однородности r – вспомогательная величина, характеризующая эффективность конструкции, определяемая по формуле [37]:

$$r = \frac{R_o^{np}}{R_o^{усл}}. \quad (1.5)$$

Величина R_o^{ysl} определяется осреднением по площади значений условных сопротивлений теплопередаче частей фрагмента теплозащитной оболочки:

$$R_o^{ysl} = \frac{1}{\alpha_b} + \sum_s R_s + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (1.6)$$

где α_n – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С); α_b – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м²·°С); R_s – термическое сопротивление слоя однородной части фрагмента, (м²·°С)/Вт, определяемое для материальных слоев по формуле:

$$R_s = \frac{\delta_s}{\lambda_s}, \quad (1.7)$$

где δ_s – толщина слоя, м; λ_s – теплопроводность материала слоя, Вт/(м·°С), принимается по данным Приложения Т [34].

1.2. Наружные стены

В настоящее время существует большое количество типовых конструкций наружных и внутренних стен пассивных домов, а именно [46]:

1) наружная стена с деревянной рамой, облицовкой деревянными щитами и двумя слоями тепловой изоляции, внутренний слой тепловой изоляции выполнен из жестких теплоизоляционных плит толщиной δ_2 (рис. 1.1);

2) наружная стена с деревянной рамой, облицовкой деревянными щитами и двумя слоями тепловой изоляции, наружный слой которой выполнен из жестких теплоизоляционных плит толщиной δ_2 (рис. 1.2);

3) наружная стена с деревянной рамой, с внутренней облицовкой деревянной рамой, наружной облицовкой декоративным кирпичом и двумя слоями тепловой изоляции, наружный слой которой выполнен из жестких теплоизоляционных плит толщиной δ_2 (рис. 1.3);

4) наружная стена с деревянной рамой, облицовкой деревянными щитами и одним слоем тепловой изоляции толщиной δ , мм, которая фиксируется деревянными рейками из двутаврового профиля (рис. 1.4)

- 5) внутренняя стена между помещениями, выполненная в виде деревянной рамы из слоя утеплителя, ограниченного деревянными щитами (рис. 1.5);
- 6) бревенчатая стена с наружным или внутренним слоем и тепловой изоляции, ограниченными деревянными щитами (рис. 1.6);
- 7) трехслойная наружная стена с внутренним несущим слоем из кирпича, покрытым наружным слоем тепловой изоляции, облицованная декоративным кирпичом толщиной в полкирпича (рис. 1.7);
- 8) железобетонная наружная стена, с наружным утеплением и наружной облицовкой деревянными щитами (рис 1.8);
- 9) железобетонная наружная стена с внутренним слоем тепловой изоляции, выполненной в два слоя (рис. 1.9);
- 10) железобетонная наружная стена с двумя слоями тепловой изоляции (наружным и внутренним, рис. 1.10);
- 11) железобетонная наружная стена с наружным слоем тепловой изоляции и облицовочным слоем декоративным кирпичом (рис. 1.11);
- 12) наружная стена из газобетонных блоков с наружным слоем тепловой изоляции, покрытой штукатурным слоем (рис. 1.12);
- 13) наружная стена из газобетонных блоков с наружным слоем тепловой изоляции и наружной облицовкой деревянными щитами (рис. 1.13);
- 14) наружная стена из газобетонных блоков с внутренним слоем тепловой изоляции и внутренней облицовкой деревянными щитами (рис. 1.14);
- 15) наружная стена из легких керамических блоков с наружным слоем тепловой изоляции и облицовкой деревянными щитами (рис. 1.15);
- 16) наружная стена из легких керамических блоков с внутренней тепловой изоляцией облицованной деревянными щитами (рис. 1.16);
- 17) наружная стена из легких керамических блоков с наружной тепловой изоляцией, покрытой штукатурным слоем (рис. 1.17);

18) наружная стена с деревянной рамой, облицовкой деревянными щитами, одним или двумя слоями тепловой изоляции и ограничительными рейками, выполненными из стального П-образного профиля (рис. 1.18);

19) стены из соломенных панелей (рис. 1.19 [50]);

20) стены из вакуумной тепловой изоляции (рис. 1.20 [51]).

Из приведенных конструкций наружных стен наибольшее распространение при возведении пассивных домов получили каркасные конструкции стен (рис. 1.1...1.6, 1.18), которые позволяют добиться высоких значений теплотехнической однородности наружных ограждающих конструкций. Конструкции тепловой изоляции железобетонных стен, как правило, относятся к ограждениям цокольных этажей (рис. 1.8...1.11), а также наружных стен зданий высотой 3...5 этажей и более. Использование в качестве несущего слоя газосиликатных и легких керамических блоков обосновано для зданий малой этажности с несущими стенами (до 3 этажей), а также для домов этажностью более 3 этажей, имеющих самонесущие и ненесущие стены.

Газосиликатные и клинкерные блоки малой плотности ($500...700 \text{ кг/м}^3$) имеют в 2...4 раза более низкую теплопроводность ($\lambda = 0,2...0,4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$), чем конструкции из силикатного кирпича или железобетона, что позволяет значительно снизить требуемую толщину тепловой изоляции наружных ограждений при их использовании (табл. 1.1 [21, 38, 41]).

Снижение толщины тепловой изоляции $\Delta\delta_{\text{ут}}$, мм, при использовании конструктивного слоя, приведенного в табл. 1.1 вместо железобетонной плиты, определяется по зависимости:

$$\Delta\delta_{\text{ут}} = \frac{\delta_{\text{эт}}(\lambda_{\text{ж/б}} - \lambda_{\text{к}})\lambda_{\text{ут}}}{\lambda_{\text{к}}\lambda_{\text{ж/б}}}, \quad (1.8)$$

где $\delta_{\text{эт}}$ – эталонная толщина конструктивного слоя, 250 мм; $\lambda_{\text{к}}$, $\lambda_{\text{ж/б}}$, $\lambda_{\text{ут}}$ – теплопроводности конструктивного слоя, железобетона и утеплителя, соответственно, $\text{Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, $\lambda_{\text{ут}} = 0,04 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.

Согласно стандартам энергопотребления пассивных домов, минимальная толщина тепловой изоляции наружных несветопрозрачных ограждающих конструкций при теплопроводности $\lambda \leq 0,04$ Вт/(м·°С) должна быть не менее $\delta_{\text{ут}} = 250$ мм. В климатических условиях нашей страны целесообразно увеличивать данную величину до достижения условного сопротивления теплопередаче $R_0^{\text{усл}} = 10$ м²·°С/Вт [41]. Достижение столь высоких значений условного сопротивления теплопередаче возможно, только с использованием эффективных теплоизоляционных конструкций, сравнительный анализ материалов которых приведен в табл. 1.2.

Таблица 1.1
Теплотехнические характеристики конструктивных слоев стен толщиной 250 мм

Наименование конструктивного слоя	λ , Вт/(м·°С)	$R_0^{\text{усл}}$, м ² ·°С/Вт	$\Delta\delta_{\text{ут}}$, мм
1. Железобетонная плита	2,04	0,123	0
2. Кладка из силикатного кирпича	0,76...0,81	0,309...0,329	5...10
3. Кладка из глиняного кирпича	0,70...0,81	0,309...0,357	5...10
4. Кладка из легких клинкерных блоков	0,52...0,64	0,391...0,480	10...15
5. Кладка из газобетонных блоков	0,3...0,62	0,403...0,833	10...30

Таблица 1.2
Теплотехнические характеристики слоя тепловой изоляции при $R_0^{\text{усл}} = 10$ м²·°С/Вт

Теплоизоляционный материал	$\lambda_{\text{ут}}$, Вт/(м·°С)	$\delta_{\text{ут}}$, мм
Минеральная вата	0,043	430
Пенополистирол	0,032	320
Пенополиуретан	0,030	300
Стекловата	0,050	500
Вакуумная теплоизоляция	0,0045	45

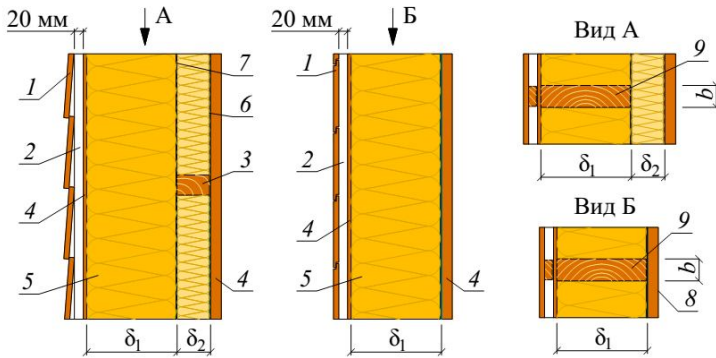


Рис. 1.1. Конструкции наружных стен с деревянной рамой: 1 – наружная облицовка; 2 – 20 мм вентилируемого слоя; 3 – крестообразная вставка в тепловой изоляции; 4 – обшивка; 5 – тепловая изоляция; 6 – пароизоляция; 7 – альтернативное расположение пароизоляции; 8 – внутренняя облицовка; 9 – рейка (с шагом 0,6 м)

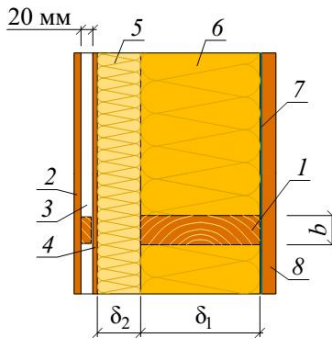


Рис. 1.2. Конструкция наружной стены с наружной жесткой тепловой изоляцией: 1 – рейка (шаг 0,6 м); 2 – наружная облицовка; 3 – 20 мм вентилируемого слоя; 4 – обшивка; 5 – 50 мм жесткой тепловой изоляции; 6 – тепловая изоляция; 7 – пароизоляция; 8 – внутренняя облицовка

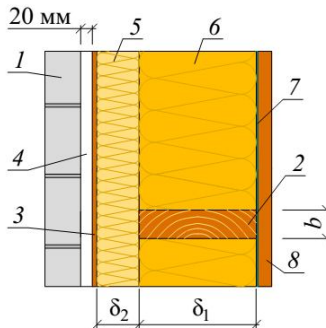


Рис. 1.3. Конструкция наружной стены с внешним слоем кирпичной кладки: 1 – кирпич; 2 – рейка (шаг 0,6 м); 3 – обшивка; 4 – 20 мм вентилируемого слоя; 5 – наружный слой тепловой изоляции; 6 – внутренний слой тепловой изоляции; 7 – пароизоляция; 8 – внутренняя облицовка

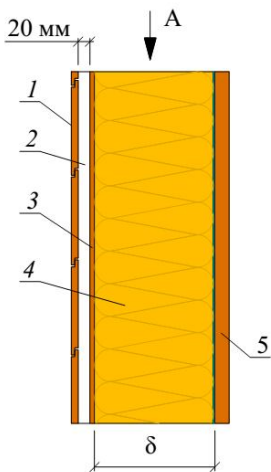


Рис. 1.4. Конструкция наружной стены с двутавровым профилем: 1 – наружная облицовка; 2 – 20 мм вентилируемого слоя; 3 – обшивка; 4 – тепловая изоляция; 5 – внутренняя облицовка; 6 – пароизоляция; 7 – рейка, двутавровый профиль, шаг 0,6 м

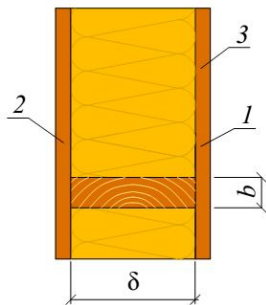
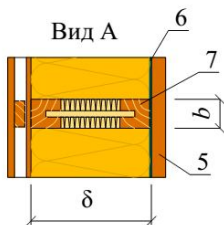


Рис. 1.5. Конструкция внутренней стены здания, между помещениями с разными температурами: 1 – 36 мм или 48 мм рейка с шагом 0,6 м; 2 – облицовка; 3 – тепловая изоляция

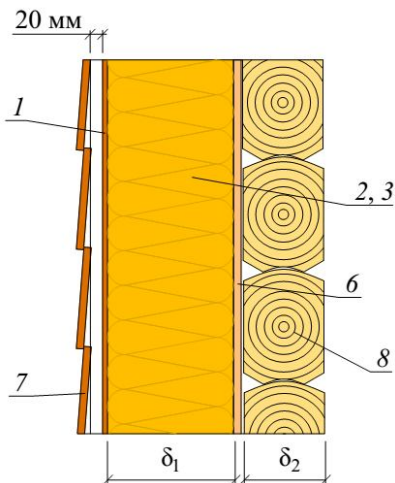
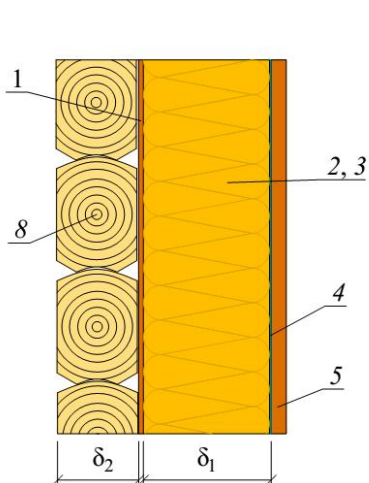


Рис. 1.6. Конструкция бревенчатой стены с внутренней и наружной тепловой изоляцией: 1 – обшивка; 2 – рейка с шагом 0,6 м; 3 – тепловая изоляция; 4 – пароизоляция; 5 – обшивка; 6 – 20 мм вентилируемого слоя; 7 – наружная облицовка; 8 – бревенчатая стена

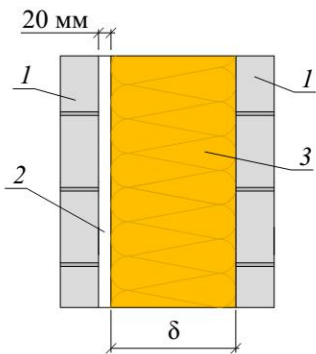


Рис. 1.7. Трехслойная стена с облицовочными слоями из кирпича: 1 – слой в полкирпича; 2 – 20 мм вентилируемого слоя; 3 – тепловая изоляция

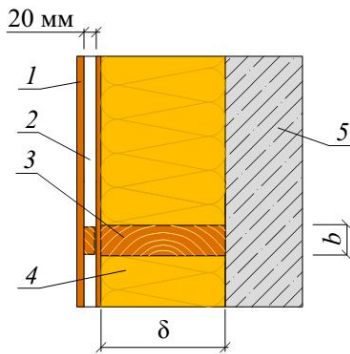


Рис. 1.8. Ж/б стена с наружным утеплением: 1 – наружная облицовка; 2 – 20 мм вентилируемого слоя; 3 – рейка с шагом 0,6 м; 4 – тепловая изоляция; 5 – ж/б стена

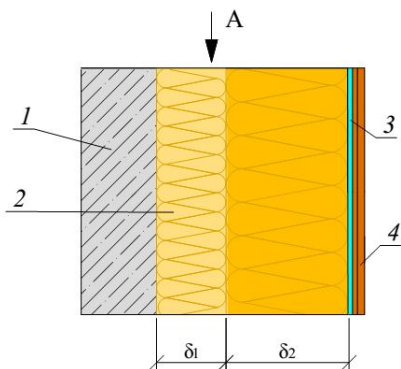


Рис. 1.9. Наружная ж/б стена с внутренней тепловой изоляцией: 1 – 150 мм ж/б плиты; 2 – тепловая изоляция; 3 – пароизоляция; 4 – облицовка; 5 – рейка с шагом 0,6 м

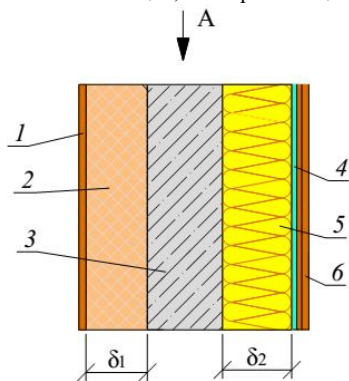
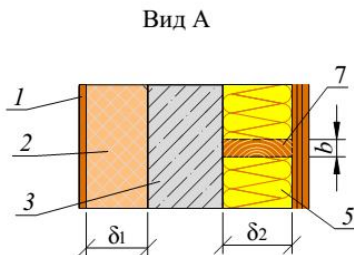
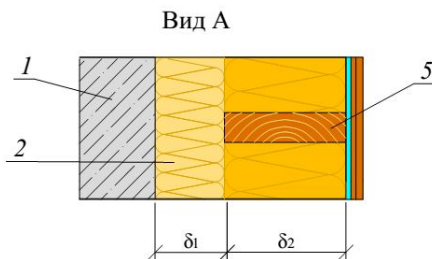


Рис. 1.10. Наружная стена с внутренней и наружной тепловой изоляцией: 1 – штукатурка; 2 – внешняя негорючая тепловая изоляция; 3 – 150 мм бетона; 4 – пароизоляция; 5 – тепловая изоляция; 6 – внутренняя облицовка; 7 – рейка с шагом 0,6 м



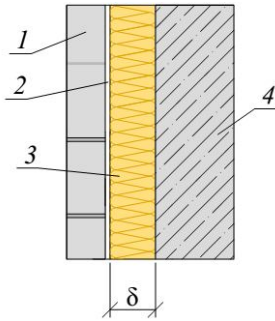


Рис. 1.11. Стена ж/б, утепленная, с облицовкой кирпичом: 1 – облицовочный кирпич; 2 – 20 мм вентилируемого слоя; 3 – тепловая изоляция; 4 – ж/б стена

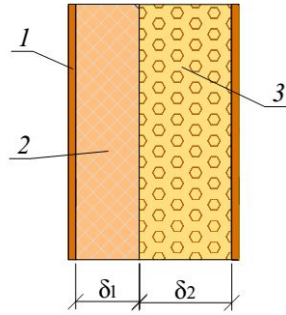


Рис. 1.12. Стена из газобетонного блока, с наружным утеплением и штукатурным слоем: 1 – штукатурный слой; 2 – теплоизоляция; 3 – газобетонные блоки

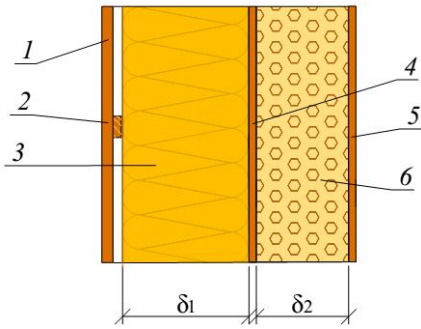


Рис. 1.13. Стена из газобетонных блоков с облицовкой доской: 1, 4 – обшивка; 2 – 20 мм вентилируемого слоя; 3 – тепловая изоляция; 5 – штукатурка; 6 – кладка из газобетонных блоков

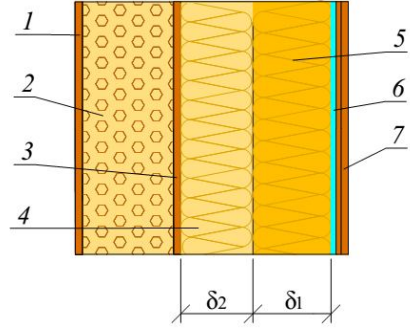


Рис. 1.14. Стена из газобетонных блоков с внутренним утеплением: 1 – штукатурка; 2 – газобетонный блок (кладка); 3 – стяжка; 4, 5 – теплоизоляция; 6 – гидроизоляция; 7 – внутренняя обшивка

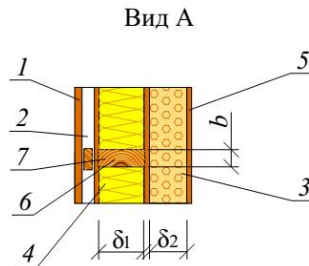
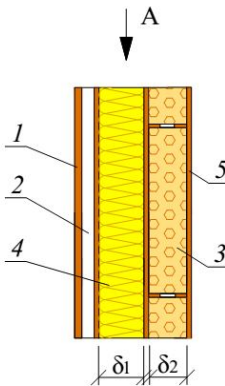


Рис. 1.15. Конструкция стены из легких керамических блоков с наружным утеплением: 1 – обшивка; 2 – 20 мм вентилируемого слоя; 3 – керамические блоки (кирпичи); 4 – теплоизоляция; 5 – стяжка; 6 – рейка с шагом 0,6 м; 7 – облицовка

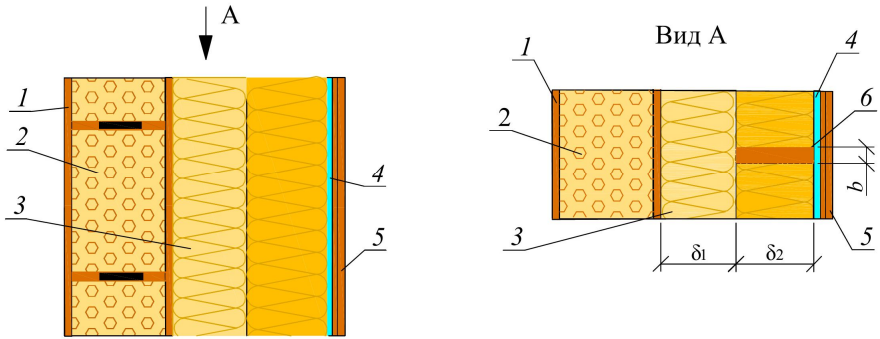


Рис. 1.16. Конструкция наружной стены из легких керамических блоков с внутренней тепловой изоляцией: 1 – штукатурный слой; 2 – легкие керамические блоки; 3 – тепловая изоляция; 4 – пароизоляция; 5 – внутренняя обшивка; 6 – рейка 48 мм, с шагом 0,6 м

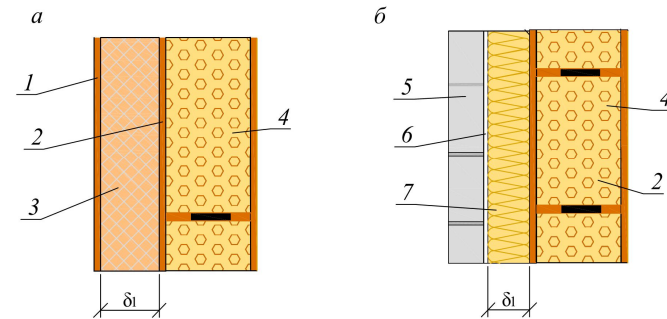


Рис. 1.17. Конструкция наружной стены из легких керамических блоков с наружной изоляцией (а – и штукатурным слоем; б – и слоем из облицовочного кирпича): 1, 2 – штукатурный слой; 3 – внешняя негорючая тепловая изоляция; 4 – кладка из керамических блоков; 5 – облицовочный кирпич; б – 20 мм вентилируемого слоя

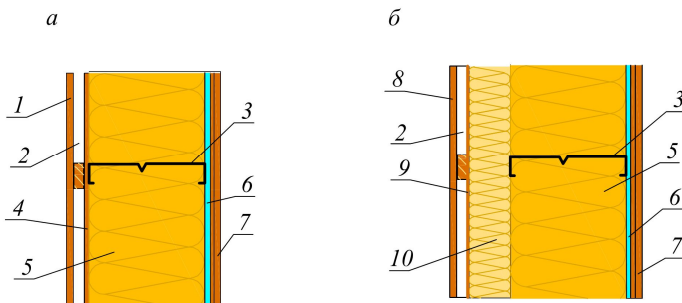


Рис. 1.18. Конструкция наружной стены с деревянной рамой и рейками из листового стального профиля (а – с обшивкой гипсокартоном; б – с внешней консольной связью 25/50 мм): 1 – фасадная панель; 2 – 20 мм вентилируемого слоя; 3 – стальной профиль с шагом 0,6 м; 4 – обшивка из 9 мм гипсокартона; 5 – тепловая изоляция; 6 – пароизоляция; 7 – внутренняя обшивка; 8 – внешняя обшивка; 9 – обшивка; 10 – консольное присоединение негорючей тепловой изоляции, толщиной 25 мм

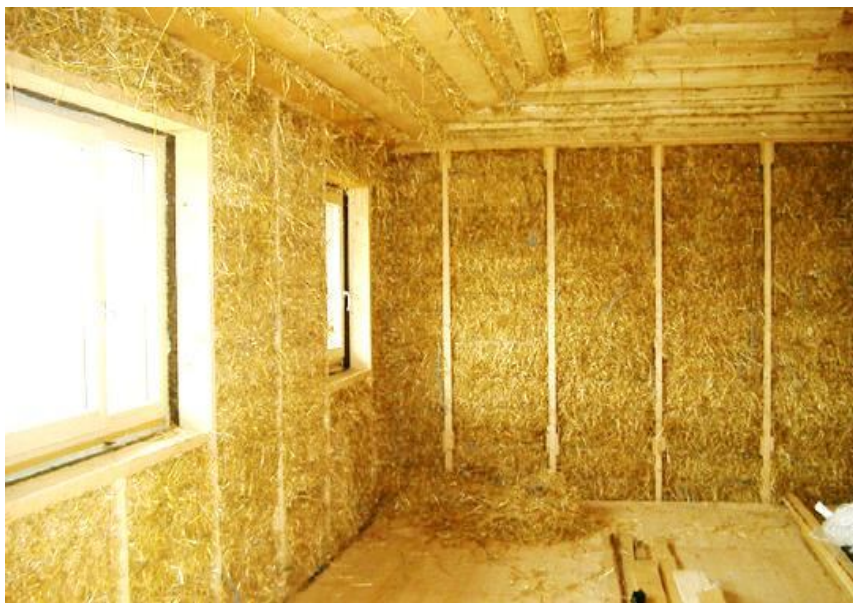


Рис. 1.19. Стены из соломенных панелей [50]



Рис. 1.20. Монтаж стен из вакуумной тепловой изоляции [51]

1.3. Покрытия и перекрытия

В пассивных домах малой этажности, как правило, применяются следующие конструкции покрытий кровли и чердачных перекрытий [46]:

1) чердачное перекрытие из тепловой изоляции, выполненное с ограничителями из I-образных профилей (рис. 1.21);

2) чердачное перекрытие с несущим слоем из железобетонной плиты и наружным слоем тепловой изоляции (рис. 1.22);

3) чердачное перекрытие с несущим слоем из легкого бетона и наружным слоем тепловой изоляции (рис. 1.23);

4) чердачное перекрытие с несущим слоем из пористого бетона и наружным слоем тепловой изоляции (рис. 1.24);

5) покрытие кровли из профильного листа над отапливаемым помещением с наружным слоем тепловой изоляции (рис. 1.25).

В случае применения конструкций тепловой изоляции чердачных перекрытий, приведенных на рис. 1.21...1.25, утеплитель кладут на несущую конструкцию поверх слоя пароизоляции. Пароизоляционный слой, таким образом, всегда находится в сечении ограждения с положительными температурами. Минеральная вата укладывается несколькими слоями, толщиной 100 мм, с направлениями раскатки перпендикулярными друг другу.

На рис. 1.26...1.28 приведены узлы сопряжения наружных стен пассивных домов с конструкциями утепленных полов по грунту. В качестве утепления полов по грунту и наружного утепления заглубленных частей стен, как правило, применяются плиты из пенополистирола. На рис. 1.28 приведен вариант внутреннего и наружного утепления заглубленной в грунт части стены с наружным и внутренним утеплением, из которого видно, что для уменьшения потерь теплоты через линейную теплотехническую неоднородность данного узла сопряжения предусмотрено устройство термического вкладыша, выполненного из строительной пены (поз. б).

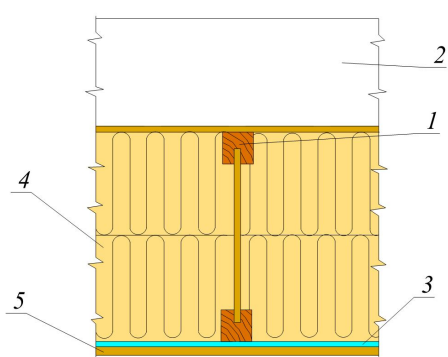


Рис. 1.21. Конструкция чердачного перекрытия с I-образным профилем: 1 – I-образный профиль; 2 – чердачное помещение; 3 – пароизоляция; 4 – тепловая изоляция; 5 – внутренняя обшивка

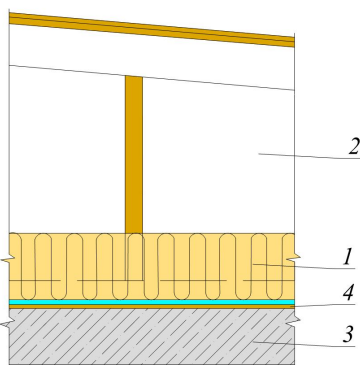


Рис. 1.22. Конструкция ж/б чердачного перекрытия: 1 – тепловая изоляция; 2 – чердачное помещение; 3 – ж/б плита перекрытия; 4 – пароизоляция

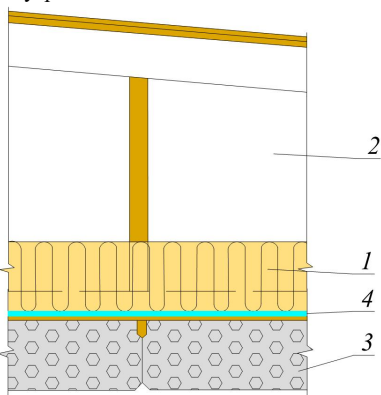


Рис. 1.23. Конструкция чердачного перекрытия из легкого бетона: 1 – тепловая изоляция; 2 – чердачное помещение; 3 – слой легкого бетона; 4 – пароизоляция

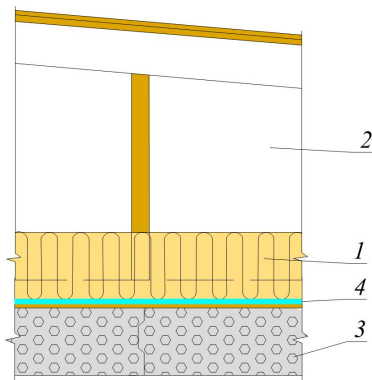


Рис. 1.24. Конструкция чердачного перекрытия из пористого бетона: 1 – тепловая изоляция; 2 – чердачное помещение; 3 – слой пористого бетона; 4 – пароизоляция

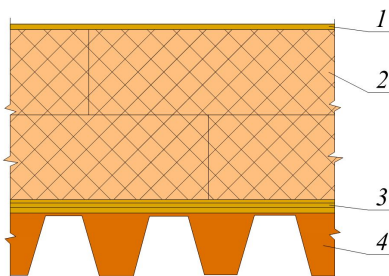


Рис. 1.25. Конструкция покрытия кровли из стальных листов: 1 – наружное покрытие; 2 – тепловая изоляция; 3 – пароизоляция; 4 – гофрированный стальной лист

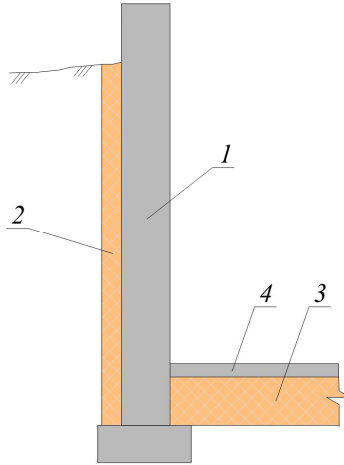


Рис. 1.26. Утепление узла сопряжения пола по грунту и стены с наружным слоем тепловой изоляции: 1 – ж/б стена; 2, 3 – пенополистирол; 4 – цементно-песчаная стяжка

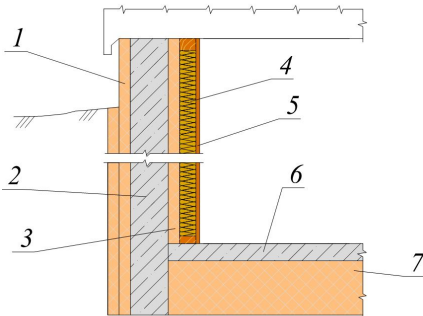


Рис. 1.27. Утепление узла сопряжения пола по грунту с наружным и внутренним утеплением (внутренний слой тепловой изоляции из пенополистирола и минеральной ваты): 1, 3 – пенополистирол; 2 – ж/б стена; 4 – плиты из минеральной ваты; 5 – гипсокартон; 6 – армированная цементно-песчаная стяжка; 7 – два слоя жестких плит пенополистирола

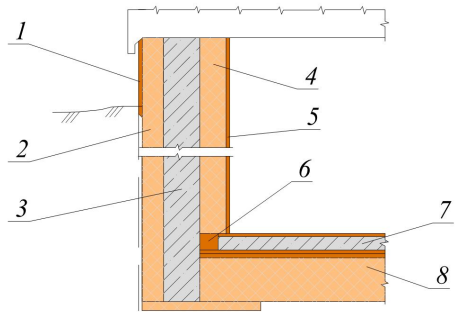


Рис. 1.28. Утепление узла сопряжения пола по грунту с наружным и внутренним утеплением (внутренний слой тепловой изоляции из пенополистирола): 1 – штукатурка; 2, 4 – пенополистирол; 3 – ж/б стена; 5 – гипсокартон; 6 – термический вкладыш (строительная пена); 7 – армированная цементно-песчаная стяжка; 8 – два слоя жестких плит пенополистирола

1.4. Светопрозрачные конструкции

Наружные светопрозрачные конструкции пассивных зданий должны работать как солнечные коллекторы. Окна должны быть преимущественно ориентированы на юг (до 80 % всех окон). Данное требование вызвано потребностью в максимальном использовании тепловой энергии солнечной радиации для снижения нагрузки на систему отопления.

Таким образом, светопрозрачные конструкции должны иметь максимальные значения коэффициентов относительного проникновения солнечной радиации τ_1 (не менее $\tau_1 = 0,5$) и затенения световых проемов τ_2 [32, 34]. В наиболее холодные месяцы отопительного периода теплопритоки от солнечной радиации незначительны, что требует применять наружные светопрозрачные конструкции с приведенным сопротивлением теплопередаче не ниже $R_o^{np} = 1,25 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$, согласно стандарта строительства пассивных домов.

В табл. 1.3 приведены значения конструкций окон с наибольшими приведенными сопротивлениями теплопередаче имеющимися на отечественном рынке светопрозрачных заполнений оконных проемов. Общепринятыми для применения в пассивных домах в европейских странах являются следующие конструкции остеклений, приведенные в табл. 1.4 [41].

Таблица 1.3
Приведенные сопротивления теплопередаче оконных блоков для пассивных домов

Конструкция окна	Производитель	$R_o^{np}, \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$
Оконная шестикамерная профильная система в ПВХ переплете с монтажной шириной 85 мм	Aluplast	1...1,32
Оконная трехкамерная профильная система в ПВХ переплете с монтажной шириной 85 мм	Aluplast	1,07...1,27
Оконная шестикамерная профильная система в ПВХ переплете с монтажной шириной 92 мм	Salamander GmbH	1,25
Оконная шестикамерная профильная система в ПВХ переплете с монтажной шириной 86 мм	Rehau	1,25
Оконная шестикамерная профильная система в ПВХ переплете с монтажной шириной 90 мм	Veka	1,04
Оконная шестикамерная профильная система в ПВХ переплете с монтажной шириной 88 мм	KBE	1,04

Допустимые конструкции остеклений в пассивных домах

Тип остекления	R_o^{np} , $M^2 \cdot ^\circ C / Bt$	τ_1
Двойное остекление с одним низкоэмиссионным покрытием / аргон	0,71...0,91	0,55...0,68
Тройное остекление с двумя низкоэмиссионными покрытиями, 2×11 мм / криптон	1,43...2,00	0,45...0,57
Тройное остекление с двумя низкоэмиссионными покрытиями, 2×16 мм / аргон	1,25...1,66	0,45...0,53
Двойная оконная рама, два стеклопакета с двумя стеклами (2×2 стекла) с одним низкоэмиссионным покрытием на каждом / аргон	1,66	0,47
Двойное остекление с одним низкоэмиссионным покрытием / аргон, и перед ними одно стекло с твердым покрытием	1,25	0,50

Примечание: значения R_o^{np} даются для окон с допустимыми конструкциями остеклений

Устройство окон с повышенным приведенным сопротивлением теплопередаче подразумевает высокую температуру на их поверхности, даже в отопительный период, что позволяет не устанавливать под ними дополнительных отопительных приборов.

1.5. Повышение теплотехнической однородности элементов наружных ограждающих конструкций

Теплотехнически неоднородный фрагмент ограждающей конструкции (теплотехническая неоднородность) – это фрагмент ограждающей конструкции, в котором линии равной температуры располагаются не параллельно друг другу. Теплотехнические неоднородности являются причиной дополнительных потерь теплоты через ограждения. Они подразделяются на линейные и точечные.

К теплотехническим неоднородностям относятся:

- 1) швы кладки из блоков легкого, особо легкого и ячеистого бетонов;
- 2) места крепления утеплителя тарельчатыми анкерами в системах фасадной тепловой изоляции с наружными штукатурными слоями и системах с вентилируемой воздушной прослойкой;
- 3) узлы сопряжения плит перекрытия с наружной стеной;
- 4) наружные и внутренние углы наружных стен;
- 5) примыкания оконных блоков к наружным стенам;
- 6) примыкания наружных стен к цокольным ограждениям;

- 7) сопряжения наружных стен с совмещенными кровельными покрытиями;
- 8) сопряжения покрытий кровли с узлами прохода вентиляционных каналов, трубопроводов, электрических кабелей, колонн и пр.

Потери теплоты через линейные теплотехнические неоднородности утепленных ограждающих конструкций могут достигать 40...50 % общих потерь, что позволяет при тщательном проектировании узлов сопряжения строительных конструкций и качественном выполнении монтажных работ значительно снизить потери теплоты через них. Основные правила конструирования теплового контура здания состоят в следующем [41]:

- 1) по возможности не делать отверстий в теплозащитной оболочке здания (правило избегания тепловых мостов);

- 2) при создании отверстий в теплоизоляционном слое необходимо по возможности в данном месте увеличить сопротивление теплопередаче в слое теплоизоляции, например, использовать пористый бетон или древесину (правило прохождения тепловой изоляции);

- 3) расположение утеплителя в стыках строительных элементов должно быть без пустых пространств, таким образом, стык должен быть полностью изолирован (правило примыкания стыков);

- 4) выбирать по возможности грани с тупыми углами (правило геометрии).

Конструирование теплового контура пассивного здания должно по возможности осуществляться без «тепловых мостов» (теплотехнических неоднородностей). Узлы примыкания строительных конструкций соответствуют стандарту пассивного дома, если выполняется условие:

$$\Psi_j \leq 0,01 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}, \quad (1.9)$$

Повышение теплотехнической однородности большинства узлов сопряжения строительных конструкций вполне достижимо, рассмотрим некоторые из них. На рис. 1.29 приведена конструкция узлов сопряжения наружных стен с наружным слоем тепловой изоляции и оконных блоков. Величина удельных потерь через линейную теплотехническую неоднородность для узла на рис. 1.29, *a*,

составляет $\Psi_j \approx 0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$. При устройстве нахлеста (рис. 1.29, б) толщиной $\delta_n = 20 \text{ мм}$, удельные потери снижаются до величины $\Psi_j \approx 0,035 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$, а при $\delta_n = 60 \text{ мм}$ – до $\Psi_j = 0$ [37]. Таким образом, при правильной конструкции данного узла сопряжения можно добиться значительного снижения дополнительных потерь теплоты через него.

Наибольшие потери теплоты через линейные теплотехнические неоднородности наблюдаются через узлы сопряжения плит перекрытия с наружными стенами. Данные узлы соответствуют, как правило, сопряжению плит перекрытия и наружных стен при устройстве балконов и лоджий. Повышение теплотехнической однородности таких узлов достигается двумя наиболее распространенными путями: термическим разделением теплового контура здания и балкона; перфорирование плиты перекрытия.

Первый способ заключается в креплении балконов на металлических колоннах, имеющих отдельный фундамент, что позволяет разделить тепловой контур здания и конструкцию балкона (рис. 1.30 [41]). Второй способ предполагает перфорирование бетонной плиты утеплителем (термическим вкладышем) в местах пересечения ею наружной стены, как это показано на рис. 1.31.

Основным параметром, характеризующим перфорацию, является соотношение длины термического вкладыша к расстоянию между соседними термическими вкладышами (рис. 1.31) – a/b . Еще одной важной величиной является толщина термического вкладыша $\delta_{\text{тер}}$, мм. В зависимости от конструкции стены устройство перфорации $a/b = 0 \dots 5/1$ позволяет снизить потери теплоты через линейную неоднородность от 2 до 3 раз (рис. 1.32). Второй способ не может считаться предпочтительным по сравнению с первым, так как даже для одного метра перфорированной плиты удельные потери через линейную теплотехническую неоднородность все равно составляют не менее $\Psi_j \approx 0,2 \dots 0,3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ [37].

Оценка теплотехнической однородности наружных ограждающих конструкций пассивных домов осуществляется по результатам тепловизионного обследования [6, 8, 31] с получением термограмм его наружных поверхностей (пример которой приведен на рис. 1.33).

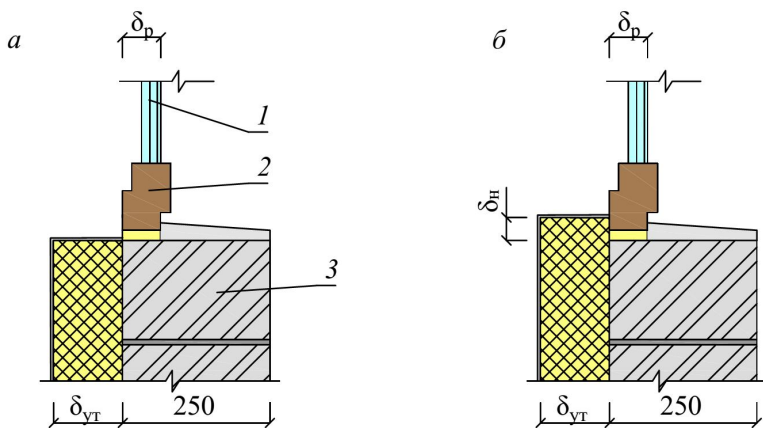


Рис. 1.29. Узлы сопряжения оконного блока и наружной стены (*a* – без нахлеста; *б* – с нахлестом): 1 – остекление оконного блока; 2 – рама оконного блока; 3 – кирпичная кладка; $\delta_{ут}$ – толщина утеплителя; δ_p – монтажная ширина окна



Рис. 1.30. Внешний вид балкона с креплением к металлическим колоннам (Германия) [41]

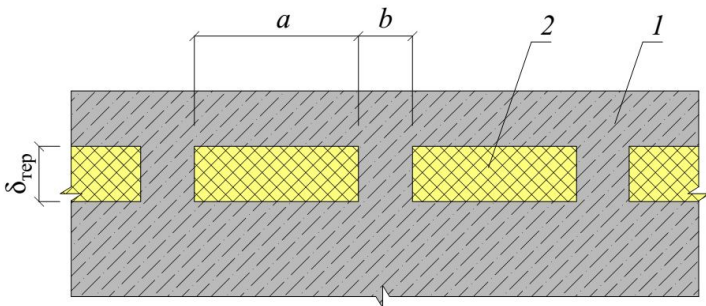


Рис. 1.31. Схема перфорации плиты перекрытия (вид сверху): 1 – плита перекрытия; 2 – тепловая изоляция (термический вкладыш)

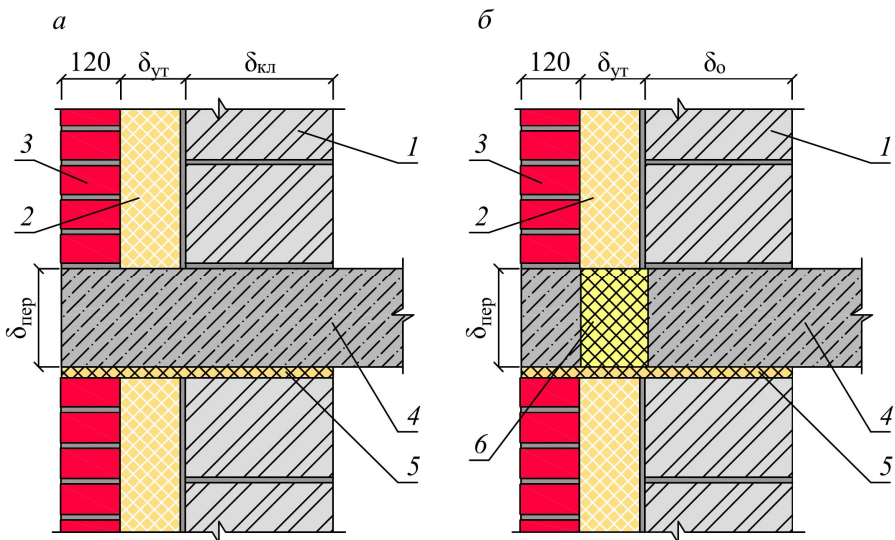


Рис. 1.32. Узел сопряжения ж/б плиты перекрытия (или балконной железобетонной плиты перекрытия) с наружной стеной (*a* – до устройства термического вкладыша в конструкции плиты; *б* – после устройства термического вкладыша в конструкции плиты): 1 – кирпичная кладка (или ограждение иной конструкции); 2 – эффективная тепловая изоляция; 3 – наружная кладка облицовочного кирпича; 4 – железобетонная плита перекрытия; 5 – прокладка; 6 – термический вкладыш (перфорация); $\delta_{ут}$ – толщина слоя тепловой изоляции; $\delta_о$ – толщина ограждающей конструкции; $\delta_{кп}$ – толщина слоя кирпичной кладки

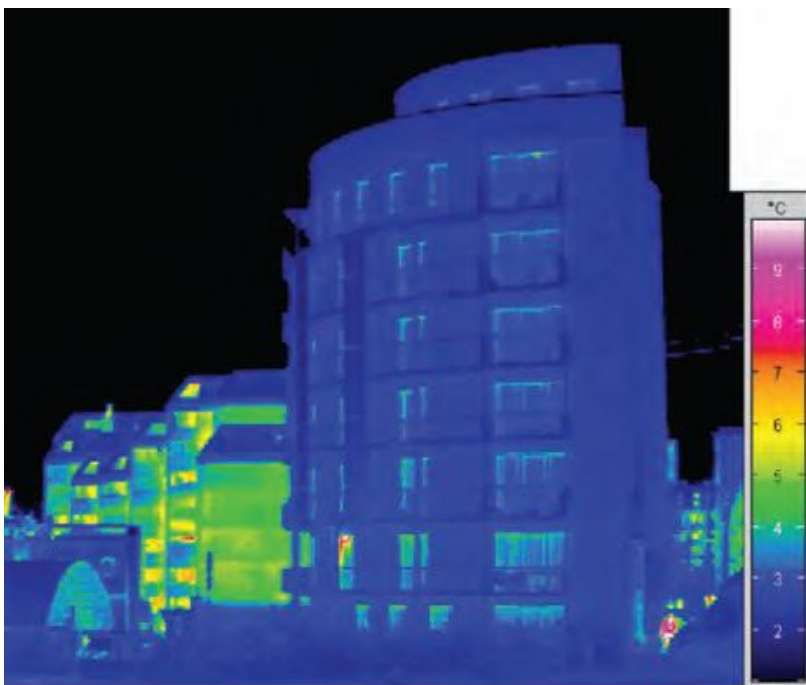


Рис. 1.33. Внешний вид и термограмма наружного фасада шести этажного пассивного многоквартирного жилого дома (Гамбург, Германия) [41]

При повышении теплотехнической однородности ограждающих конструкций также важно соблюдать требования к их воздухопроницаемости.

Применение конструктивных слоев с высокими значениями приведенного сопротивления теплопередаче, как правило, приводит к повышению воздухопроницаемости ограждающих конструкций в целом. Достаточно герметичными являются кирпичные стены, при условии их покрытия сплошной внутренней штукатуркой, выполненной без разрывов, а также деревянные конструкции, при наличии в них ветрозащитных пленок и мембран. Средняя кратность воздухообмена через все наружные ограждающие конструкции пассивных домов при перепаде давления на них 50 Па должна быть не более $n_{50} = 0,3 \dots 0,5 \text{ ч}^{-1}$.

Контроль над герметичностью ограждающих конструкций пассивного дома осуществляется согласно методике [7] тестом давлением.

1.6. Контрольные вопросы для самостоятельной работы

1. Что такое пассивный дом, чем отличаются принципы его проектирования от домов современного типового строительства?

2. Перечислите основные требования к пассивным домам, которые должны выдерживаться при их проектировании.

3. В чем особенность конструирования теплового контура пассивных домов, и какие правила его проектирования следует соблюдать?

4. Назовите основные требования, предъявляемые к светопрозрачным наружным ограждающим конструкциям пассивных домов?

5. Перечислите и дайте определения основным величинам, характеризующим теплотехническую однородность ограждающих конструкций.

6. Что такое коэффициент теплотехнической однородности ограждения?

7. Дайте определение коэффициенту компактности здания.

8. Каковы основные направления повышения приведенного сопротивления теплопередаче при утеплении наружных ограждающих конструкций?

Глава 2. ОТОПЛЕНИЕ ПАССИВНЫХ ДОМОВ

2.1. Общие принципы конструирования

Система отопления – это совокупность конструктивных элементов со связями между ними, предназначенных для получения, переноса и передачи теплоты в обогреваемые помещения здания [30].

В пассивных домах, в отличие от зданий, обслуживаемых системами центрального теплоснабжения, имеется возможность поддерживать комфортную температуру в помещениях круглогодично, а не только в течение отопительного периода. Система отопления должна обеспечивать следующие температуры внутреннего воздуха t_v в помещениях: жилые комнаты – 20...23 °С; кухни, туалеты – 19...21 °С; ванны и совмещенные санузлы – 19...20 °С; коридоры – 18...20 °С; кладовые, вестибюли и лестничные клетки – 16...18 °С.

Для распределения теплоносителя, как правило, применяется лучевая двухтрубная схема системы отопления с центрально расположенной распределительной гребенкой. Система может быть конвекторной, радиаторной, напольной, плинтусной, электрической или воздушной. Отопительные приборы в обязательном порядке оборудуются автоматическими терморегуляторами со стационарным или выносным датчиком температуры. В виду высокого сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций и близкой к единице их теплотехнической однородности рекомендации к расположению отопительных приборов по отношению к оконным проемам, а также встроенных нагревательных элементов в конструкции стен на современные пассивные жилые дома не распространяются.

Трубопроводы систем отопления в пассивных домах изготавливаются из полимерных и металлополимерных труб, прокладываемых в конструкции пола и стен без уклона. Температура теплоносителя в трубопроводах системы отопления не должна превышать 90 °С, поверхности отопительных приборов – не выше 70 °С. Рекомендуемый температурный график в системах отопления индивидуальных жилых домов составляет 80...60 °С. Расчетный срок эксплуатации трубопроводов должен быть менее 25 лет [33, 36].

Удаление воздуха из системы отопления проводится через воздухоотводчики, расположенные в верхних точках системы, а также через краны Маевского на отопительных приборах. Для опорожнения контуров системы устанавливается запорно-спускная арматура, для удаления воды из скрыто проложенных в конструкции пола контуров применяют продувку сжатым воздухом.

При расчете системы отопления следует учитывать потери теплоты через ограждения $Q_{огр}$, Вт, расход теплоты на нагрев инфильтрующегося $Q_{инф}$, Вт, либо вентиляционного $Q_{вент}$, Вт, воздуха, теплопотери на нагрев оборудования и материалов $Q_{мат}$, Вт, и теплопритоки от электрических приборов, систем освещения, людей и иных источников теплоты $Q_{быт}$, Вт.

Требуемая мощность отопительных приборов составляет:

$$Q_{тр} = Q_{огр} + Q_{вент} + Q_{инф} + Q_{мат} - Q_{быт} - 0,9 \sum l_i k_{пол} q_i, \quad (2.1)$$

где l_i – длина не теплоизолированного проходящего через помещение трубопровода системы отопления i -го диаметра, м; q_i – удельный тепловой поток от открыто проложенных труб (табл. 2.1 [10]), Вт/м; $k_{пол}$ – коэффициент учитывающий расположение трубопровода (табл. 2.2).

При расчете требуемой мощности отопительных приборов пассивных домов формула (2.1) примет вид:

$$Q_{тр} = 1,05(Q_{огр} - 0,9 \sum l_i k_{пол} q_i). \quad (2.2)$$

В пассивных домах применяют механические системы вентиляции с предварительным нагревом наружного воздуха, по этой причине подогревать воздух системой отопления не требуется $Q_{вент} = 0$.

Наружные ограждающие конструкции пассивных жилых домов обладают пониженной воздухопроницаемостью, что позволяет не учитывать $Q_{инф}$. Составляющие $Q_{мат}$ и $Q_{быт}$ представляют собой незначительную сложнопрогнозируемую величину, а их наличие регулируется применением радиаторных терморегуляторов. Коэффициент 1,05 предназначен для учета неучтенных потери теплоты на внос оборудования и материалов.

При подборе мощности отопительных приборов следует учитывать, что тепловой поток $Q_{пр}$, Вт, отопительного прибора следует принимать не меньше чем на 5 % или 60 Вт чем $Q_{тр}$, но не более 15 % запаса.

Таблица 2.1

Удельный тепловой поток от открыто проложенных
вертикальных полипропиленовых труб PPR PN 20

DN, мм	θ , °C	Удельный тепловой поток открыто проложенных вертикальных полипропиленовых труб q_i , Вт/м									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	30	8,2	8,6	9,1	9,5	9,93	10,4	11,8	11,3	11,7	12,1
25		10,23	10,8	11,3	11,8	12,4	12,9	13,5	13,9	14,4	14,9
32		13,1	13,8	14,5	15,2	15,9	16,7	17,4	18,1	18,7	19,4
20	40	12,5	13,1	13,7	14,5	15,1	15,8	16,7	17,6	18,4	19,2
25		15,6	16,5	17,4	18,3	19,3	20,3	21,2	22,1	23,1	24,0
32		20,0	21,2	22,4	23,6	24,8	26,0	27,2	28,4	29,6	30,8
20	50	20,0	20,5	21,0	21,5	22,0	22,5	23,0	23,0	24,2	24,8
25		25,0	25,7	26,4	27,1	27,8	28,5	29,2	29,9	30,6	31,2
32		32,1	32,9	33,8	34,7	35,6	36,5	37,4	38,2	39,1	40,0
20	60	25,5	26,6	27,7	28,8	29,9	31,0	32,2	33,3	34,5	35,6
25		31,9	33,3	34,7	35,1	36,5	38,0	39,5	41,2	42,8	44,5
32		40,8	42,6	44,4	46,2	48,0	49,8	51,6	53,5	55,4	57,3
20	70	37,0	37,7	38,5	39,2	39,9	40,7	41,5	42,2	42,9	43,7
25		46,3	47,2	48,1	49,0	49,9	50,8	51,7	52,6	53,5	54,5
32		59,2	60,4	61,6	62,8	64,0	65,2	66,4	67,6	68,8	70,0
20	80	44,5	45,1	45,7	46,4	47,1	47,9	48,7	49,5	50,3	51,2
25		55,6	56,5	57,4	58,6	59,5	60,4	61,3	62,3	63,2	64,1
32		71,2	72,4	73,6	74,8	76,0	77,2	78,4	78,6	80,8	82,0
20	90	52,0	52,6	53,2	53,8	54,4	55,0	55,4	56,0	56,6	57,2
25		65,0	65,9	66,8	67,7	68,6	69,5	70,4	71,3	72,2	73,1
32		83,2	84,4	85,6	86,8	88,0	89,2	90,4	91,6	92,8	94,0

Таблица 2.2

Коэффициент учета расположения полипропиленовых труб PPR PN 20

Тип трубопроводов по его расположению	$k_{поли}$
Вертикальные, открыто проложенные	1,00
Вертикальные, экранированные	0,75
Вертикальные, теплоизолированные, открыто проложенные	0,70
Горизонтальные, открыто проложенные	1,28
Горизонтальные, проложенные в глухой борозде	0,64
Горизонтальные, проложенные в вентилируемой борозде	1,15
Горизонтальные, теплоизолированные, открыто проложенные	0,90
Вертикальные и горизонтальные, замоноличенные во внутренние перегородки	2,50
Вертикальные и горизонтальные, замоноличенные в наружные теплоизолированные ограждения с теплопроводностью основания $\lambda_0 \geq 1,8$ Вт/(м·°C)	2,00

2.2. Конвекторное и радиаторное отопление

Принципиальная схема лучевой системы конвекторного и радиаторного отопления приведена на рис. 2.1.

В зависимости от архитектурно-дизайнерских решений, а также суммарных потерь теплоты в помещениях в качестве отопительных приборов могут быть использованы панельные 1 и секционные радиаторы 2, конвекторы 3, в том числе внутривольные 4, а также дизайн радиаторы 5. Каждый отопительный прибор оборудуется запорно-регулирующим (либо запорным) клапаном 8 и радиаторным терморегулятором 7. В двухтрубных системах отопления применяются радиаторные терморегуляторы с большим гидравлическим сопротивлением (более 5...10 кПа). Для выпуска воздуха из системы отопительные приборы оборудуются воздухоотводчиками 6.

Терморегуляторы (рис. 2.2 [40]) состоят из двух частей: регулирующего клапана и термостатической головки. Внутри термостатической головки располагается гофрированная емкость (сильфон), которая связана через шток с золотником регулирующего клапана. При снижении температуры окружающей среды газ, заполняющий сильфон, конденсируется изменяя давление и объем газообразной составляющей. Сильфон растягивается, перемещая золотник и шток в сторону открытия. При повышении температуры происходит обратный процесс. Вместо термостатической головки может применяться выносной датчик температуры 9, соединенный с регулирующим клапаном с помощью капиллярной трубки 10.

Терморегулятор является устройством прямого действия, предназначенным для поддержания комфортной температуры внутреннего воздуха и эффективного использования бытовых тепловыделений и поступлений теплоты солнечной радиации через светопрозрачные проемы.

Запорно-регулирующий клапан (рис. 2.3 [40]) нужен для отключения отопительного прибора, а также для гидравлической регулировки системы. Радиаторный терморегулятор также может использоваться для гидравлического регулирования системы отопления, в этом случае вместе с ним на обвязке отопительного прибора применяют запорный клапан.

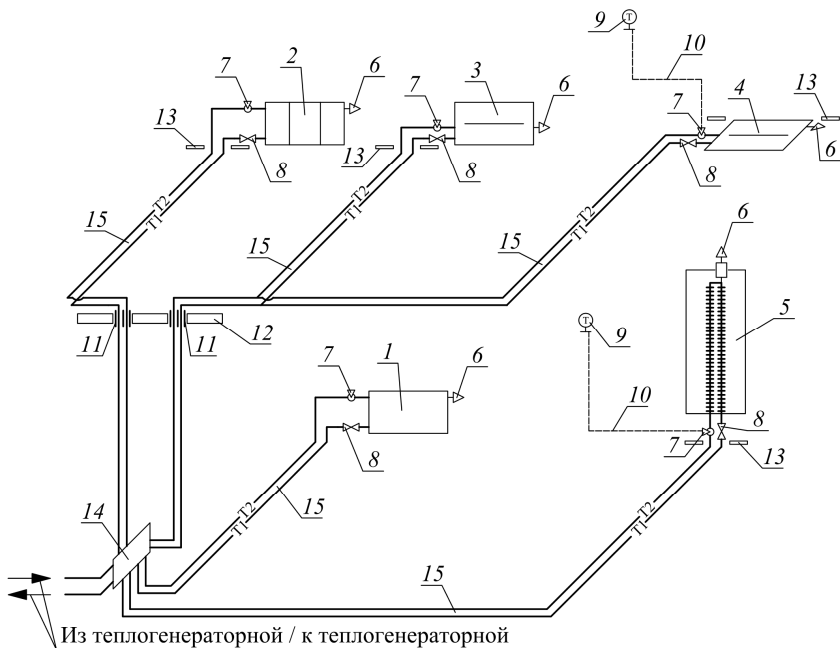


Рис 2.1. Принципиальная схема системы конвекторного и радиаторного отопления: 1 – панельный радиатор; 2 – секционный радиатор; 3 – конвектор «Универсал»; 4 – внутрипольный конвектор; 5 – дизайн радиатор; 6 – воздухоотводчик; 7 – радиаторный терморегулятор; 8 – запорно-регулирующий вентиль; 9 – выносной датчик температуры; 10 – капиллярная трубка; 11 – гильзы из стальных труб; 12 – межэтажное перекрытие; 13 – уровень чистого пола; 14 – штанговый распределитель; 15 – полипропиленовые трубопроводы

В виду незначительности тепловой нагрузки на контура системы отопления пассивного дома (не более 5...10 кВт), для регулирования подачи тепловой энергии через каждый контур может использоваться штанговый распределитель (рис. 2.4 [23]), предназначенный для автоматического регулирования температуры помещений в системах напольного отопления.

Штанговый распределитель является готовым заводским изделием, состоящим из подающей 7 и обратной гребенки 8. На подающей гребенке устанавливаются термостатические буксы 2, на которые крепятся термостатические головки 6 с выносным датчиком температуры. Датчик температуры устанавливается в обслуживаемом помещении. Термостатическая букса совместно с термостатической головкой является аналогом термостатического клапана.

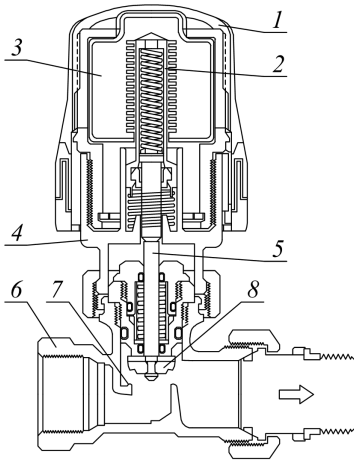


Рис. 2.2. Схема радиаторного терморегулятора: 1 – рукоятка для настройки температуры; 2 – возвратная пружина; 3 – сифон; 4 – корпус термоголовки; 5 – нажимной шток; 6 – корпус вентиля; 7 – седло клапана; 8 – рабочий конус клапана

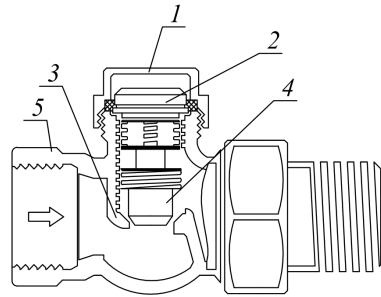


Рис. 2.3. Схема запорно-регулирующего клапана: 1 – защитный колпачек; 2 – винт предварительной настройки; 3 – седло клапана; 4 – рабочий конус клапана; 5 – седло клапана

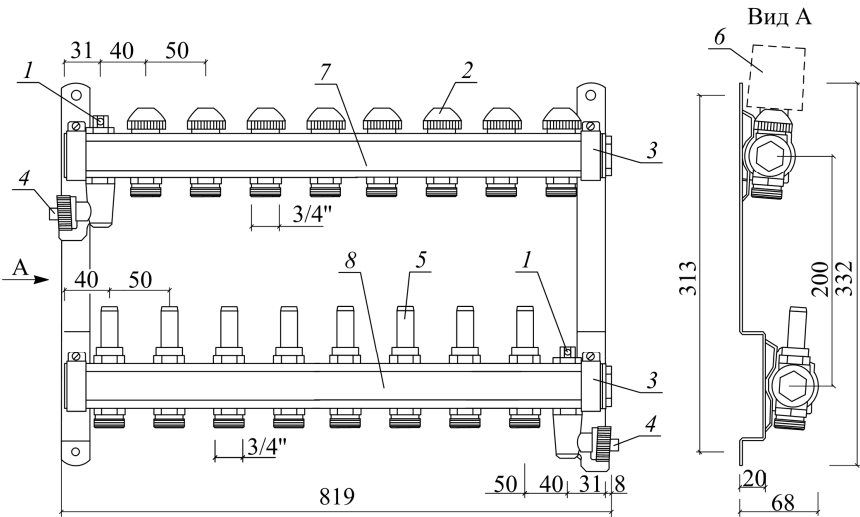


Рис. 2.4. Штанговый распределитель фирмы Herz – Armaturen: 1 – воздухоотводчики; 2 – термостатическая бокса; 3 – заглушки; 4 – спускники; 5 – топметр-регулятор; 6 – термостатическая головка с выносным датчиком температуры; 7 – подающая гребенка; 8 – обратная гребенка

При отклонении температуры воздуха от оптимального значения положение штока термостатической буксы меняется либо в сторону открытия, либо закрытия. Для удаления воздуха и слива теплоносителя из распределительной гребенки предусмотрены воздухоотводчики 1 и спускники 4. Штанговые распределители могут изготавливаться с числом отводов от 3 до 16.

Топметр-регулятор – это расходомер с функцией регулирования расхода проходящей через него воды. Топметры-регуляторы изготавливаются для двух диапазонов расходов 0...2,5 л/мин и 0...6 л/мин.

Максимальная температура перемещаемой среды составляет 110 °С, максимальное рабочее давление 10 бар. Крепление распределителей осуществляется непосредственно на стену или в распределительный шкаф с помощью специальных держателей. Условный диаметр d_y , мм, распределительных гребенок составляет 25 мм, а их ответвлений – 20 мм.

Расчетное число секций радиатора $N_{\text{секц}}$, шт., с достаточной точностью определяется по следующей формуле [16]:

$$N_{\text{секц}} = \frac{Q_{\text{тр}} \beta}{q_{\text{ном}} \left(\frac{\theta}{70} \right)^{1+n} \left(\frac{G_{\text{пр}}}{360} \right)^p}, \quad (2.3)$$

где β – коэффициент, учитывающий способ установки прибора; $q_{\text{ном}}$ – номинальная плотность теплового потока одной секции отопительного прибора, Вт/шт.; θ – температурный напор, °С; $G_{\text{пр}}$ – расчетный расход теплоносителя через прибор, кг/ч; n, p – экспериментальные числовые показатели, учитывающие изменение коэффициента теплоотдачи прибора при действительных значениях средней разности температур и расхода теплоносителя, а также тип и схему присоединения прибора к трубам системы отопления.

Температурный напор отопительного прибора θ , °С, равен

$$\theta = \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}}{2} - t_{\text{в}}, \quad (2.4)$$

где $t_{\text{вх}}$, $t_{\text{вых}}$ – температуры теплоносителя на входе и выходе из прибора соответственно, °С; $t_{\text{в}}$ – температура внутреннего воздуха, °С.

Расход теплоносителя через отопительный прибор $G_{\text{пр}}$, кг/ч, определяется по следующей зависимости:

$$G_{\text{пр}} = \frac{3,6Q_{\text{гр}}}{c(t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}})}, \quad (2.5)$$

где c – удельная теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг·°С).

Типоразмер панельных радиаторов и конвекторов принимают в зависимости от величины его номинального теплового потока $Q_{\text{ном}}$, Вт, из условия:

$$Q_{\text{ном}} \geq \frac{Q_{\text{гр}}\beta}{\left(\frac{\theta}{70}\right)^{1+n} \left(\frac{G_{\text{пр}}}{360}\right)^p}. \quad (2.6)$$

Значения n и p , а также иных коэффициентов приводятся в рекомендациях по подбору конкретных типов отопительных приборов [25, 27, 43, 44].

Техническое описание, а также методика подбора типоразмера современных внутривольных медно-алюминиевых конвекторов с естественной и принудительной конвекцией подробно изложены в [26].

Величина фактического теплового потока дизайн радиатора (рис. 2.5 [21]) индивидуального изготовления определяется по запросу у производителя, а при отсутствии данных может быть рассчитана по формуле [44]:

$$Q_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{ном}}}{70} \frac{t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}}{\ln \frac{t_{\text{вх}} - t_{\text{в}}}{t_{\text{вых}} - t_{\text{в}}}}. \quad (2.7)$$



Рис. 2.5. Дизайн радиаторы ART Radiator: *a* – Quadro-10; *б* – Schema loop; *в* – Flower Power

2.3. Напольное отопление

Напольное отопление является частным случаем панельного отопления, конвективной поверхностью нагрева которого является пол.

Основным ограничением по применению напольного отопления является максимальная температура поверхности пола $t_{\text{пол}}$, °С, в жилых зданиях, не более 35 °С [36]. Производителями систем напольного отопления рекомендуется за расчетную температуру поверхности пола брать величину $t_{\text{пол}} = 25 \dots 29$ °С. Максимальную температуру 35 °С рекомендуется принимать только в краевых зонах – не предназначенных для длительного пребывания там людей. При этом также следует учитывать, что максимальный перепад между температурой поверхности пола и внутренним воздухом не должен превышать $t_{\text{пол}} - t_{\text{в}} = 9$ °С, а для краевых зон – 15 °С.

Укладка трубопроводов в напольном отоплении может осуществляться сухим и мокрым методами [21]. Сухая укладка (рис. 2.6) заключается в применении системной мультизажимной плиты, которая выполняется из теплоизоляционного материала. Плита покрыта алюминиевой фольгой толщиной 70 мкм. Трубы вдавливаются в мультизажимную плиту, закрепляются и образуют ровную, подходящую для нанесения последующих слоев поверхность.

Мокрая укладка делится на укладку с использованием пружинных зажимов (рис. 2.7) и опорной шины (рис. 2.8). На поверхность несущего перекрытия укладывается слой тепловой изоляции (теплоизоляционные маты либо раскладные плиты). Трубопроводы крепятся с помощью пружинных зажимов на проволочной сетке, либо опорной шины и в последующем замоноличиваются образуя ровную поверхность для нанесения напольного покрытия.

Существуют также современные решения по применению матов с бобышками [21], для укладки труб.

Укладка труб может проводиться бифилярным и меандровым способами (рис. 2.9). Правильная укладка позволяет максимально равномерно распределить отдачу тепловой энергии от поверхности полов. Также как и в радиаторном отоплении, контура собираются в штанговый распределитель.

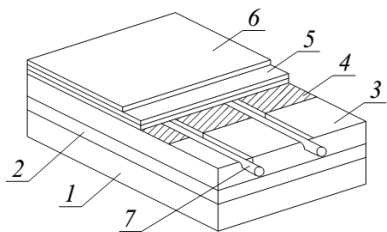


Рис. 2.6. Сухая укладка: 1 – несущее покрытие; 2 – тепловая изоляция; 3 – мультизажимная плита; 4 – покрытие для распределения тепла; 5 – настил для распределения нагрузки; 6 – напольное покрытие; 7 – труба

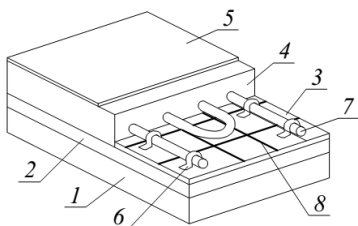


Рис. 2.7. Мокрая укладка с использованием пружинных зажимов: 1 – несущее перекрытие; 2 – тепловая изоляция; 3 – краевая пленка; 4 – монолитный пол; 5 – напольное покрытие; 6 – пружинный зажим; 7 – труба; 8 – проволочная решетка

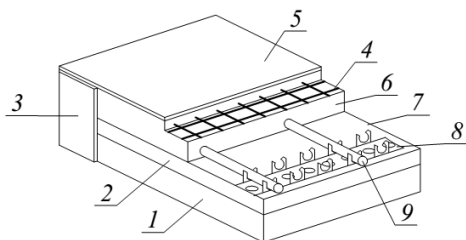


Рис. 2.8. Мокрая укладка с использованием опорной шины: 1 – несущее перекрытие; 2 – тепловая изоляция; 3 – краевая пленка; 4 – проволочная решетка; 5 – напольное покрытие; 6 – монолитный пол; 7 – полиэтиленовая пленка; 8 – фиксирующая шина; 9 – труба

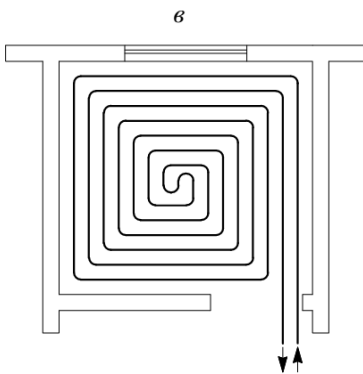
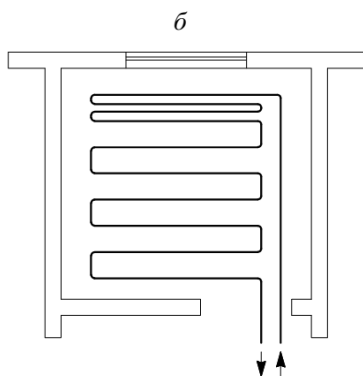
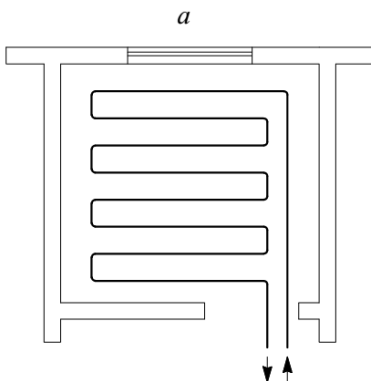


Рис. 2.9. Виды укладки труб: а – меандровое расположение; б – то же с краевой зоной; в – бифилярная укладка

Требуемая мощность напольного отопления $Q_{\text{тр}}$ определяется без учета потерь теплоты через пол на котором размещается напольное отопление.

Мощность напольного отопления $Q_{\text{пол}}$ Вт, равна

$$Q_{\text{пол}} = q_{\text{пол}} A_{\text{пол}}, \quad (2.8)$$

где $A_{\text{пол}}$ – площадь пола, занятая напольным отоплением, м^2 .

Плотность теплового потока $q_{\text{пол}}$ $\text{Вт}/\text{м}^2$, зависит от материала покрытия пола, шага укладки труб и избыточной температуры $t_{\text{изб}}$, $^{\circ}\text{C}$, и определяется по номограммам заводов изготовителей (рис. 2.10 [19]).

Избыточная температура теплоносителя определяется по формуле:

$$t_{\text{изб}} = t_{\text{вх}} - t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}}{2}. \quad (2.9)$$

Температура теплоносителя на входе в трубопроводы системы напольного отопления может составлять $t_{\text{вх}} = 40 \dots 55$ $^{\circ}\text{C}$. Перепад температур на входе и выходе каждого контура составляет $t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}} = 5 \dots 10$ $^{\circ}\text{C}$.

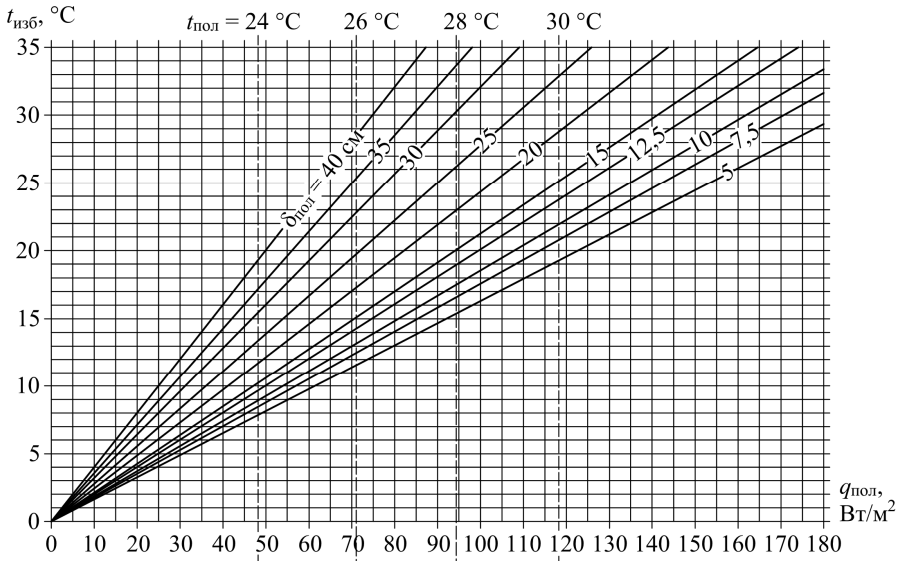


Рис. 2.10. Номограмма для определения плотности теплового потока и температуры поверхности пола в зависимости от шага укладки труб $\phi 16 \dots 20$ мм и материала настила пола – керамика, глазурь, камень

2.4. Плинтусное отопление

Контур плинтусного отопления представляет собой нагревательный элемент, состоящий из двух медных труб с латунным оребрением (пластинами), закрытый алюминиевой планкой. Регулирование контуров системы плинтусного отопления осуществляется по показаниям термостата.

Перепад температуры в плинтусных отопительных приборах составляет $t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Мощность 1 погонного метра плинтусной системы отопления q , Вт/м, приведена в табл. 2.3 [29]. Максимальная длина греющего элемента одного контура не должна превышать 12,5 м. В качестве материала трубопроводов, прокладываемых в конструкции пола либо плинтусов особой конструкции, применяется полиэтиленовая труба РЕ-Хс $\phi 13 \times 1,5$. Труба помещается в защитную гофрированную трубку $\phi 20$ мм. Контура плинтусного отопления подводятся к распределительному коллектору рассчитанному на 2...10 контуров.

Нагревательным элементом плинтусного отопления может также служить встроенный теплоэлектронагреватель, который работает от домовой электрической сети, теплоотдача 1 погонного метра приборов не превышает 200 Вт/м.

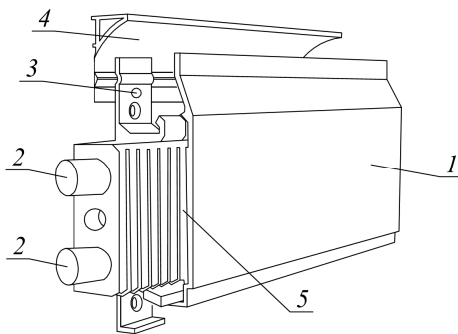


Рис. 2.11. Плинтусный отопительный прибор: 1 – плинтус; 2 – полиэтиленовая труба РЕ-Хс $\phi 13 \times 1,5$; 3 – крепление; 4 – отражатель; 5 – латунные пластины

Таблица 2.3

Мощность 1 погонного метра плинтусной системы отопления

$t_{\text{вх}}, \text{ }^\circ\text{C}$	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
$q, \text{ Вт/м}$	88	105	132	149	178	197	226	246	277	294

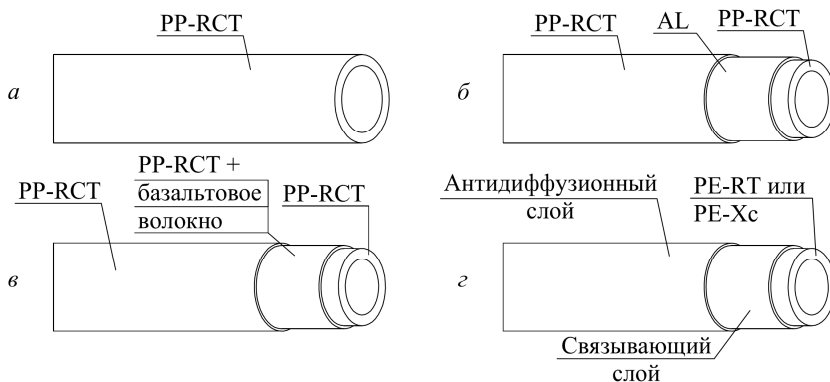
2.5. Трубопроводы систем отопления

Наиболее распространенными материалами трубопроводов систем отопления пассивных домов являются трубы: цельнопластиковые; трехслойные с перфорированной алюминиевой фольгой или с базальтовым волокном; из сшитого полиэтилена с антидиффузионным слоем [21, 28].

Цельнопластиковые трубы (рис. 2.12, *а*) изготавливают из термостабилизированного полипропилена PP-RCT. Данные трубы имеют расчетный срок эксплуатации до 50 лет при температуре теплоносителя до 70 °С.

Трехслойные трубы (рис. 2.12, *б*, *в*) состоят из двух слоев PP-RCT между которыми находится, либо слой перфорированной алюминиевой фольги, либо базальтового волокна, что позволяет применять их в системах отопления с температурой теплоносителя до 80...95 °С.

Трубы из сшитого полиэтилена (рис. 2.12, *г*) производят путем пероксидной (PE-Xa), силанольной (PE-Xb) и электронной (PE-Xc) сшивки. Они покрываются антидиффузионным слоем для защиты трубопроводов от попадания в них кислорода. В качестве материала труб также применяют полиэтилен повышенной термостойкости PE-RT. Данные трубы широко применяются в системах напольного и плитного отопления.



2.6. Электрическое отопление

В качестве отопительных приборов систем электрического отопления применяют электроконвекторы, а также напольные и плинтусные теплоэлектронагреватели, которые могут работать от домашней сети электроснабжения, напряжением 220 В. Электрические отопительные приборы оборудуются электронными термостатами для регулирования температуры воздуха в помещении с погрешностью $\pm 0,1$ °С.

Электроконвекторы (рис. 2.13) изготавливаются из оцинкованной стали для защиты от коррозии и могут устанавливаться во влажных помещениях. Приборы современной конструкции не требуют защитного заземления [29]. Типоразмерный ряд предусматривает следующие стандартные мощности электроконвекторов: 250, 500, 750, 1000, 1500 и 2000 Вт. К наиболее известным фирмам производителям электроконвекторов следует отнести Frico, NeoClima, Ensto, Ballu, Royal Clima, Евромаш и др.

Напольный теплоэлектронагреватель (рис. 2.14) представляет собой изогнутый нагревательный кабель, проложенный в конструкции пола. Кабель присоединяется к терморегулятору, который контролирует температуру воздуха в помещении и температуру пола. Сведения о тепловой мощности 1 м^2 поверхности пола q , Вт/м², с теплоэлектронагревателями фирмы Ensto в зависимости от типа кабеля и расстояния между ними приведены в табл. 2.4. Рекомендуемая температура поверхности пола зависит от материала верхнего слоя и составляет: 23...27 °С – для дерева и ламината; 26...28 °С – для линолеума, керамической плитки и бетона. Фактическую температуру пола в зависимости от материала отделочного слоя следует уточнять у производителя. Доля тепловой энергии, бесполезно теряемая через низ пола и не поступающая в помещение, в зависимости от толщины δ , мм, эффективной тепловой изоляции ориентировочно составляет: 30 % – при отсутствии тепловой изоляции; 17 % – при $\delta = 10$ мм; 10 % – при $\delta = 30...40$ мм.

Плинтусные теплоэлектронагреватели изготавливаются с монтажной длиной 500, 1000, 1500 и 2000 мм. Мощность 1 м плинтуса «Орион» составля-

ет $q = 120$ Вт/м [39]. Подключение прибора к электрической сети осуществляется через терморегулятор, который необходимо размещать на стене, на расстоянии 1,5 м от поверхности пола.

Подключение электрических отопительных приборов должно обязательно осуществляться специалистами по электрической безопасности.



Рис. 2.13. Электроконвектор фирмы Ensto



Рис. 2.14. Напольный термоэлектронагреватель фирмы Ensto

Таблица 2.4

Тепловая мощность 1 м^2 поверхности пола q , Вт/м², оборудованного термоэлектронагревателями фирмы Ensto

q , Вт/м ²	Расстояние между соседними кабелями, см, для кабеля:		
	Tassu	Tassus	ThinKit
60	33	17	17
70	29	14	14
80	25	13	13
90	22	11	11
100	20	10	10
110	18	9	9
120	17	-	8,5
130	15	-	7,5
140	14	-	7
150	13	-	6,5

2.7. Воздушное отопление

Система воздушного отопления пассивного дома (рис. 2.15 [33]) состоит из воздухозаборной решетки 2, приточно-вытяжной установки 1, вытяжной установки 10, сети воздуховодов, приточных и вытяжных устройств. При организации воздушного отопления возможна как рециркуляция 8, так и рекуперация 7 вытяжного воздуха. Воздух, удаляемый из помещений кухонь и санузлов, не подлежит рециркуляции и удаляется в атмосферу с помощью вытяжной установки. Эффективность утилизации теплоты вытяжного воздуха описывается коэффициентом эффективности рекуперации $k_{эф}$, %, равным

$$k_{эф} = \frac{t_{пр} - t_{н}}{t_{в} - t_{н}} 100, \quad (2.11)$$

где $t_{пр}$ – температура приточной струи, °С.

Эффективность рекуперации может быть также вычислена по энтальпии

$$k_{эф} = \frac{i_{пр} - i_{н}}{i_{в} - i_{н}} 100, \quad (2.12)$$

где $i_{пр}$, $i_{н}$, $i_{в}$ – энтальпия, соответственно приточного, наружного и внутреннего воздуха, проходящего через теплоутилизатор, кДж/кг.

Современные приточно-вытяжные установки могут оборудоваться роторными и противоточными рекуператорами с коэффициентом эффективности утилизации теплоты $k_{эф}$ до 80...95 %.

Расход забираемого с улицы воздуха L принимается не менее требуемого по санитарным нормам и согласно СП [33, 35, 36].

Расход воздуха подаваемый в помещения системой воздушного отопления $L_{от}$, м³/ч, рассчитывается по формуле:

$$L_{от} = \frac{3,6Q_{пом}}{c_{в}\rho_{в}(t_{пр} - t_{в})}. \quad (2.13)$$

где $Q_{пом}$ – расчетные потери теплоты в помещении, Вт; $\rho_{в}$ – плотность внутреннего воздуха, кг/м³; $c_{в}$ – теплоемкость внутреннего воздуха, кДж/(кг·°С); $t_{пр}$ – температура приточной струи, °С.

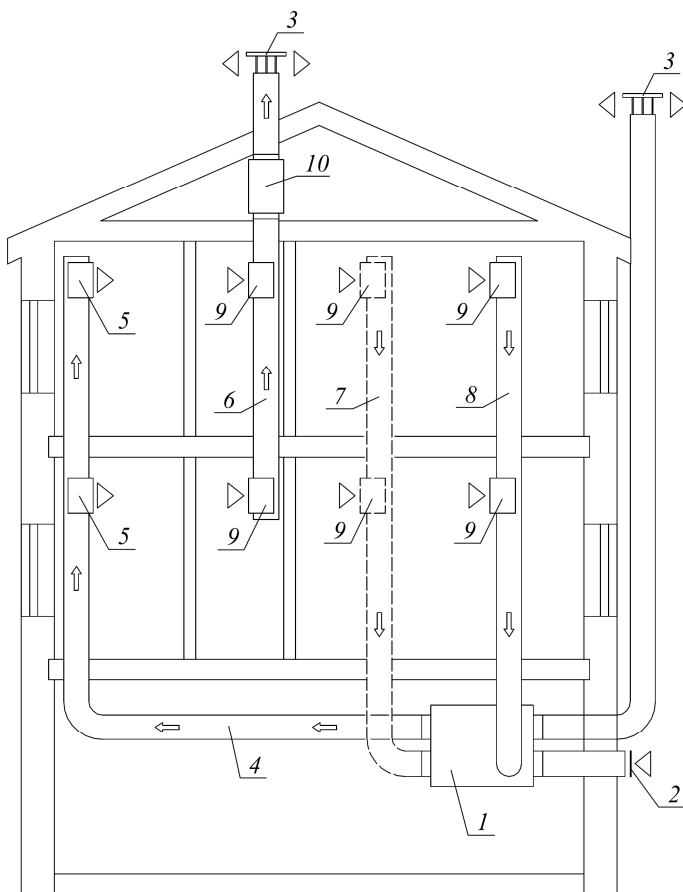


Рис. 2.15. Схема воздушного отопления: 1 – приточно-вытяжная установка; 2 – воздухозаборная решетка; 3 – зонт-колпак; 4 – приточный воздуховод; 5 – приточная решетка; 6 – вытяжной воздуховод; 7 – вентканал к рекуператору; 8 – рециркуляционный воздуховод; 9 – вытяжные решетки; 10 – вытяжная установка

Основным недостатком воздушного отопления является невозможность без комнатных доводчиков температуры обеспечить комфортную температуру в помещениях, а также значительное влияние на температуру внутреннего воздуха и комфортность параметров микроклимата бытовых, биологических тепловыделений и поступлений солнечной радиации, наличие которой требует устройства на окнах регулируемых жалюзийных решеток.

2.8. Пассивные системы солнечного отопления

Пассивные системы солнечного отопления представляют собой гелиосистемы, в которых теплота солнечной радиации поглощается и аккумулируется строительными элементами, а распределение её по помещению происходит естественным путем. Пассивные системы отопления способны обеспечивать до 60 % от отопительной нагрузки здания.

Пассивные системы солнечного отопления подразделяются на открытые и закрыты. Работа открытых систем (рис. 2.16) заключается в попадании солнечных лучей в отапливаемые помещения через светопрозрачные проемы и нагреве строительных конструкций, которые являются приемниками и аккумуляторами тепловой энергии (гелионагревателями). В закрытых системах (рис. 2.17) аккумулятором теплоты является мощная ограждающая конструкция.

Примером открытой системы солнечного отопления может являться здание, все светопрозрачные конструкции которого ориентированы на юг, построенное Ф.У. Хатчинсоном в 1945 г. в США [1].

Наибольшее распространение получили закрытые системы, которые имеют более устойчивый тепловой режим и меньшую зависимость от солнечной инсоляции. Примером здания с закрытой пассивной системой отопления является школа, построенная А. Е. Морганом в Великобритании в 1961 г.

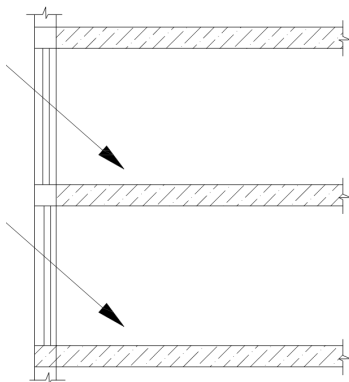


Рис. 2.16. Открытая система пассивного солнечного отопления

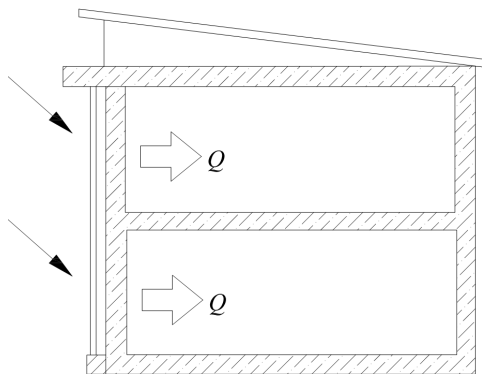


Рис. 2.17. Закрытая система пассивного солнечного отопления: Q – притоки теплоты от нагретых строительных конструкций

Недостатками данной системы являются неравномерность нагрева внутреннего воздуха (температура у нагретых строительных конструкций значительно выше, чем на удалении от них) и отсутствие возможности передачи теплого воздуха в другие помещения здания.

В настоящее время известны более совершенные конструкции закрытых систем пассивного солнечного отопления, позволяющие добиться лучшей равномерности нагрева внутреннего воздуха в помещении, например, системы Ф. Тромба – Д. Мишеля (рис. 2.18, 2.19, «солнечный дом») и Лефевра (рис. 2.20).

В системе «солнечный дом» обеспечивается циркуляция теплоносителя через пассивный гелионагреватель, которым является южная бетонная стена, отделенная от наружного воздуха двойным или тройным остеклен. В нижней и верхней частях стены предусмотрены каналы для циркуляции теплоносителя (внутреннего воздуха помещения). Находящийся в воздушной прослойке между остеклением и теплоаккумулятором воздух нагревается в периоды инсоляции и поступает через верхние каналы в помещение. Нагретый воздух замещается внутренним воздухом с меньшей температурой.

Основными преимуществами данной конструкции являются более высокая равномерность нагрева внутреннего воздуха и возможность обеспечения его циркуляции в смежных помещениях.

При эксплуатации закрытых систем пассивного солнечного отопления с циркуляционной воздушной прослойкой установлено, что интенсивное движение воздуха у пола вблизи входных каналов негативно сказывается на здоровье жильцов. Для предотвращения этого применяются защитные экраны (рис. 2.4), представляющие собой аэродинамические затворы. Теплоприемный экран изготавливается из материалов с высокой теплопроводностью и степенью черноты $\varepsilon = 0,6 \dots 0,9$.

Поверхность теплоприемной части может быть выполнена как плоской, так и z-образной, шиповой и чешуйчатой формы. Выбор формы поверхности определяет температуру воздуха на выходе из гелионагревателя, а также его форму и размер, увеличивая полезные теплопритоки с единицы поверхности.

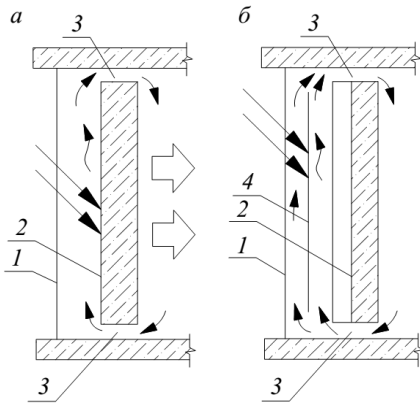


Рис. 2.18. Закрытая система пассивного солнечного отопления Тромба – Мишеля (а – без экрана; б – с экраном): 1 – остекление; 2 – стена здания; 3 – циркуляционные каналы; 4 – теплоприемный экран

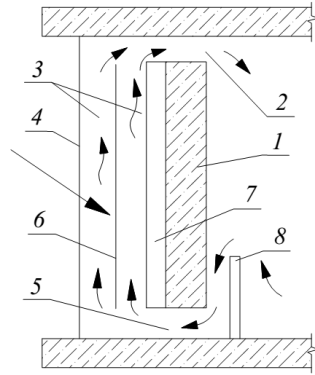


Рис. 2.19. Закрытая система солнечного отопления с аэродинамическим затвором: 1 – стена; 2, 5 – входной и выходной воздушные каналы; 3 – межэтажное пространство; 4 – стекло; 6 – теплоприемный экран; 7 – тепловая изоляция; 8 – аэродинамический зазор

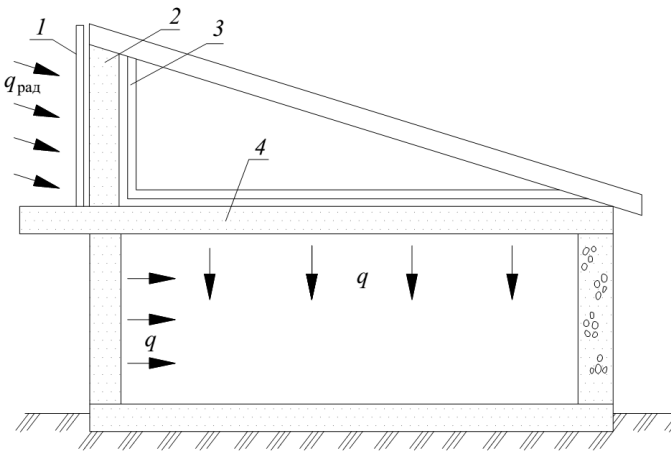


Рис. 2.20. Закрытая система пассивного солнечного отопления Лефевра: 1 – остекление; 2 – теплонакопительная стена; 3 – тепловая изоляция; 4 – теплоаккумулирующее покрытие; $q_{\text{рад}}$ – поступления теплоты солнечной радиации; q – теплопритоки от нагретых конструкций

Открытые системы являются менее эффективными, чем закрытые и в климатических районах с отрицательными температурами наружного воздуха в холодный период года практически не применяются.

В настоящее время известны разнообразные схемы пассивного солнечного отопления «солнечных домов». Ограждающие конструкции зданий такого типа являются аккумуляторами теплоты, некоторые схемы которых приведены на рис. 2.21. Данные схемы требуют снижения потерь теплоты аккумулятором в окружающую среду за счет оптимизации его расположения либо за счет применения эффективной тепловой изоляции. Циркуляция воздуха при расположении аккумулятора теплоты в грунте требует использования принудительной вентиляции (рис. 2.21, *а*). Устройство аккумулятора в конструкции стены более эффективно, однако для этого необходимы грамотные архитектурные решения, обеспечивающие его органичное включение в пространство здания.

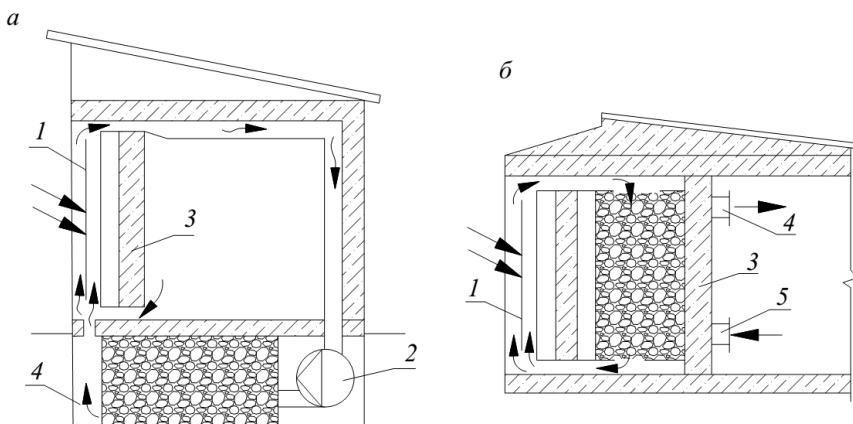


Рис. 2.21. Схемы расположения аккумуляторов в закрытых системах солнечного отопления (*а* – в грунте; *б* – в объеме здания): 1 – теплоприемный экран; 2 – вентилятор; 3 – стена; 4, 5 – входной и выходной каналы

Теплоаккумулирующая стена может представлять собой контейнеры, заполненные водой (рис. 2.22, *а*). Контейнеры могут располагаться в конструкции плоской кровли, данное техническое решение называется «Скайтер» (рис. 2.22, *б*). Термодиод (рис. 2.22, *в*) состоит из двух контейнеров с водой, разделенных слоем изоляции и соединенных сверху и снизу трубчатым каналом. Возможно совмещение пассивной системы солнечного отопления с каменной наброской и воздушным теплоносителем (термосифон), как показано на рис. 2.22, *г*.

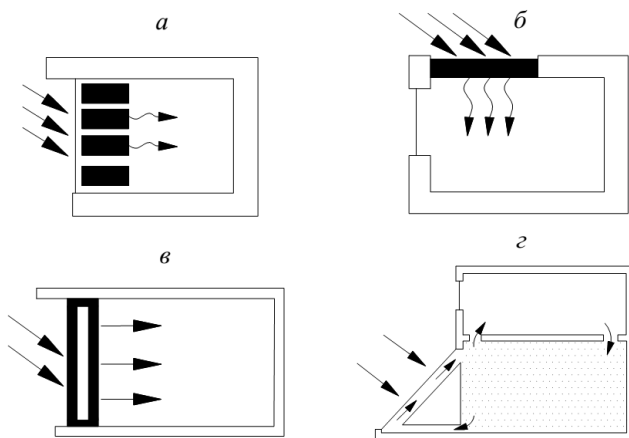


Рис. 2.22. Схемы пассивного солнечного отопления: *а* – водоналивная стена; *б* – водоналивная крыша; *в* – термодиод; *г* – термосифон

Инженерные методики расчета систем пассивного солнечного отопления приведены в [1, 2, 20].

2.9. Контрольные вопросы для самостоятельной работы.

1. В чем заключается принцип работы радиаторного терморегулятора?
2. Перечислите основные требования, предъявляемые к системе отопления пассивных домов?
3. По какой зависимости подбирается число секций радиатора?
4. Опишите сухой и мокрый способы укладки напольного отопления.
5. Изобразите меандровую и бифилярную укладку труб.
6. Как определить мощность напольного отопления?
7. Опишите конструкцию плинтусного отопительного прибора.
8. Перечислите типы электрических отопительных приборов.
9. По какой зависимости определяется коэффициент эффективности рекуперации утилизатора теплоты?
10. Опишите конструкцию воздушной системы отопления.
11. В чем заключается принцип работы открытых и закрытых систем пассивного солнечного отопления?

3. ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЯ ПАССИВНЫХ ДОМОВ

3.1. Общие принципы конструирования

Принципиальная схема инженерных систем обслуживающих помещения пассивных многоквартирных жилых домов представлена на рис. 3.1.

Применение наружных ограждающих конструкций с высокими значениями условного сопротивления теплопередаче и теплотехнической однородности ограждающих конструкций позволяет достигать температур внутренних поверхностей наружных ограждений близких к температуре внутреннего воздуха, что позволяет отказаться от расположения отопительных приборов под светопрозрачными конструкциями. В зависимости от величины отопительной нагрузки для нагрева вентиляционного воздуха и компенсации потерь теплоты через ограждающие конструкции достаточно либо только системы воздушного отопления, либо системы воздушного отопления, работающей совмещенно с системой напольного отопления (системой «теплый пол»). Система «теплый пол» работает только в наиболее холодные месяцы отопительного периода, когда теплоты солнечной радиации и вносимой с приточным воздухом недостаточно для компенсации потерь теплоты через ограждения.

Тепловая энергия на нужды системы отопления и горячего водоснабжения генерируется с помощью теплового насоса 1 и солнечного коллектора 2.

Теплоноситель, нагреваемый в солнечном коллекторе, циркулирует по трубопроводу 3 в направлении бойлера косвенного нагрева 4. В бойлере он отдает теплоту для подогрева холодной водопроводной воды, которая по трубопроводам системы ГВС 5 поступает к водоразборным приборам 6.

Отбранную у внешнего низкотемпературного источника теплоту тепловой насос за счет совершения механической работы компрессором передает высокотемпературному теплоносителю (50...60 °С), который через трубопровод 7 поступает в распределительную гребенку 8, в которой разделяется на отдельные контура 12 системы отопления «теплый пол». Теплоноситель, поступающий из теплового насоса, по трубопроводам 9 поступает к калориферу приточно-вытяжной установки системы вентиляции с секцией утилизации тепловой

энергии 10. По трубопроводу 11 теплоноситель от теплового насоса также может направляться в бойлер косвенного нагрева.

Наружный воздух подается в приточно-вытяжную установку либо напрямую, через воздухозаборную решетку 14 по воздуховоду 13, либо через грунтовый теплообменник по воздуховоду 15. Направление забора воздуха регулируется заслонками с электрическим приводом 16. Наружный воздух нагревается в пластинчатом теплообменнике приточной установки от вытяжного обработанного воздуха, удаляемого по воздуховодам 17 и выбрасываемого через зонтик-колпак 18, а затем догревается до расчетной температуры внутреннего воздуха в водяном или электрическом воздухонагревателе. Нагретый приточный воздух подается в помещения через приточные воздуховоды 19. При отсутствии водяной системы отопления «теплый пол» воздух в приточной струе нагревается на температуру большую, чем температура внутреннего воздуха.

Подача и удаление воздуха в помещения осуществляется через регулируемые приточные и вытяжные потолочные диффузоры 20. Скорость движения приточного и удаляемого воздуха и перепад температур приточного и внутреннего воздуха должен соответствовать действующим требованиям СП [36].

Электроснабжение пассивных домов осуществляется либо от фотоэлектрических батарей 21, либо с помощью ветроэлектрогенераторов, с возможностью дополнительного подключения к системам центрального электроснабжения или к дизельному генератору.

При электроснабжении от фотоэлектрических батарей, объединенных через соединительную коробку 22, вырабатываемый постоянный ток низкого напряжения преобразуется в переменный в инверторе 23 и поступает к электропотребляющим приборам 24. При малом потреблении электрической энергии её накапливают в блоке аккумуляторов 25. Для предотвращения губительных для аккумуляторных батарей перезаряда и переразряда в цепь включается специальный контроллер 26. В кровле, на которой установлены солнечный коллектор и фотоэлектрическая батарея, должен быть предусмотрен люк для периодического сервисного обслуживания.

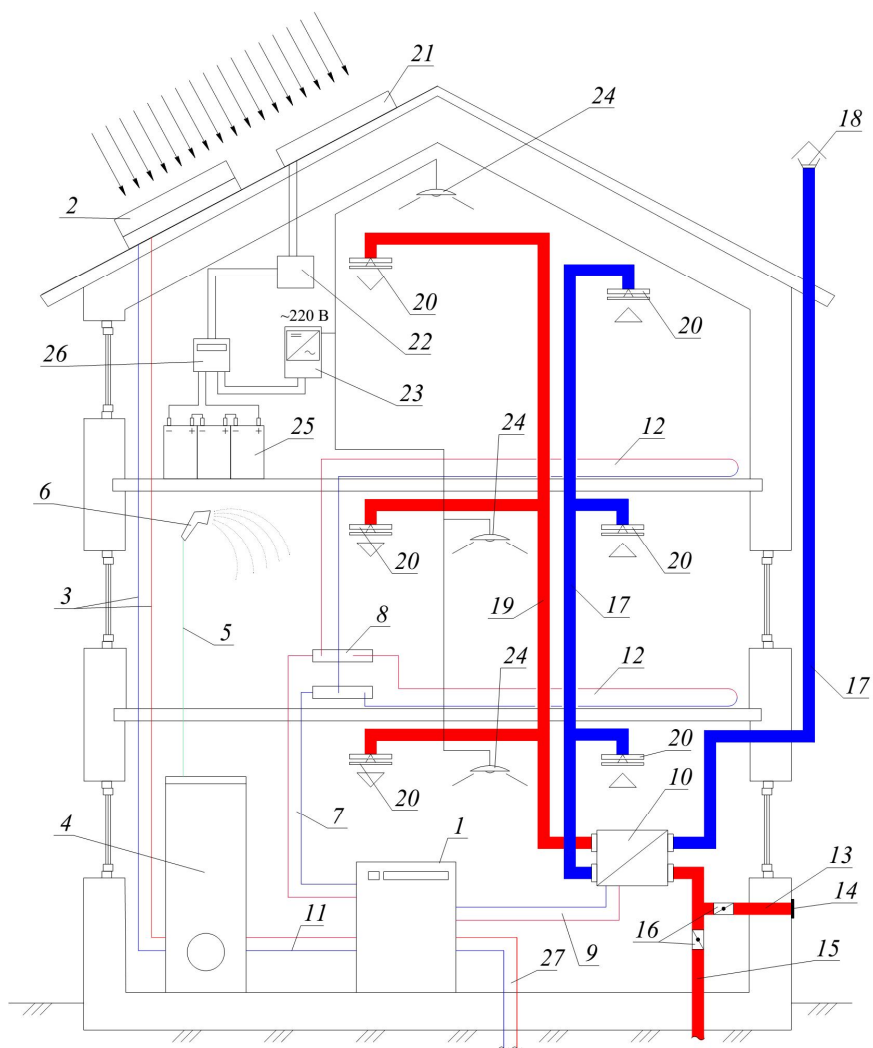


Рис. 3.1. Принципиальная схема инженерных систем пассивных многоквартирных жилых домов: 1 – тепловой насос; 2 – солнечный коллектор; 3, 5, 7, 9, 11 – трубопроводы; 4 – бойлер косвенного нагрева; 6 – водоразборный прибор; 8 – распределительная гребенка; 10 – приточно-вытяжная вентиляционная установка; 12 – контур системы «теплый пол»; 13 – воздуховод для прямого забора воздуха с улицы; 14 – воздухозаборная решетка; 15 – воздуховод для забора приточного воздуха через грунтовый теплообменник; 16 – воздушные заслонки; 17 – вытяжной воздуховод; 18 – зонтик-колпак; 19 – приточный воздуховод; 20 – потолочный диффузор; 21 – фотоэлектрический блок; 22 – соединительная коробка; 23 – инвертор; 24 – электропотребляющий прибор; 25 – блок аккумуляторных батарей; 26 – контроллер заряда аккумуляторных батарей; 27 – трубопровод к коллектору, находящемуся в грунте

3.2. Теплоснабжение систем отопления и горячего водоснабжения

Системы отопления и горячего водоснабжения пассивных домов имеют общий источник тепловой энергии, которым является тепловой насос. При недостаточности мощности теплового насоса для обеспечения потребностей систем отопления и горячего водоснабжения или в случае технико-экономического обоснования, дополнительно для подогрева горячей воды устанавливают водяные солнечные коллекторы.

Схема теплоснабжения системы отопления и горячего водоснабжения от теплового насоса и солнечного коллектора приведена на рис. 3.2.

В настоящий момент наибольшее применение в пассивных домах получили компрессионные тепловые насосы. Принцип работы компрессионного теплового насоса 1 заключается в следующем. В испарителе 2 за счет теплоты низкопотенциального источника теплоты (грунта, воды, воздуха) происходит парообразование низкокипящего теплоносителя (фреона) и отбор им теплоты. Образовавшийся перегретый пар сжимается в компрессоре 3. Пар поступает в конденсатор 4, где он изменяет свое состояние на жидкое, отдавая тепловую энергию контуру системы горячего водоснабжения и отопления. Полученный конденсат направляется к дросселирующему вентилю 5 через фильтр-осушитель 6. Фильтр-осушитель предназначен для удаления из хладагента влаги и механических частиц. В дросселирующем вентиле происходит понижение давления, после чего жидкость вновь поступает в испаритель.

Эффективность работы теплового насоса характеризуется его коэффициентом преобразования, определяемым по формуле [18]:

$$\Psi = \frac{q + l_k}{l_k}, \quad (3.1)$$

где q – количество теплоты, переданное в конденсаторе от промежуточного теплоносителя системе горячего водоснабжения и отопления, Дж; l_k – работа затраченная компрессором теплового насоса на адиабатное сжатие пара (или количество электрической энергии, потребленное компрессором), Дж.

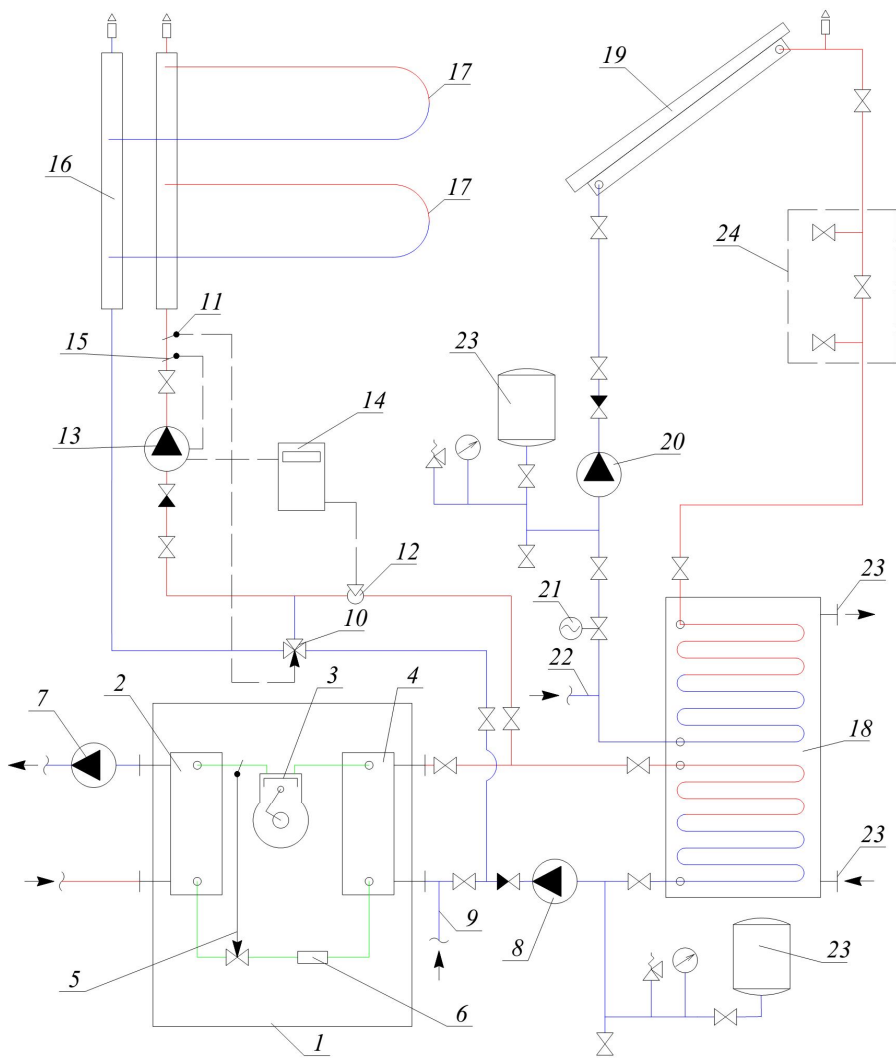


Рис. 3.2. Схема теплоснабжения системы отопления и горячего водоснабжения от теплового насоса и солнечного коллектора: 1 – тепловой насос; 2 – испаритель; 3 – компрессор; 4 – конденсатор; 5 – дросселирующий вентиль; 6 – фильтр-осушитель; 7, 8, 13, 20 – циркуляционные насосы; 9, 22 – патрубки для подпитки; 10 – распределяющий клапан; 11 – датчик температуры; 12 – термостатический клапан; 14 – электронный регулятор температуры; 15 – термореле защиты; 16 – распределительная гребенка; 17 – контур системы теплый пол; 18 – бак косвенного нагрева; 19 – солнечный коллектор; 21 – регулирующий клапан; 23 – патрубки для присоединения бака к системе горячего водоснабжения; 24 – узел для промывки и опрессовки циркуляционного кольца солнечного коллектора

Низкопотенциальный теплоноситель подается в испаритель теплового насоса от источника низкопотенциальной тепловой энергии с помощью циркуляционного насоса 7. Циркуляция теплоносителя между бойлером косвенного нагрева 18 и конденсатором осуществляется циркуляционным насосом 8. Подпитка циркуляционных колец системы отопления «теплый пол» и горячего водоснабжения осуществляется от холодного водоснабжения через патрубков 9.

Система отопления «теплый пол» имеет собственный регулирующий контур, который образуется за счет установки узла подмеса. Максимально допустимая температура в подающей магистрали регулируется механически через распределяющий клапан 10 по данным измерений датчиком температуры 11. В случае превышения установленной температуры теплоносителя в циркуляционном кольце, клапан 10 открывает байпасный трубопровод для подачи в контур обратного теплоносителя и закрывает его при понижении температуры ниже заданного уровня. Расход теплоносителя подаваемого в циркуляционное кольцо регулируется термостатическим клапаном (или ручным балансировочным клапаном) 12. Управление термостатическим клапаном и числом оборотов циркуляционного насоса 13 осуществляется посредством электронного регулятора температуры 14, по результатам обработки сигналов термореле защиты 15.

Теплоноситель поступает в распределительную гребенку или штанговый распределитель заводского изготовления 16, к которому присоединяются отдельные контура системы отопления теплый пол 17.

Кроме циркуляционного кольца теплового насоса к бойлеру косвенного нагрева 18 подключается солнечный коллектор 19. Циркуляционное кольцо солнечного коллектора заполняется 40...60 % раствором пропиленгликоля. Движение теплоносителя обеспечивается насосом 20. Применение растворов с низкой температурой замерзания (для 60 % раствора пропиленгликоля – минус 39 °С) связано с необходимостью предотвращения его кристаллизации в ночные часы холодных месяцев отопительного периода. Регулирование расхода теплоносителя проводится регулирующим клапаном 21. Подпитка данного контура осуществляется через патрубок 22, который ведет от специального бака

для приготовления раствора пропиленгликоля. Горячая вода, нагретая в баке 18, подается в тупиковый или циркуляционный контур системы горячего водоснабжения 23, по которому доставляется до водоразборных приборов.

Для компенсации избытков теплоносителя, возникающих вследствие его расширения в результате нагрева, в контурах теплового насоса и солнечного коллектора устанавливаются расширительные баки 23.

Схема подключения теплового насоса к системе отопления в значительной мере зависит от его конструкции, которая связана с источником низкотемпературной тепловой энергии. Производители тепловых насосов предлагают следующие наиболее распространенные схемы генерации тепловой энергии на нужды систем отопления с применением тепловых насосов [13, 24].

Теплогенерация с использованием земляных зондов и коллекторов (рис. 3.3). В данной схеме тепловая энергия отбирается от грунта с помощью земляных зондов 7 и коллекторов 6, которые представляют собой гладкие полиэтиленовые трубы. Глубина залегания коллекторов составляет – 1,2...1,5 м (но не выше глубины промерзания грунта), а зонда – 100...150 м. Снятая тепловая энергия через распределительный коллектор 4, 5 подается на испаритель теплового насоса 1, а затем отдается теплоносителю системы отопления 2 в его конденсаторе. На один квадратный метр площади грунта, при использовании коллекторов, может приходиться от 10 до 35 Вт, а при использовании зонда – до 50 Вт на один метр длины зонда.

Теплогенерация из грунтовых вод (рис. 3.4). В предложенной схеме тепловая энергия отбирается у грунтовых вод 5, которые поступают в теплообменник 2 посредством работы скважинного насоса водозаборной скважины 3. Вода, выходящая из теплообменника, сбрасывается в грунт по ходу движения грунтовых вод через возвратную скважину 4. В теплообменнике происходит передача тепловой энергии от грунтовых вод промежуточному теплоносителю (антифриз и пр.), который отдает свою теплоту в испарителе теплового насоса 1. Тепловой насос в свою очередь передает тепловую энергию в его конденсаторе контурам системы отопления 2.

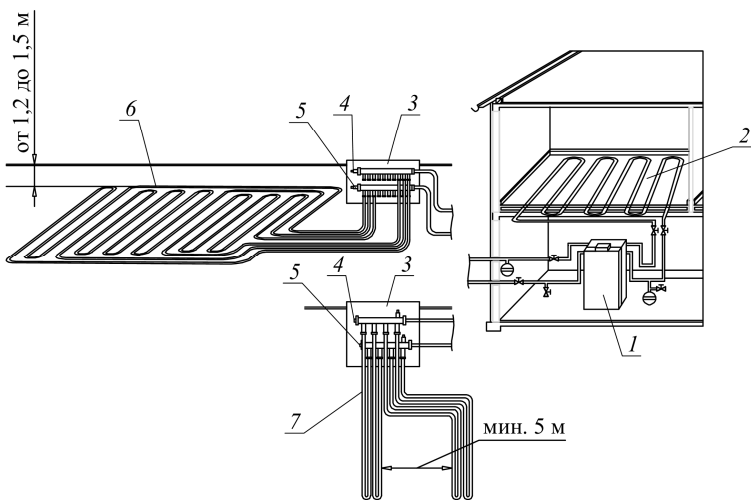


Рис. 3.3. Система теплоснабжения с тепловым насосом и земляным коллектором или земляным зондом: 1 – тепловой насос; 2 – система отопления; 3 – отсек для коллектора; 4, 5 – подающая и обратная магистрали распределительного коллектора; 6 – земляной горизонтальный коллектор; 7 – земляной зонд

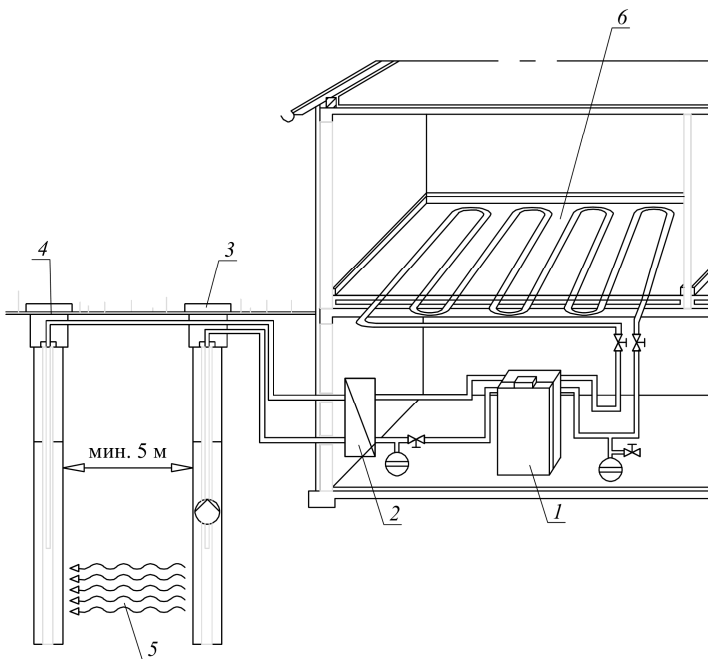


Рис. 3.4. Система теплоснабжения с тепловым насосом, генерирующим теплоту из грунтовых вод: 1 – тепловой насос; 2 – теплообменник; 3 – водозаборная скважина со скважинным насосом; 4 – возвратная скважина; 5 – направление потока грунтовых вод; 6 – система отопления

Теплогенерация с использованием льдоаккумуляторов и солнечных коллекторов (рис. 3.5). В данной схеме тепловая энергия грунта *б* передается воде находящейся в льдоаккумуляторе *7*. При низких температурах, в случае замерзания воды, тепловой насос *1* использует теплоту её кристаллизации. Для эффективной работы теплового насоса в течение всего года, к контуру льдоаккумулятора подсоединяют контур солнечного коллектора *5* через трехходовой вентиль *7*, который обеспечивает регенерацию теплоносителя в льдоаккумуляторе параллельно грунту. В теплый период года льдоаккумулятор может быть использован для охлаждения помещения. Приблизительно, на 1 м^3 объема льдоаккумулятора приходится до 1 кВт его тепловой производительности.

Теплогенерация с использованием окружающего воздуха. При данной схеме встроенный в тепловой насос вентилятор подает расчетный расход воздуха в воздушно-водяной испаритель. Испаритель передает полученную из воздуха тепловую энергию в контур теплового насоса, в котором она отдается теплоносителю системы отопления. В системе отопления теплоноситель через распределительные гребенки направляется в контуры системы отопления. При этом при установке теплового насоса внутри помещения (рис. 3.6), приточные и вытяжные отверстия должны быть расположены таким образом, чтобы не возникло замыкания воздушного потока. Для соединения установленных снаружи тепловых насосов (рис. 3.7) предназначены комплекты гидравлических подключений заводов изготовителей. Данные тепловые насосы не допускается использовать при низких температурах наружного воздуха (ниже $-15 \text{ }^\circ\text{C}$).

Работа тепловых насосов совместно с солнечными коллекторами и отдельно от них полностью автоматизирована и управляется контроллерами. Максимальная температура теплоносителя на подаче тепловых насосов частных домов может достигать $75 \text{ }^\circ\text{C}$. При работе теплового насоса возможны следующие основные режимы его работы: моновалентный; параллельный и альтернативный бивалентный; моноэнергетический.

Моновалентный режим работы предполагает, что тепловой насос является единственным теплогенератором в здании.

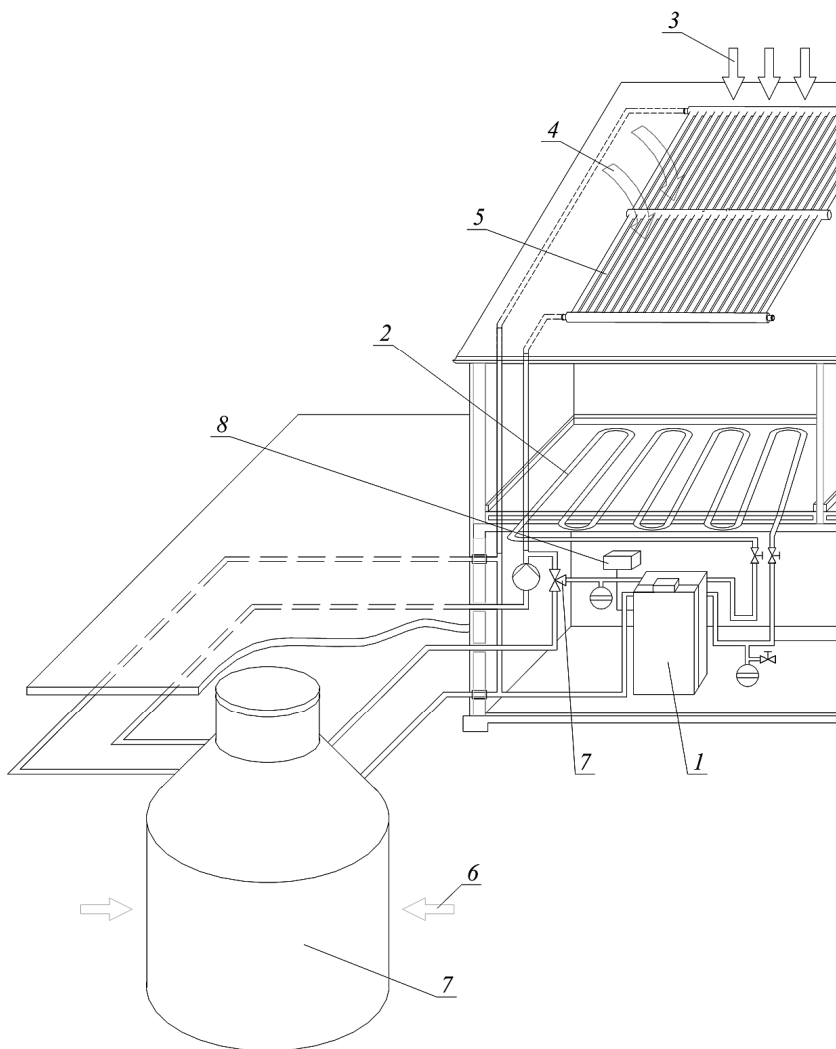


Рис. 3.5. Система теплоснабжения с генерацией тепла посредством льдоаккумулятора и солнечного коллектора: 1 – тепловой насос; 2 – система отопления; 3 – теплота солнечной радиации; 4 – теплота окружающего воздуха; 5 – солнечный коллектор; 6 – теплопритоки от грунта; 7 – льдоаккумулятор с теплоотборным и регенерационным теплообменником; 8 – трехходовой переключающий клапан для переключения первичного источника; 9 – контроллер солнечного коллектора

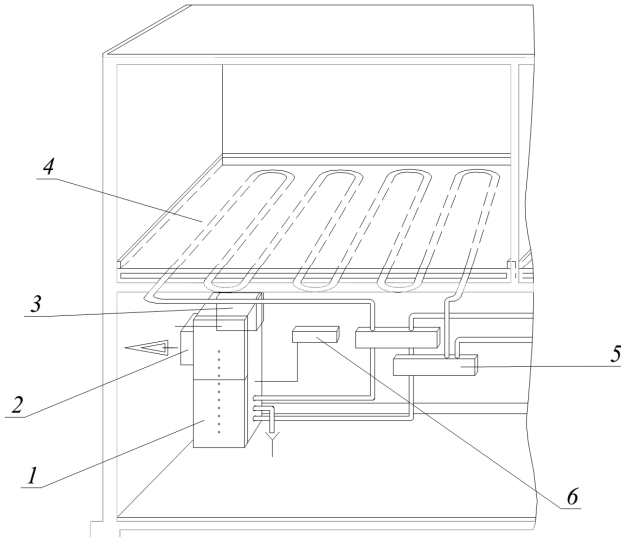


Рис. 3.6. Система теплоснабжения с воздушно-водяным тепловым насосом, установленным внутри помещения: 1 – тепловой насос; 2 – вытяжной канал; 3 – приточный воздушный канал; 4 – система отопления; 5 – распределительная гребенка; 6 – контроллер теплового насоса

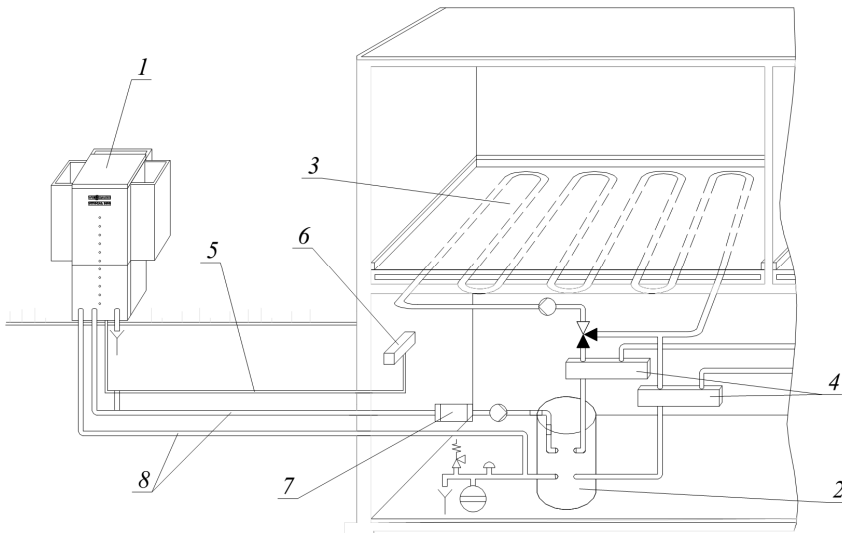


Рис. 3.7. Система отопления с воздушно-водяным тепловым насосом, установленным снаружи помещения: 1 – тепловой насос; 2 – бак накопитель; 3 – система отопления; 4 – распределительная гребенка; 5 – соединительный кабель; 6 – контроллер теплового насоса; 7 – проточный нагреватель для теплоносителя; 8 – комплект гидравлических подключений

Бивалентный режим работы теплового насоса заключается в его работе в режиме отопления совместно с водогрейным теплогенератором, работающем на газовом или твердом топливе.

Бивалентный режим работы подразделяется на параллельный и альтернативный. При параллельном режиме работы, тепловой насос работает совместно с водогрейным генератором весь отопительный период. На тепловой насос при этом ложится от 50 до 70 % всей тепловой нагрузки. При альтернативном бивалентном режиме до определенной температуры наружного воздуха работает только тепловой насос, а при более низких температурах теплоту генерирует только газовый теплогенератор. Тепловой насос при таком режиме работы покрывает от 60 до 70 % потребности в тепловой энергии здания.

Моноэнергетический режим работы теплового насоса состоит в его работе совместно с теплогенератором, работающим от электрической сети.

Важным показателем эффективности режимов работы теплового насоса является коэффициент использования β , равный [13]:

$$\beta = \frac{Q_{\text{тн}}}{W_{\text{эл}}}, \quad (3.2)$$

где $Q_{\text{тн}}$ – количество теплоты, отданное тепловым насосом в течение года, кВт·ч/год; $W_{\text{эл}}$ – количество электрической энергии, израсходованное тепловым насосом в течение года, кВт·ч/год.

3.3. Солнечные коллекторы систем теплоснабжения

Солнечные коллекторы предназначены для поглощения солнечной радиации и превращения её в тепловую энергию, для последующей передачи теплоносителю [20]. В зависимости от используемого теплоносителя коллекторы разделяются на жидкостные и воздушные. В рассмотренных ранее схемах применяются жидкостные солнечные коллекторы, которые подразделяются на плоские, неостекленные, вакуумированные и концентрирующие.

Плоский солнечный коллектор (рис. 3.8, а). Принцип работы плоского солнечного коллектора заключается в использовании светопрозрачного покры-

тия, пропускающего солнечные лучи, но не пропускающего инфракрасное излучение. Солнечное излучение проходит через светопрозрачное покрытие и поглощается абсорбером, который нагревается и становится источником инфракрасного излучения, таким образом, за счет свойства покрытия не пропускать инфракрасное излучение большая часть энергии остается внутри коллектора и передается теплоносителю. В качестве абсорбера, как правило, применяют медь и алюминий, а также нержавеющую сталь и пластмассы. Абсорбер покрывается сверху селективным покрытием, основным критерием оценки эффективности которого является показатель [20]:

$$\xi = \frac{\alpha}{\varepsilon}, \quad (3.3)$$

где α – коэффициент поглощения солнечной радиации (доля поглощенной солнечной радиации); ε – коэффициент излучения, показывающий долю излучаемой части длинноволнового спектра. Современные селективные покрытия имеют наилучшие значения коэффициентов, равные: $\alpha = 0,95$; $\varepsilon = 0,05$; $\xi = 19$.

Светопрозрачные покрытия изготавливаются из стекла с низким содержанием железа или из прозрачного пластика. Эффективность светопрозрачного покрытия характеризуется долей прошедшего через него излучения к общему излучению, упавшему на покрытие, которая называется коэффициентом трансмиссии τ . Специальное стекло может иметь коэффициент трансмиссии до 0,97.

Корпус плоского коллектора изготавливается из алюминия, оцинкованного железа, синтетических материалов или дерева, которые теплоизолируются минеральной ватой, стекловолокном или полиуретаном.

Неостекленный солнечный коллектор (рис. 3.8, б). Неостекленный солнечный коллектор изготавливается из пластмасс (этилен-пропилен-диен-мономер, полипропилен и пр.). Данный коллектор не имеет остекления и тепловой изоляции, основными его преимуществами являются простота и дешевизна изготовления, а также долговечность, связанная с отсутствием коррозии. Особенностью данного типа коллекторов от других конструкций является их повышенный теплообмен с окружающей средой.

Вакууммированный солнечный коллектор (4.8, в). Основным компонентом вакууммированного солнечного коллектора являются стеклянные трубки с селективным покрытием, заключенные внутри других стеклянных трубок. Пространство между трубками заполняется вакуумом, давлением менее 0,1 Па, которое может поддерживаться более 100 лет. Особенностью трубчатого коллектора являются наименьшие потери теплоты на отражение солнечной радиации по сравнению с плоскими коллекторами.

Концентрирующий солнечный коллектор (4.8, г). Концентрирующие солнечные коллекторы используют оптические системы (зеркала, линзы и пр.) для увеличения плотности солнечной радиации на поверхности, поглощающей энергию. Данные коллекторы состоят из концентратора и приемника. Концентратор является оптической системой, направляющей поток излучения на приемник. Приемник представляет собой часть коллектора, поглощающую излучение и преобразующую его в другой вид энергии.

Одним из показателей характеризующих концентрирующие солнечные коллекторы является коэффициент концентрации [20]:

$$C = \frac{A_k}{A_{пр}}, \quad (3.4)$$

где A_k – площадь концентратора, m^2 ; $A_{пр}$ – площадь приемника, m^2 .

В зависимости от конструкции различают следующие концентрирующие солнечные коллекторы: плоские приемники и плоские отражатели ($C = 2 \dots 15$); параболические концентраторы ($C = 100 \dots 5000$); линза Френеля ($C = 20 \dots 80$); конические отражатели и цилиндрические приемники ($C = 10 \dots 40$).

Использование концентрирующих солнечных коллекторов возможно только в регионах с преобладающей прямой радиацией.

Для круглогодичных систем горячего водоснабжения от солнечных коллекторов в качестве теплоносителя применяется смесь воды и антифриза (этиленгликоль, пропиленгликоль и пр.), которая имеет более низкую температуру замерзания и может использоваться в холодный период года.

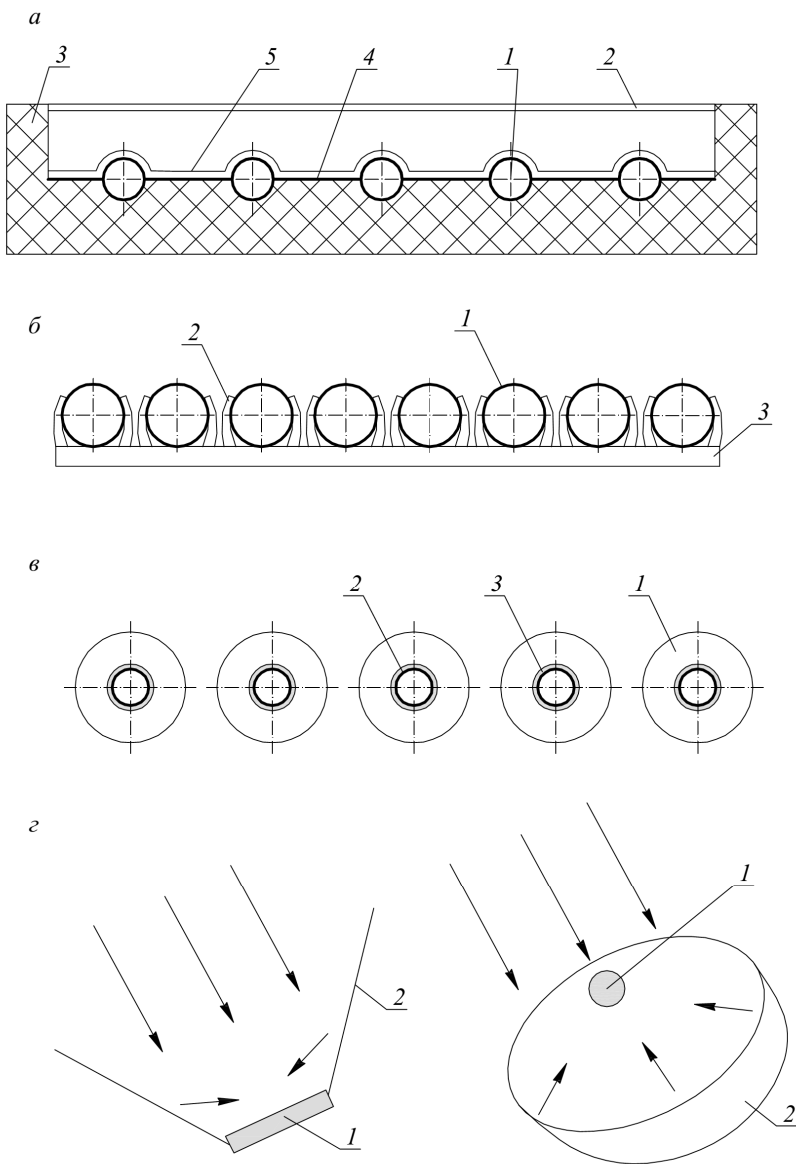


Рис. 3.8. Солнечные коллекторы. Плоский коллектор (а): 1 – теплоноситель; 2 – светопрозрачное покрытие; 3 – теплоизолированный корпус; 4 – абсорбер; 5 – селективное покрытие. Неостекленный коллектор (б): 1 – трубчатый абсорбер из полипропилена; 2 – крепление; 3 – балка. Вакууммированный коллектор (в): 1 – вакуум; 2 – внутренняя стеклянная трубка; 3 – селективное покрытие. Концентраторные коллекторы (г): 1 – приемник солнечного излучения; 2 – отражатель излучения

3.4. Приточно-вытяжная вентиляция

Пониженная воздухопроницаемость наружных ограждающих конструкций пассивных домов и повышенные требования к микроклимату в них требуют устройства приточно-вытяжной механической вентиляции (рис. 3.9 [14]), оборудованной перекрестным рекуператором 15, доля возврата тепла которого должна составлять не менее 75 %. Принцип работы данной системы вентиляции заключается в следующем. Наружный воздух проходит через приточную решетку 7, очищается в воздушном фильтре 13 и поступает в пластинчатый рекуператор 15, в который одновременно поступает отработанный, загрязненный вытяжной воздух. В рекуператоре происходит отдача удаляемым внутренним воздухом теплоты приточному наружному воздуху. Современные рекуператоры с высоким значением возврата тепла имеют стенки из мембраны, возвращающей также скрытую теплоту пропускаемых ею водяных паров теплого воздуха. Мембрана пропускает через себя только молекулы воды, оставляя загрязнители в вытяжном воздухе. Данные теплообменники допускается применять при температуре наружного воздуха не ниже $t_n = -25$ °С. В регионах, с более низкими температурами предполагается использование двойных и тройных перекрестноточных теплообменников, без мембраны, что позволяет исключить выпадение и замерзание в них конденсата при температурах внутреннего воздуха $t_b = 20$ °С и наружного воздуха – до $t_n = -35$ °С. Подогрев приточного воздуха до его расчетной температуры проводится в воздухонагревателе 16.

Подача и удаление воздуха из помещений здания осуществляется с помощью канальных вентиляторов 9 и 10. Очистка приточного и вытяжного воздуха до рекуператора фильтрами 13, 14 необходима для предотвращения загрязнения его теплообменных поверхностей. Для защиты от шума вентиляторов предусмотрены шумоглушители 11, 12.

При экономическом обосновании также допускается устройство грунтового теплообменника 2, который используется для предварительного подогрева воздуха в холодный период и охлаждения в теплый период года.

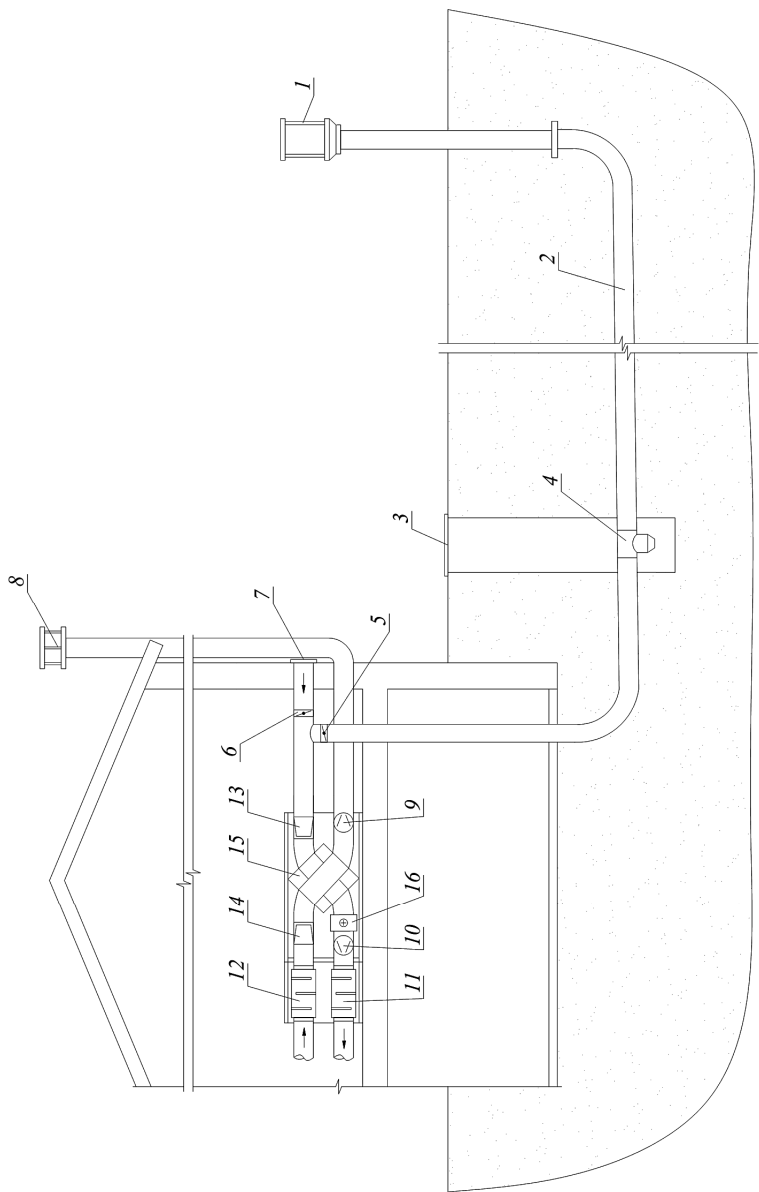


Рис. 3.9. Схема приточно-вытяжной вентиляции с утилизацией теплоты вытяжного воздуха и грунтовым теплообменником:
 1 – приточная колонна; 2 – грунтовый теплообменник; 3 – ревизионный колодец; 4 – сифон для слива конденсата; 5, 6 – воздушная за-
 слонка; 7 – воздухозаборная решетка; 8 – зонг-колпак; 9 – вытяжной вентилятор; 10 – приточный вентилятор; 11, 12 – шумоглушители;
 13, 14 – фильтры; 15 – рекуператор; 16 – воздухонагреватель

В холодный период года, наружный воздух забирается не через приточную решетку 7, а в приточную колонну 1 и проходит по грунтовому теплообменнику, где нагревается от грунта (температура грунта составляет 7...10 °С) до температуры порядка 0...5 °С и поступает в рекуператор 15. Труба грунтового теплообменника должна прокладываться с уклоном не менее 2°. В нижней точке грунтового теплообменника необходимо устраивать сифон 4 для слива конденсата, располагаемый в колодце 3 для его обслуживания. Трубопроводы грунтового теплообменника изготавливаются с нанесением на их внутреннюю поверхность антимикробного покрытия (с частицами серебра), которое значительно сокращает рост микробов и позволяет обеспечить соблюдение гигиенических требований к приточному воздуху. Скорость движения воздуха в распределительных трубах грунтового теплообменника не должна превышать 6 м/с, а в основном сборном коллекторе – не более 4 м/с (рис. 3.10 [45, 49]).

В теплый период года грунтовый теплообменник может применяться для охлаждения приточного воздуха, так как температура грунта ниже температуры внутреннего воздуха. При этом только часть приточного воздуха проходит через грунтовый теплообменник, другая его часть забирается через приточную решетку, что связано с необходимостью поддержания допустимого перепада между температурой приточной струи и внутреннего воздуха. Регулирование долей подаваемого наружного воздуха и воздуха, прошедшего через грунтовый теплообменник, осуществляется заслонками 5, 6.

Система вентиляции должны иметь общую систему автоматизации и контроля температуры внутреннего воздуха, наружного воздуха и теплоносителей, заряда аккумуляторных батарей и иных параметров с системами электрического снабжения, отопления и горячего водоснабжения, для наиболее рационального использования получаемой из возобновляемых источников тепловой и электрической энергии, а также учета фактических режимов эксплуатации помещений, допускающих снижение потребления тепловой энергии на нагрев вентиляционного воздуха. Данная система автоматизации (или здание, оборудованное данной системой) имеет обобщенное название – «умный» дом.



Рис. 3.10. Грунтовый теплообменник: 1 – сборный коллектор; 2 – распределительные трубы

3.5. Контрольные вопросы для самостоятельной работы

1. Принципиальная схема работы системы теплоснабжения отопления и горячего водоснабжения пассивных домов.
2. Какие виды водяных солнечных коллекторов вы знаете? В чем особенность конструкции каждого из них?
3. Опишите принцип работы теплового насоса. Что такое коэффициент эффективности теплового насоса?
4. Каким образом осуществляется генерация теплоты с использованием тепловых насосов с земляными зондами?
5. При каких температурах наружного воздуха недопустимо использовать тепловые насосы с воздушно-водяным испарением?
6. В чем особенности бивалентного, моновалентного и моноэнергетического режимов работы тепловых насосов?
7. Что такое коэффициент концентрации солнечного коллектора?
8. Для каких целей в качестве теплоносителя в системах солнечного теплоснабжения используют этиленгликоль?
9. Каких значений не должна превышать максимальная скорость движения воздуха в грунтовых теплообменниках систем вентиляции?
10. Для каких целей может быть использован льдоаккумулятор теплового насоса в теплый период?
11. Какой должна быть минимальная эффективность рекуперации в системах приточно-вытяжной вентиляции пассивных домов?

4. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПАССИВНЫХ ДОМОВ

4.1. Ветроэлектрогенераторы

4.1.1. Общие сведения о ветроэнергетических установках

Ветроэнергетическая установка (ВЭУ) – установка для преобразования кинетической энергии ветрового потока в электрическую энергию или совершение механической работы.

Первые ветродвигатели применялись в Вавилоне, Древнем Египте, Китае и Японии еще во 2 тысячелетии до н.э. В странах Европы (Италия, Франция, Испания, Англия, Нидерланды) ветрогенераторы стали применяться начиная с XI-XII веков [2, 5]. К концу XVII века первые ветродвигатели появились в России. Вплоть до XIX века ветровые и водяные турбины были основными источниками энергии, пока не были вытеснены устройствами, использующими энергию пара.

Изобретателем первой ВЭУ, вырабатывающей электроэнергию, является шотландский инженер-изобретатель Дж. Блит, переоборудовавший для данной цели свою мельницу. В разное время вклад в развитие ВЭУ внесли многие отечественные и зарубежные ученые и изобретатели: П. Ла Кур, Ч. Ф. Браш, Й. Джул, А. Бетц, братья Якобсы, В.Г. Залевский, Н.Е. Жуковский и др.

В 20-30 гг. XX века произошло широкое внедрение ветрогенераторов в СССР и США. В 1931 г. в Крыму была построена крупнейшая на тот момент в мире ветроэлектростанция (ВЭС) мощностью $P = 100$ кВт, в 1941 г. ВЭС мощностью $P = 1,25$ МВт была построена в США.

Дополнительный толчок в развитии ВЭУ получили в 70-х годах XX века под влиянием мирового энергетического кризиса.

На данный момент серийное производство ВЭУ налажено в Нидерландах, Дании, Швеции, Великобритании, Германии, США и других странах.

Самой мощной в мире ВЭУ в настоящее время является германский ветроэлектрогенератор «Enercon-126», высотой $h = 198$ м, размахом лопастей $l = 127$ м и номинальной мощностью $P = 7,58$ МВт [48] (рис. 4.1).

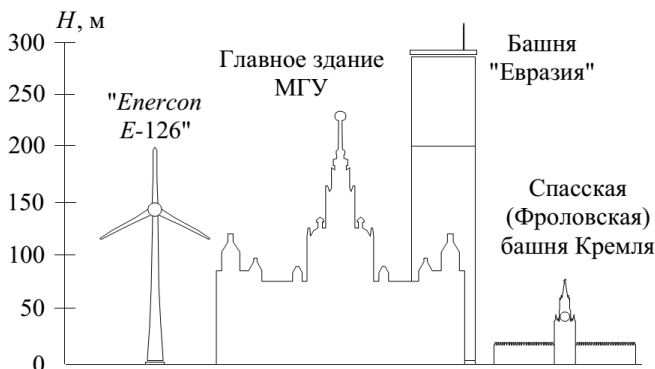


Рис. 4.1. Сравнительные размеры ВЭУ «Enercon E-126» с известными сооружениями

В настоящее время ВЭУ в нашей стране используют преимущественно для преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию для подъема воды в сельской местности или электрическую на нужды бытовых и промышленных потребителей.

Применение ВЭУ в России тормозит, в первую очередь, их высокая удельная капиталоемкость по сравнению с традиционными установками, использующими невозобновляемые энергетические ресурсы. Основным требованием для места строительства ВЭС является наличие высокой среднегодовой скорости ветра $v_{\text{ветр}} \geq 6 \text{ м/с}$ [5].

В зависимости от геометрии ветроприемного устройства и его положения относительно направления потока ветра ветроэнергетические установки классифицируются на ВЭУ с горизонтальной или вертикальной осью вращения и безлопастные.

С точки зрения принципа действия ВЭУ делятся на [2, 3, 20]:

- использующие подъемную силу (однолопастные, двухлопастные, трехлопастные, многолопастные, ротор Флеттнера, парусный ротор, буксировочный ротор, ротор Дарье, H -ротор Дарье);
- концентраторные (турбина в канале, ветроагрегат с диффузором, канального типа, дельта-концентратор, концентратор Бервиана);

– использующие силу лобового сопротивления (ротор Савониуса, чашечный анемометр).

В соответствии с типом используемого генератора ветроэнергетические установки подразделяют на ВЭУ с синхронным и асинхронным генераторами. Ветроэнергетические установки также классифицируются по отношению собственной электрической мощности P , кВт, к полной мощности энергосистемы P_c , к которой они подключаются [2]:

– класс A ($P > P_c$); ветроэнергетические установки не подключаются к энергосистеме, а предназначаются для поддержания определенного процесса, например, уличного освещения или работы водяного насоса;

– класс B ($P \approx P_c$); ветроэнергетические установки подключаются к небольшой изолированной отдаленной энергосистеме; в таких случаях ВЭУ является дополнительным источником электроэнергии, позволяющим сэкономить дизельное топливо, затрачиваемое на работу дизельгенератора;

– класс C ($P < P_c$); ветроэнергетические установки подключаются к коммунальным энергосистемам большой мощности; в этом случае ВЭУ используются по прямому назначению, при наличии излишков электроэнергии она подается в городскую энергосистему.

Внешний вид наиболее распространенных типов ветроприемных устройств ветроэнергетических установок приведен на рис. 4.2.

4.1.2. Конструкция и принцип работы промышленных ВЭУ

Наиболее широко в настоящий момент в качестве промышленных ВЭУ применяются трехлопастные ветроэнергетические установки с горизонтальной осью вращения и синхронным двигателем, принципиальная схема работы которых приведена на рис. 4.3.

В конструкции гондолы 4 содержится генератор 8 и редуктор 5. Редуктор предназначен для связи вала ветроприемного устройства, состоящего из ступицы 2, лопастей 1 и обтекателя 3, с генератором и повышения частоты его вращения. Гондола крепится на башню 11, устанавливаемую на фундамент 16.

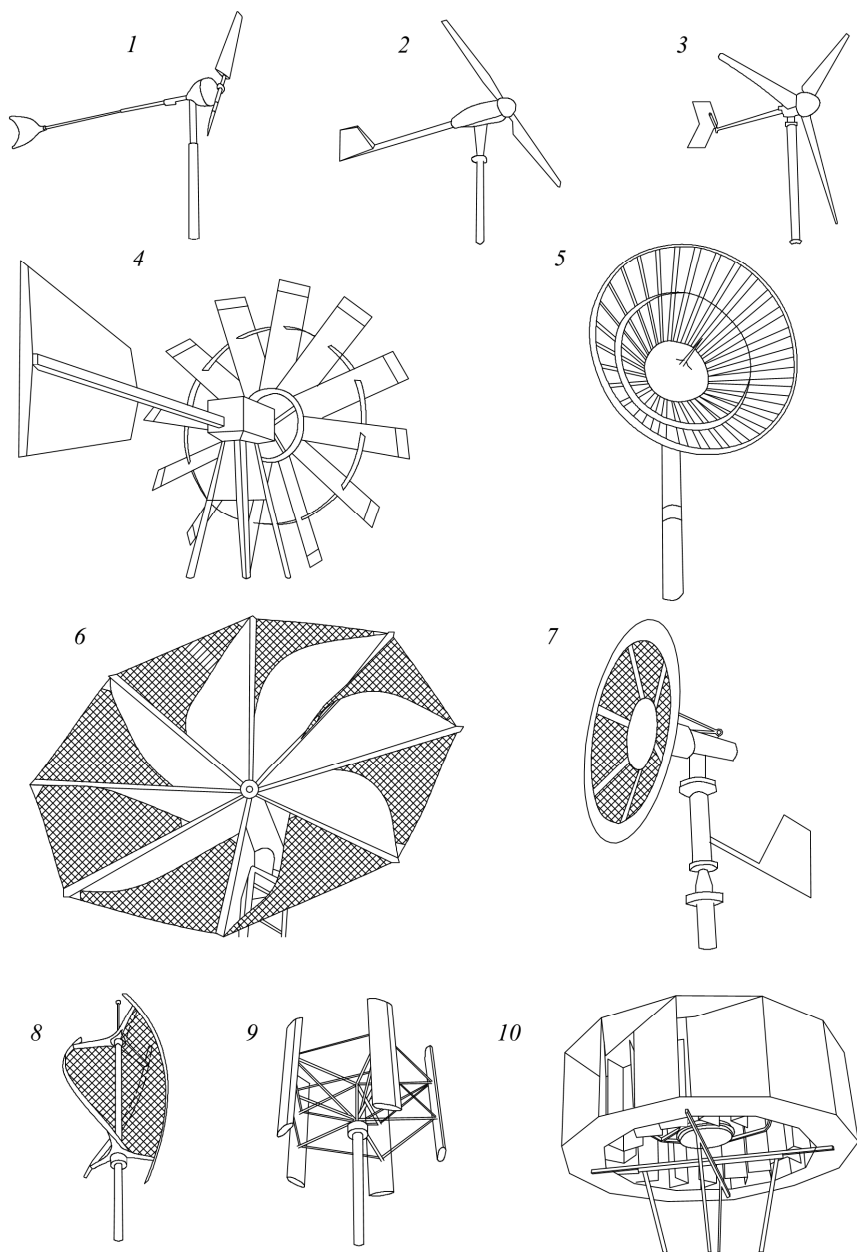


Рис. 4.2. Типы ветроприемных устройств: с горизонтальной осью вращения (1 – однолопастной, 2 – двухлопастной, 3 – трехлопастной, 4 – многолопастной, 5 – многолопастной с наклонными лопастями, 6 – парусного типа); безлопастной 7; с вертикальной осью вращения (8 – ротор Савониуса, 9 – ротор Дарье, 10 – барабанного типа)

В башне имеется лестница для обслуживающего персонала с целью подъема в гондолу и доступа к генератору и редуктору. При изменении направления ветра, которое фиксируется измерительным оборудованием 9, происходит поворот гондолы по направлению против ветра с помощью поворотного механизма 12, приводимого в движение азимутальным приводом 13. Основные и дополнительные тормоза 6, 10, 14 предназначены для выведения ВЭУ из эксплуатации при аварийных ситуациях или в условиях буревых скоростей.

Принцип работы ВЭУ заключается в преобразовании лопастями кинетической энергии ветрового потока в механическую энергию вращения вала ветроприемного устройства с последующей передачей её ротору генератора. В генераторе 8 происходит преобразование механической энергии вращения ротора в электрическую энергию. Вырабатываемый в генераторе переменный ток направляется в выпрямитель переменного тока, где он преобразуется в постоянный ток, и затем поступает в контроллер 18. После этого постоянный ток поступает в инвертор 20, в котором он преобразуется в переменный ток с изменением частоты и напряжения. Полученная электрическая энергия направляется через блок автоматического включения резерва (АВР) к потребителю. Блок АВР предназначен для обеспечения электрической энергией потребителя из центральной системы электроснабжения в случае, если ветроэлектрогенератор будет не в состоянии обеспечить потребителя электроэнергией в полном объеме в периоды с фактически более низкой, чем расчетная, скоростью ветра $v_{\text{ветр}}$. Аккумуляторные батареи 19 предназначены для накопления электроэнергии и использования её при слабом ветре.

Данная схема подключения ВЭУ к электрической сети называется не прямой и позволяет аэродинамически оптимально использовать уста новку при различных скоростях ветра. Однако, она имеет значительные недостатки, а именно: дополнительные капитальные затраты на её реализацию и значительные потери электроэнергии на нужды инвертора (до 5...10 % от вырабатываемой мощности P , кВт).

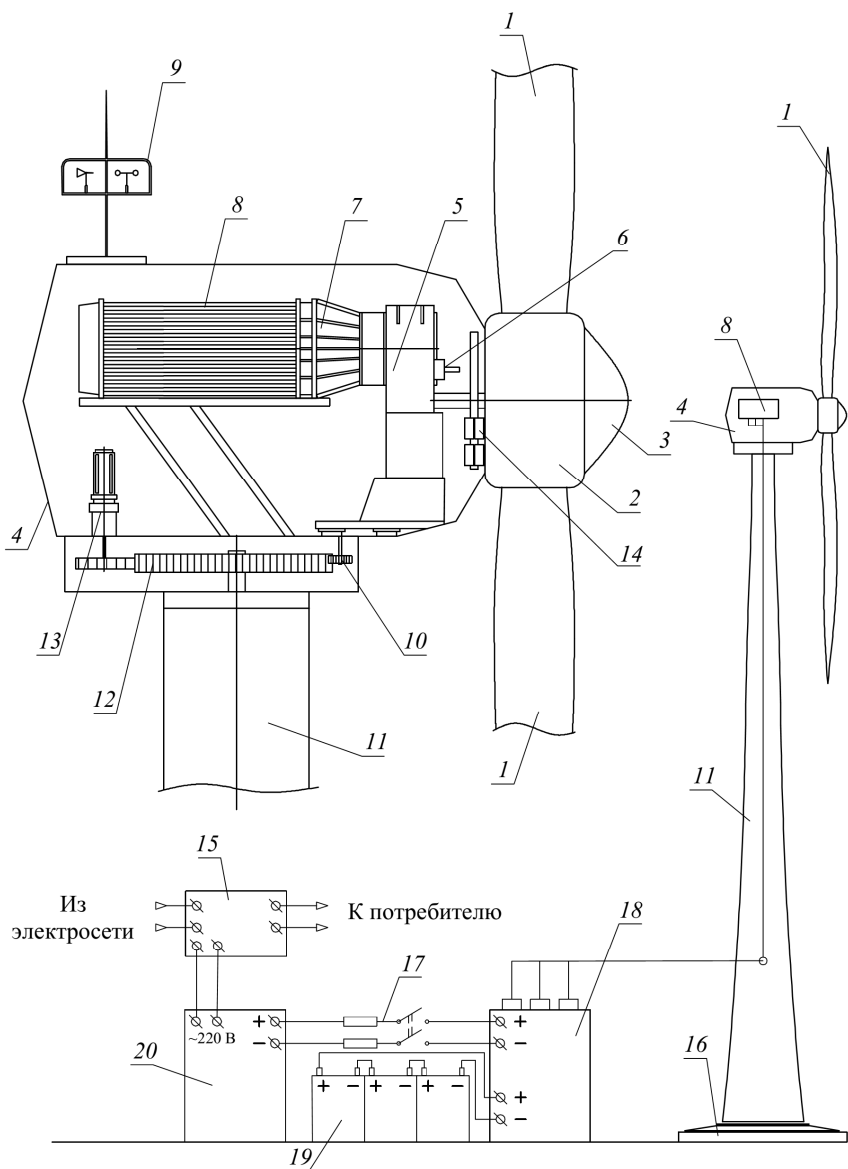


Рис. 4.3. Принципиальная схема промышленной трехлопастной ветроэнергетической установки с синхронным двигателем и горизонтальной осью вращения: 1 – лопасть; 2 – ступица; 3 – обтекатель; 4 – гондола (машинное отделение); 5 – редуктор; 6 – резервный тормоз; 7 – гидродинамическое соединение; 8 – генератор; 9 – измерительное оборудование; 10 – азимутальный тормоз; 11 – башня; 12 – поворотный механизм; 13 – азимутальный привод; 14 – тормоз; 15 – автоматический ввод резерва; 16 – фундамент башни; 17 – переключатель и предохранители; 18 – контроллер генератора; 19 – блок аккумуляторов; 20 – инвертор

Промышленные ВЭУ, объединяемые в концентрированные на ограниченном участке местности ветряные фермы (они же ВЭС), одним из крупнейших примером которых является ферма «*San Gorgonio Pass*» в США ($P = 615$ МВт), имеют более сложные схемы передачи электрической энергии от генератора к конечному потребителю и являются объектами уникального нетипового строительства.

Ветроэнергетическая установки размещаются относительно друг друга с учетом экологических, метеорологических и топографических факторов. В связи с тем, что ветровой поток после прохождения ветроколеса значительно замедляется расстояние между соседними ВЭУ должно быть не меньше трех диаметров D , м, ветроколеса.

Наиболее распространены два способа расположения ВЭУ на ветряных фермах. Первый способ (рис. 4.4, *а*), учитывающий расположение ВЭУ относительно преобладающего направления ветра, применяется в прибрежных районах. В том случае если ветряная ферма располагается в районе без выраженного преобладающего направления ветра ВЭУ располагаются вторым способом (рис. 4.4, *б*).

4.1.3. Основные характеристики ветроприемных устройств ВЭУ

Основными характеристиками *ветроприемного устройства использующего подъемную силу* (ветроколеса, рис. 4.5) являются коэффициент использования мощности C_p , коэффициент момента окружных сил C_m и быстроходность ветроколеса Z [2, 20].

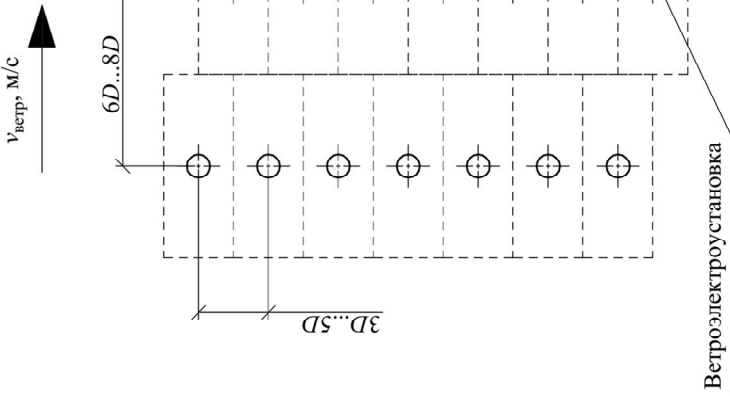
Коэффициент использования мощности определяется по формуле:

$$C_p = \frac{N_B}{N_{\text{встр}}} = \frac{(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)}{2v_1^3}, \quad (4.1)$$

где N_B – мощность ветроколеса, использованная ветроколесом в процессе его вращательного движения, Вт; $N_{\text{встр}}$ – полная энергия набегающего ветрового потока, Вт; v_1, v_2 – скорость ветра до и после ветроколеса, м/с.

а

Преобладающее направление ветра



б

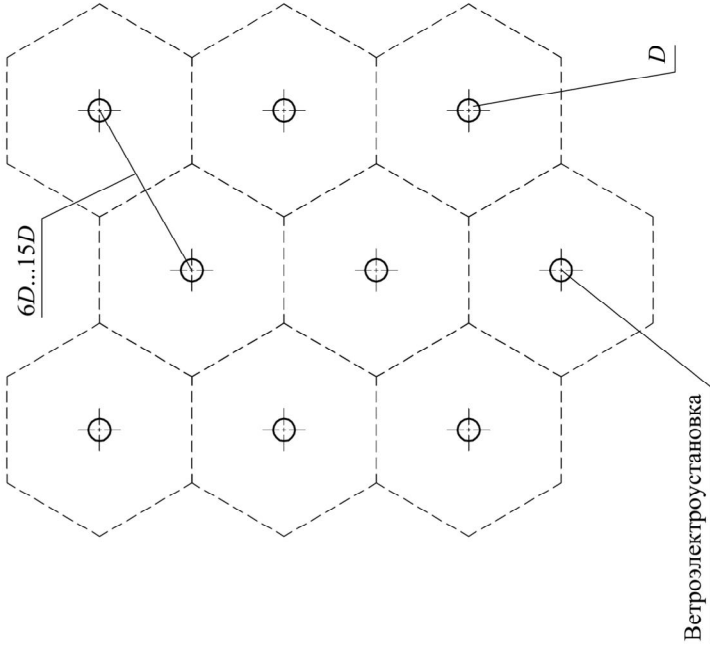


Рис. 4.4. Типовые схемы расположения ВЭУ на ветряных фермах

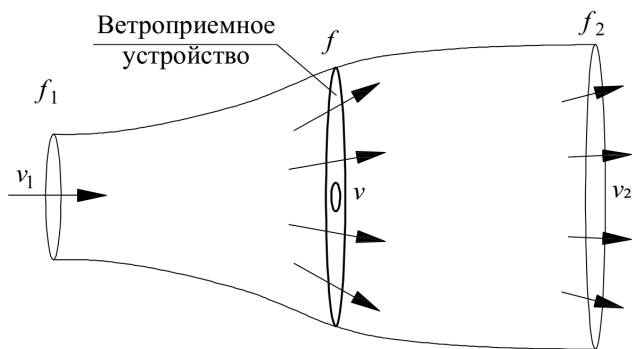


Рис. 4.5. Схема воздействия ветрового потока на ветроприемное устройство

Кинетическая энергия ветрового потока $N_{\text{ветр}}$, Вт, составляет

$$N_{\text{ветр}} = \rho_{\text{в}} f v^3 / 2 \quad (4.2)$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м³.

Максимальное значение коэффициента C_p достигается при соотношении скоростей $v_2/v_1 = 1/3$ и составляет $C_p = C_B = 0,593$ (где C_B – критерий Бетца).

Коэффициент полезного действия ветроколеса, исходя из данного критерия, определяется по формуле:

$$\eta_{\text{в}} = \frac{C_p}{C_B}. \quad (4.3)$$

Быстроходность Z ветроколеса является отношением линейной скорости конца лопасти к скорости набегающего ветрового потока и применяется в качестве базовой характеристики ветроколеса. Быстроходность равна:

$$Z = \frac{2\pi n R}{v_{\text{ветр}}}, \quad (4.4)$$

где n – частота вращения, об/с; R – радиус ветроколеса, м.

Оптимальное значение быстроходности ветроколеса $Z_{\text{опт}}$ в зависимости от числа лопастей рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{опт}} = \frac{4\pi}{n_{\text{лоп}}}, \quad (4.5)$$

где $n_{\text{лоп}}$ – число лопастей, шт.

Коэффициент момента окружных сил равен:

$$C_M = \frac{2M}{\rho_d f D}, \quad (4.6)$$

где M – крутящий момент на валу ветроколеса, Н·м; ρ_d – динамическое давление ветрового потока, Па; f – площадь, омываемая ветроколесом, м²; D – диаметр ветроколеса, м.

Крутящий момент на валу ветроколеса M , Н·м, является отношением мощности ветроколеса к его угловой скорости ω , рад/с:

$$M = \frac{N_v}{\omega} = C_M \frac{\rho \pi v_{\text{ветр}}^2 R^3}{2}, \quad (4.7)$$

где ρ – плотности воздуха, кг/м³.

Быстроходность ветроколеса Z находится в следующей зависимости от коэффициента использования мощности C_p и коэффициента момента окружных сил C_M :

$$Z = \frac{C_p}{C_M}. \quad (4.8)$$

Мощность ветроколеса N_v , Вт, зависит от скорости ветра $v_{\text{ветр}}$ и определяется по формуле:

$$N_v = C_p \frac{\rho \pi v_{\text{ветр}}^3 R^2}{2}. \quad (4.9)$$

В зависимости от режима работы ветроколеса различают следующие пороговые скорости ветра (рис. 4.6 [20]).

Скорость страгивания с места v_c , м/с – скорость, при которой ветроколесо начинает вращаться без нагрузки, $v_c = 0 \dots 2,5$ м/с.

Минимальная рабочая скорость $v_{\text{мин}}$, м/с – скорость, которая обеспечивает вращение ротора с номинальной частотой вращения и нулевой производительностью, т.е. в режиме холостого хода, $v_{\text{мин}} = 4,5 \dots 6,0$ м/с.

Оптимальная скорость $v_{\text{опт}}$, м/с – скорость, при которой ветроэнергетическая установка работает с оптимальным коэффициентом использования мощности $C_p^{\text{опт}}$, $v_{\text{опт}} = 6 \dots 10$ м/с.

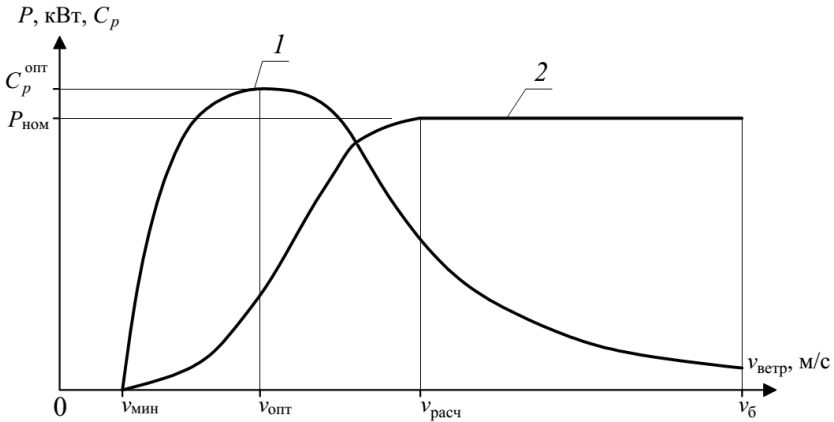


Рис. 4.6. Зависимость коэффициента использования мощности ветроколеса C_p и мощности P ветрогенератора от скорости ветра $v_{\text{ветр}}$: 1 – $C_p = f(v_{\text{ветр}})$; 2 – $P = f(v_{\text{ветр}})$

Расчетная скорость $v_{\text{расч}}$, м/с – скорость, начиная с которой генератор развивает номинальную электрическую мощность $P_{\text{ном}}$, кВт, $v_{\text{расч}} = 10 \dots 15$ м/с.

Максимальная рабочая скорость $v_{\text{макс}}$, м/с – скорость, при которой конструкция ВЭУ позволяет производить электроэнергию без повреждения её конструктивных элементов, $v_{\text{макс}} = 20 \dots 34$ м/с. Буревая скорость $v_б$, м/с – максимальная скорость ветра, которую может выдержать остановленный ВЭУ без его разрушения, $v_б = 50 \dots 70$ м/с.

Мощность генератора P , кВт, ВЭУ составляет [20]:

$$P = \eta_r N_v, \quad (4.10)$$

где η_r – коэффициент полезного действия генератора ВЭУ.

Для промышленных ветроэлектрогенераторов с номинальной мощностью $P_{\text{ном}} = 0,5 \dots 3$ МВт существует эмпирическая зависимость определения их номинальной мощности [17]:

$$P_{\text{ном}} = 0,06 D^{2,42}. \quad (4.11)$$

Ветроприемное устройство использующие силу лобового сопротивления (рис. 4.7 [20]) в первую очередь характеризуется коэффициентом сопротивления C_c . Сила сопротивления, возникающая при воздействии ветрового потока

на неподвижный объект площадью поперечного сечения f , m^2 , расположенного перпендикулярно ветровому потоку равна:

$$F_c = \frac{C_c \rho_v f v_{ветр}^2}{2}. \quad (4.12)$$

Сила приводящаяся в движение ветроприемное устройство F , Н,

$$F = F_{c1} - F_{c2} = \frac{\rho_v f [c_{c1}(v_{ветр} - u)^2 - c_{c2}(v_{ветр} + u)^2]}{2}. \quad (4.13)$$

где F_{c1} , F_{c2} – силы сопротивления, возникающие в результате действия ветрового потока на лопасти ветроприемного устройства, Н; u – окружная скорость лопастей, м/с.

Коэффициент мощности C_p ветроприемного устройства использующего силу лобового сопротивления составляет

$$C_p = Z [c_{c1}(v_{ветр} - Z)^2 - c_{c2}(v_{ветр} + Z)^2]. \quad (4.14)$$

где Z – коэффициент быстроходности ветроколеса, $Z = u/v_{ветр}$.

Максимальный коэффициент мощности ветроприемного устройства использующего силу лобового сопротивления составляет $C_p = 0,073$, что в восемь раз меньше критерия Бетца $C_B = 0,593$. В связи с этим данные ветроприемные устройства менее распространены, чем использующие подъемную силу.

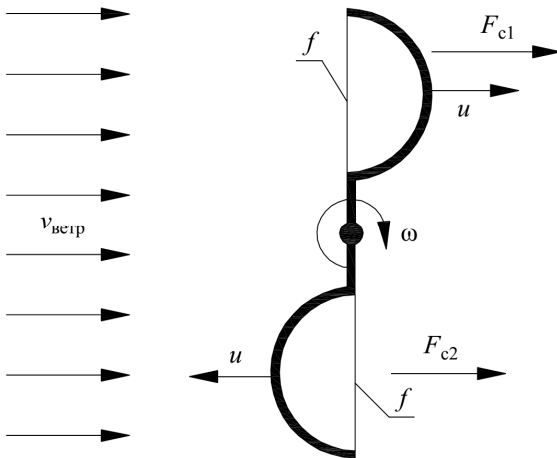


Рис. 4.7. Ветроприемное устройство использующее силу лобового сопротивления

4.1.4. Принцип работы и основные характеристики генераторов ВЭУ

В качестве современных генераторов ВЭУ, как правило, используют синхронные генераторы с возбуждением постоянными магнитами или электромагнитным возбуждением.

Синхронный генератор постоянного тока [42] (рис. 4.8) – это электрическая машина постоянного тока, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую энергию постоянного тока. При вращении ротора 2 генератора в постоянном магнитном поле, образованном обмоткой возбуждения в обмотке якоря 1, в соответствии с законом электромагнитной индукции наводится ЭДС (электродвижущая сила). Максимальное значение ЭДС имеет место при расположении катушки под магнитным полюсом (рис. 4.9 а), при пересечении же обмотки якоря оси геометрической нейтрали ЭДС равна нулю (рис. 4.9, б), а при дальнейшем повороте ротора ЭДС изменяет знак на противоположный. В обмотке якоря возникает переменный электрический ток, для выпрямления которого используются выпрямители.

Значение ЭДС синхронного генератора E , В, составляет [15, 42]:

$$E = cn\Phi, \quad (4.15)$$

где c – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности генератора; n – частота вращения ротора, об/мин; Φ – основной магнитный поток, Вб.

Таким образом, ЭДС генератора пропорциональна основному магнитному потоку генератора, при этом напряжение U , В, на зажимах генератора меньше ЭДС на величину внутреннего падения напряжения [11, 15]:

$$U = E - I_{\text{обм}}R_{\text{обм}}, \quad (4.16)$$

где $I_{\text{обм}}$ – ток в обмотке якоря, А; $R_{\text{обм}}$ – полное сопротивление одной фазы обмотки якоря, Ом.

При подключении обмотки якоря генератора ВЭУ к активной нагрузке с сопротивлением нагрузки R , Ом, развиваемая синхронным генератором активная мощность P , Вт, равна

$$P = IU, \quad (4.17)$$

где I – сила тока в цепи, А; U – напряжение в цепи, В.

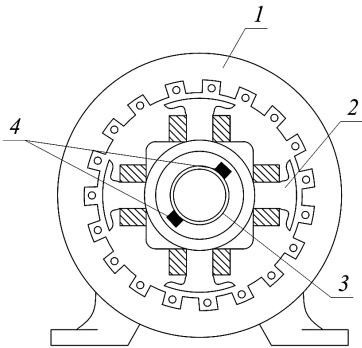


Рис. 4.8. Схема устройства генератора: 1 – неподвижный якорь; 2 – ротор; 3 – контактные кольца; 4 – скользящие щетки

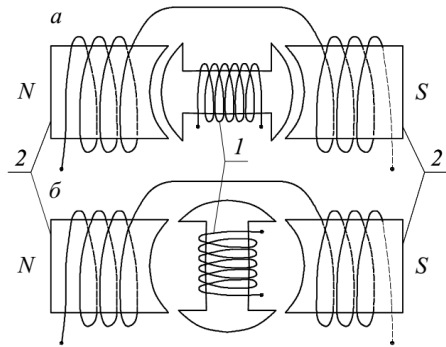


Рис. 4.9. Схема вращения катушки ротора в поле электромагнита неподвижного якоря при магнитном потоке через катушку: а – максимальном; б – минимальном; 1 – катушка ротора; 2 – полюсы якоря

Активная составляющая тока нагрузки генератора при этом создает тормозной электромагнитный момент якоря $M_{я}$, Н·м, приложенный к валу ветроколеса, приводящего во вращение ротор генератора. Мощность P , вырабатываемая реальным генератором ветроэлектрогенератора малой мощности, при увеличении скорости ветрового потока $v_{ветр}$ будет сначала увеличиваться до номинального значения $P_{ном}$, а при дальнейшем увеличении скорости ветра $v_{ветр}$ будет уменьшаться, как показано на примере зависимости мощности реального ветроэлектрогенератора «EuroWind 20» от скорости ветра $v_{ветр}$ (рис. 4.10). Это явление связано с использованием в их работе *stahl*-регулирования (применение неповоротных лопастей, аэродинамические свойства которых обеспечивают стабилизацию мощности при скоростях выше расчетных значений $v_{расч}$ [20]) или отсутствием регулирования. Для достижения стабилизации мощности, как показано на рис. 4.6, используется *pitch*-регулирование, заключающееся в изменении угла поворота лопастей относительно направления ветрового потока с помощью гидропривода или электропривода.

Для питания электроприемников от ВЭУ необходимо осуществить подключение ее к нагрузке. Бывают не сетевые (без подключения к общественной сети) и сетевые (с подключением к общественной сети) схемы подключения инверторов напряжения.

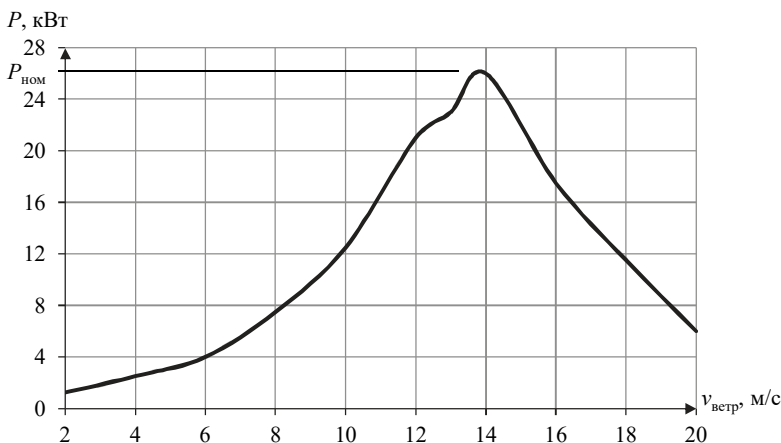


Рис. 4.10. Зависимость мощности P от скорости набегающего ветрового потока $v_{\text{ветр}}$ генератора ВЭУ «EuroWind 20»

4.1.5. Схемы подключения ветроэлектродгенераторов к сети

Подключение ветроэлектродгенератора без аккумуляторов с коммутацией с сетью. Данная схема (рис. 4.11 [47]) подключения также называется безбатарейным электрическим соединением, так как она не использует батареи, чтобы сохранить излишки электричества. В безбатарейной сетевой системе электрическая сеть принимает избыточное электричество, произведенное ветрогенератором сверх необходимого. Общественная электросеть служит хранилищем избыточной электроэнергии, т.е. используется вместо аккумуляторных батарей. В сеть уходит вся выработанная электроэнергия, а недостаток электричества при необходимости потребляется из неё. Потребитель платит за разницу между выработанной и потреблённой электроэнергией.

В большинстве таких систем ветрогенератор производит переменный ток, частота и напряжение которого изменяются от скорости ветра.

Переменный электрический ток, получаемый от ветрогенератора, не может быть сразу использован бытовой техникой и электроникой. Для обычной техники требуется переменный ток с постоянной частотой и напряжением, поступающими из электрической сети. Для подачи к электрическим приборам его

нужно сначала преобразовать при помощи контроллера и инвертора: 120-вольтовый или 240-вольтовый переменный ток, вырабатываемый инвертором (или непосредственно путем индукции генератора) поступает к АВР (блок автоматического включения резерва), в котором находятся выключатели и предохранители. Далее электрический ток по проводам течет в дом к устройствам, получающим питание.

Если ветрогенератор производит больше энергии, чем необходимо, избыток подается в стационарную сеть. Избыток электроэнергии поступает в сеть при помощи блока управления, после чего он проходит через электросчетчик, который, как правило, устанавливается снаружи здания. Далее, по проводам, которые подключены к стационарной электросети, ток проходит вдоль линии электропередач, откуда передается к соседним зданиям.

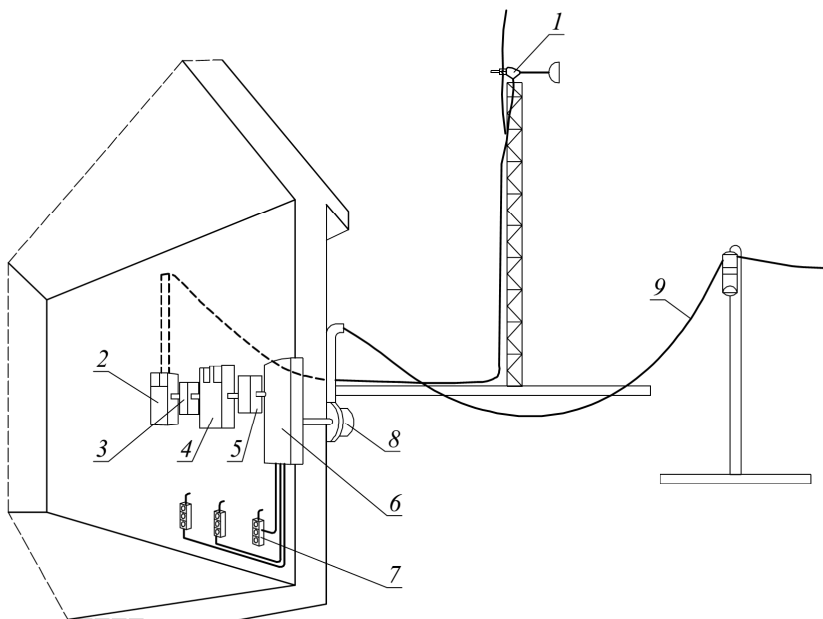


Рис. 4.11. Подключение ветрогенератора без аккумуляторов с коммутацией с сетью: 1 – ветроэлектрогенератор; 2 – пульт управления (постоянный ток); 3 – рубильник (постоянный ток); 4 – инвертор; 5 – рубильник (переменный ток); 6 – АВР; 7 – электрические розетки; 8 – электросчетчик; 9 – линия электропередач

Ручные переключатели предназначены для ручного отключения электро-системы в случаях предотвращения поражения электрическим током.

В схеме на рис. 4.11 данный переключатель располагается между инвер-тором и АВР. Когда переключатель выключен, система отключается и изолиру-ется от бытовых приборов и сети.

Переключатель монтируется так, чтобы при необходимости он был до-ступен обслуживающему персоналу, для самостоятельного отключения систе-мы в случае ремонта или проведении профилактических работ на районной электролинии, не опасаясь ударов тока. Система также должна содержать пере-ключатель, для отключения системы, чтобы жильцы не смогли использовать систему до завершения ремонтных работ.

Схема подключения ветроэлектрогенератора без аккумуляторов и комму-тацией с электрической сетью наиболее распространена и используется в боль-шинстве всех устанавливаемых систем в мире.

К преимуществам данной схемы следует отнести относительную простоту конструкции и невысокую стоимость (на 25 % дешевле, чем подключение ветрогенератора с аккумуляторами). Они также более просты в обслуживании, чем системы с аккумуляторами. Данные схемы позволяют сохранить практиче-ски неограниченное количество избыточного электричества в сети (пока сеть работоспособна и эксплуатируется). В том случае, если ветер отсутствует или ветрогенератор не производит достаточного количества электроэнергии, которое необходимо потребителю в данный момент, для поддержания обеспечения электроснабжением электроэнергия будет взята из стационарной электросети.

Количество отданной и взятой обратно электроэнергии фиксируется и со-ставляется баланс. Отдавая излишки электроэнергии в определенный момент жилец получает ее обратно при необходимости бесплатно.

В результате исключаются потери электроэнергии, при хранении её в ак-кумуляторах, т.к. электроэнергия в аккумуляторах преобразовывается в хими-ческую энергию. При потребности в сохраненной в аккумуляторах электро-энергии, она преобразуется обратно. Порядка 20...30 % электроэнергии теряет-

ся при преобразовании и хранении. В результате данная схема в большей мере соответствует «зеленым» стандартам строительства, так как при использовании такой системы выделяется меньше вредных веществ, чем при использовании схемы подключения ветрогенераторов с аккумуляторами (аккумуляторы содержат токсичную серную кислоту).

При определенных условиях данные системы могут обеспечить некоторый доход домовому хозяйству. В ветряной местности ветрогенератор может производить излишки электроэнергии месяц за месяцем и в этом случае система быстрее окупится.

Главным недостатком данной схемы является необходимость её согласования с энергоснабжающими организациями. Следует отметить, что в случае аварии на линии электропередач, жилец не сможет ни отдать электроэнергию, ни взять ее, если погода безветренная.

В том случае если перебой в электроснабжении являются периодической проблемой и электроэнергия не поступает в течение длительного периода времени, данная система дублируется дизельным генератором, который включается автоматически при перебое в подаче электроэнергии.

Подключение ветроэлектростанции с аккумуляторами и коммутацией с сетью. Данная схема гарантирует непрерывное электроснабжение, даже в случае повреждения системы электропитания здания (рис. 4.12 [47]).

Блок АВР позволяет переключить питание здания при отсутствии ветрового давления или полном разряде аккумуляторов на электросеть. В предлагаемой схеме ветрогенератор может использоваться и наоборот, как резервный источник питания. В этом случае АВР переключает потребителя на аккумуляторные батареи ветрогенератора при потере питания от электросети.

Аккумуляторы требуют установку другого типа инвертора. Данная система также как и предыдущая содержит счетчик, который учитывает передачу электроэнергии в обе стороны. Также необходимо отметить устройство, установку которого необходимо произвести при наличии аккумуляторов – это контроллер (регулятор) заряда. Сохранение полностью заряженных аккумуляторов

имеет высокий приоритет в данной системе. Аккумуляторы хранятся в помещении полностью заряженные для того, чтобы гарантировать поддержание электроснабжения в критических случаях. Только тогда, когда батареи полностью заряжены, избыток выработанной электроэнергии подается в сеть. Аккумуляторы в данной системе используются только в случае перебоя в сети.

Хранение заряженных аккумуляторов требует 5...10 % их заряда ежедневно (в малоэффективных системах или в системах с устаревшими аккумуляторами потребление электроэнергии достигает 25...50 %).

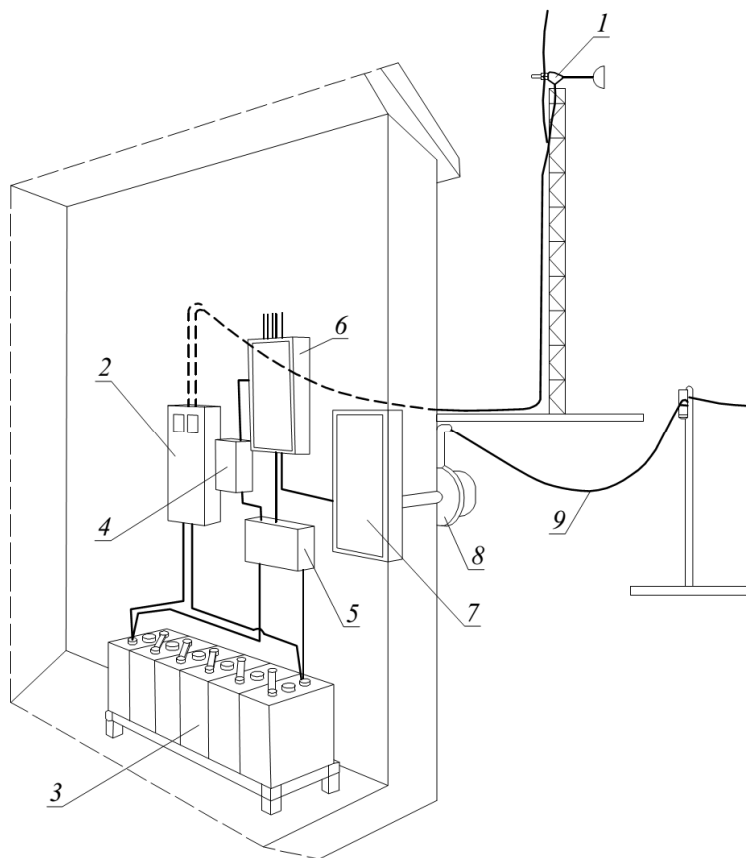


Рис. 4.12. Подключение ветрогенератора с аккумуляторов и коммутацией с сетью: 1 – ветроэлектрогенератор; 2 – контроллер заряда; 3 – аккумуляторы; 4 – рубильник; 5 – инвертор; 6 – панель управления; 7 – АВР; 8 – электросчетчик; 9 – линия электропередач

Обслуживание аккумуляторов не требует непрерывного контроля, однако необходимо периодически проверять их функциональность и исправность.

Важным компонентом данной схемы является контроллер заряда. Контроллер заряда содержит выпрямитель тока, который также называется преобразователь (он преобразовывает переменный ток в постоянный). Контроллер заряда следит за напряжением в аккумуляторах. Он использует данную информацию для защиты аккумуляторов от перегрузки – чрезмерного наличия электроэнергии в них. Перезаряд аккумулятора может навсегда повредить свинцовые пластины в них, значительно уменьшая срок эксплуатации аккумуляторов. Когда регулятор заряда «видит», что аккумуляторы полностью заряжены, он перекрывает поток электроэнергии, идущий к ним. Этот поток энергии, который благодаря регулятору заряда не попал к аккумулятору, подается в сеть, а если доступа к сети нет (в случае неисправности или ремонтно-профилактических работ), происходит сброс нагрузки. Сброс происходит при помощи устройства, преобразующего избыточную энергию в тепло. Это устройство устанавливается в водонагревателях или в обогревателях в подвалах или подсобных помещениях и помогают использовать избыток электроэнергии.

Данные системы защищают потребителя от неполадок ветрогенератора и позволяют не только отапливать здания, но также бесперебойно поддерживать работу систем холодоснабжения, медицинского оборудования, а в общественных и производственных зданиях – питание оргтехники и другого необходимого оборудования, обеспечивая его непрерывную работу организаций.

Системы с аккумуляторами требуют больших затрат на создание, ремонт и обслуживание, чем системы без них. Аккумуляторы, используемые в этих системах, требуют периодического обслуживания, а также замены каждые 5...10 лет вне зависимости от условий эксплуатации.

Хранение заряженных аккумуляторов также потребляет некоторое количество электроэнергии ежедневно.

Подключение ветроэлектродгенератора с аккумуляторами без коммутации с сетью. Данная схема (рис. 4.13) сокращенно называется автономной.

Основным источником электроэнергии в такой системе является ветроэлектродгенератор оборудованный системой заряда аккумуляторов. Турбины ВЭУ производят переменный ток, который преобразуется в постоянный ток при помощи выпрямителя, расположенного в контроллере заряда.

Контроллер передает постоянный ток в аккумуляторные батареи. Когда появляется потребность в электроэнергии, она передается от аккумуляторов к потребителю, проходя через инвертор. Инвертор преобразует постоянный ток в 24-вольтовый или 48-вольтовый ток с целью повышения напряжения переменного тока, а также в 120 или 240 В.

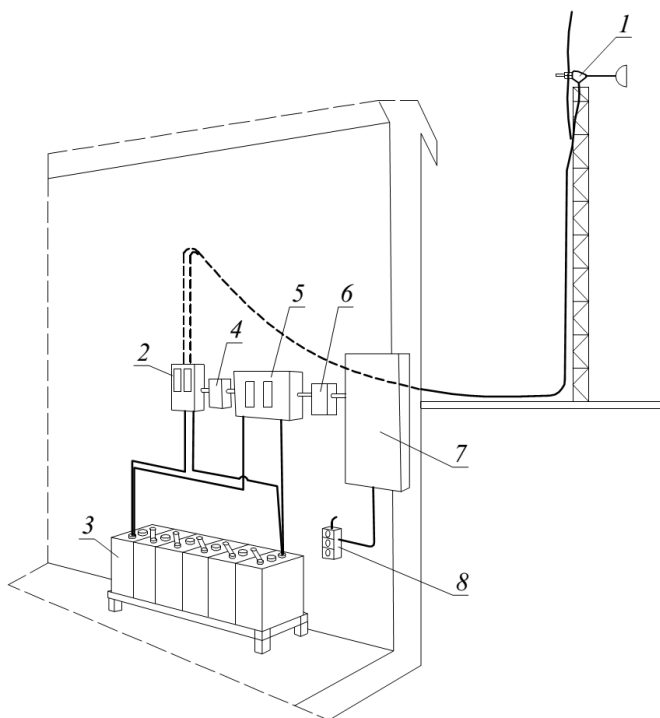


Рис. 4.13. Подключение ветроэлектродгенератора с аккумуляторами без коммутации с сетью: 1 – ветроэлектродгенератор; 2 – контроллер; 3 – аккумуляторные батареи; 4 – рубильник (постоянный ток); 5 – инвертор; 6 – рубильник (переменный ток); 7 – АВР; 8 – электрические розетки

В этом случае полученный переменный ток передается в систему электроснабжения дома сначала проходя через АВР.

Ветроэлектродвигатель вырабатывает электроэнергию, которая необходима для удовлетворения потребностей потребителя, излишек выработанной электроэнергии сохраняется в аккумуляторах для дальнейшего ее использования в безветренный или маловетренный периоды. В случае полного заряда аккумуляторов излишки сбрасываются. Данные системы практически всегда оборудуются резервным источником электроэнергии (бензиновым или дизельным генератором), которые компенсируют недостатки электроэнергии.

Большинство ветрогенераторов производят электроэнергию переменного тока, которую в дальнейшем преобразовывают в электроэнергию постоянного тока при помощи контроллера. Инвертор получает электроэнергию из аккумуляторных батарей, преобразовывая создаваемое напряжение в напряжение, подходящее для бытового использования.

Для увеличения производительности системы можно установить два и более генератора, инвертора и комплекта аккумуляторов для увеличения мощности системы (рис. 4.14 [47]). Такая система является наиболее сложной.

Необходимо отметить, что некоторые автономные системы содержат только цепь постоянного тока. Такая схема питается напрямую от аккумуляторов, обходя инвертор, обеспечивает питание постоянным током для освещения помещений или поддержания работы холодильного оборудования. Обход инвертора позволяет экономить электроэнергию, затрачиваемую при работе инвертора. На преобразование постоянного тока в переменный затрачивается от 5 до 10 % проходящей через инвертор энергии.

Однако сети постоянного тока также требуют устройство дополнительных проводов, которые имеют более высокую стоимость, а потери в этих проводах соизмеримы с потерями в инверторе. Кроме того необходима установка специальных розеток.

Установка аккумуляторов значительно упрощается при применении специализированного центра управления, который состоит из одного или нескольких преобразователей, панели управления (она необходима для мониторинга производительности системы), АВР и контроллера заряда. Центр управления стоит больше, чем его компоненты по отдельности, однако он проще и дешевле в установке и обслуживании.

Основным недостатком системы является обязательная установка резервного генератора и топлива для него.

Системы автономного обеспечения являются самыми дорогостоящими, по сравнению с предыдущими схемами, из-за потребности в аккумулировании выработанной электроэнергии и необходимости обеспечения резервного питания. Устройство данных систем целесообразно при большой удаленности зданий от центральных линий электропередач.

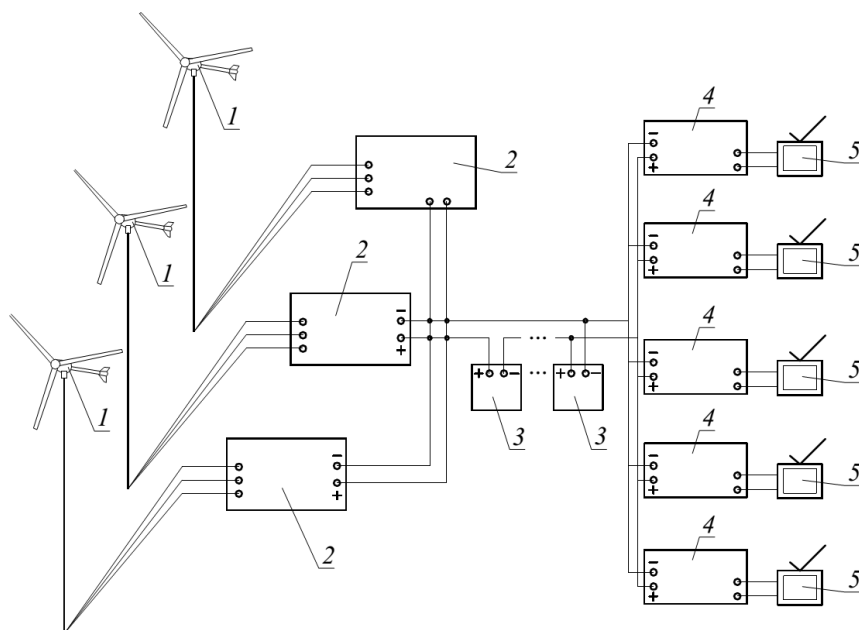


Рис. 4.14. Схема увеличения производительности автономной системы: 1 – ветроэлектрогенераторы; 2 – контроллеры; 3 – аккумуляторные блоки; 4 – инверторы; 5 – электроиспользующее оборудование

Гибридная автономная система, комбинирующая солнечную панель и ветрогенератор. Данная система (рис. 4.15 [47]) предполагает одновременное использование солнечной и ветровой электроэнергетики. Дополняя друг друга, совместно фотоэлектрический модуль и ветроэлектрогенератор гарантируют производство достаточного количества электроэнергии практически при любых климатических условиях. Установка гибридной системы позволяет исключить устройство резервного дизельгенератора.

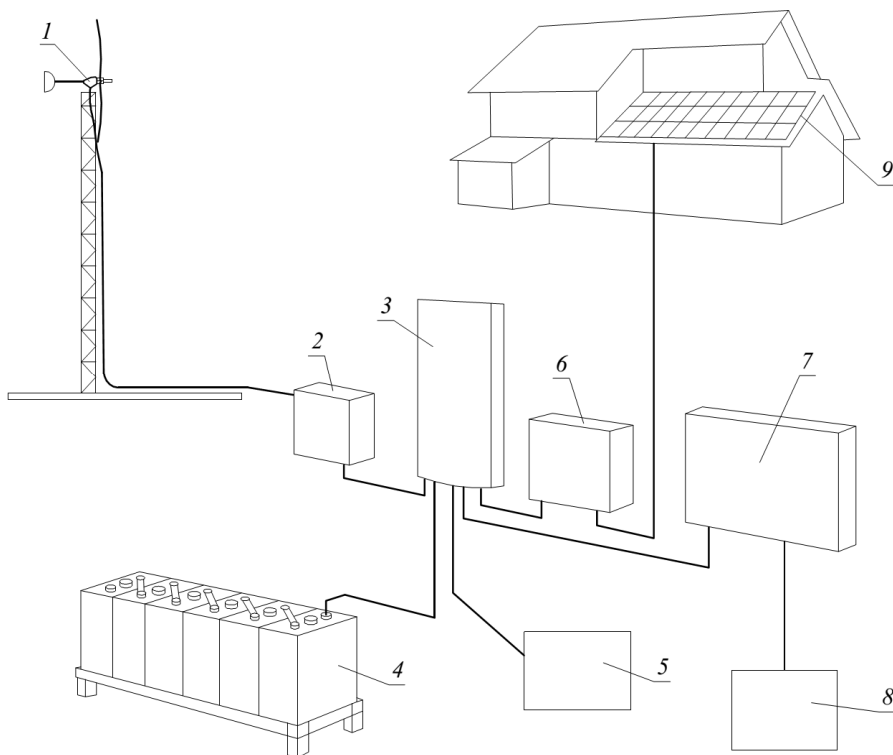


Рис. 4.15. Гибридная автономная система, комбинирующая солнечную панель и ветрогенератор: 1 – ветрогенератор; 2 – контроллер ветрогенератора; 3 – панель управления; 4 – аккумуляторы; 5 – рубильник (постоянный ток); 6 – контроллер солнечной панели; 7 – инвертор; 8 – рубильник (переменный ток); 9 – солнечная панель

4.2. Фотоэлектрические батареи

4.2.1. Общие сведения о фотоэлектрических батареях

Закон ослабления света при его прохождении через поглощающую и рассеивающую среду был экспериментально установлен в 1729 г. французским физиком и астрономом П. Бугером [12]. Явление фотоэффекта в химических реакциях впервые наблюдалось в 1839 г. А.Э. Беккерелем [17]. Спустя более ста лет, в 1954 г. в США был сконструирован первый кремниевый полупроводниковый фотодиод с коэффициентом полезного действия $\eta_{\phi} = 5 \%$. На данный момент КПД современных кремниевых солнечных элементов в лабораторных условиях достигает $\eta_{\phi} = 25 \%$ [12]. Солнечная энергия для питания бортовых приборов использовалась на отечественных и зарубежных орбитальных спутниках Земли уже в 1958 г. [17].

В настоящее время в более чем тридцати странах мира широко используется процесс прямого преобразования солнечной энергии в электрическую с помощью фотоэлектрических батарей. Наиболее распространенным типом фотоэлектрических преобразователей, применяемых в конструкциях фотоэлектрических батарей, является поликристаллический и монокристаллический кремний, объем выпуска которого составляет до 70 % от общего объема выпускаемых преобразователей. Статистика суммарной установленной мощности $P_{\text{стр}}$, ГВт, фотоэлектрических электростанций в странах на 2013 г., по данным Международного энергетического агентства [22], приведена в табл. 4.1.

Крупные фотоэлектрические системы, обслуживающие производственные объекты или районные электрические сети и имеющие мощность более 5...10 МВт, называются солнечными фермами [4], объединяющими тысячи фотоэлектрических батарей. Современные фермы оборудованы батареями с экваториальной монтировкой, т.е. с возможностью следовать за солнцем в течение всего светового дня. Фотоэлектрические батареи присоединяются к электрическим сетям через инверторы и трансформаторы, через которые ток передается в высоковольтные линии электропередач постоянного тока.

Страна	$P_{стр}$, ГВт
Германия	32
Италия	16
Китай	8,5
Соединенные Штаты Америки	7
Япония	6,5
Испания	4
Франция	3
Прочие страны	20
Всего в Море	97

4.2.2. Конструкция и принцип работы фотоэлектрической батареи

Фотоэлемент (фотоэлектрическая ячейка, фотоэлектрический преобразователь) – вид полупроводникового диода, который преобразует видимый свет, инфракрасное и ультрафиолетовое излучение в электричество. Фотоэлементы, изготавливаемые из обработанного кремния, называются фотогальваническими элементами [9, 17, 20]. Принцип работы фотоэлемента основан на внутреннем фотоэффекте – перераспределении электронов по энергетическим состояниям в твердых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящем под действием электромагнитного излучения.

Принципиальная схема монокристаллического кремниевого фотоэлемента приведена на рис. 4.16. Фотоэлемент состоит из двух слоев кремния, покрытых со стороны падения солнечных лучей антиотражающим светопрозрачным покрытием 1, а с обратной стороны – с нанесенными последовательно слоями алюминия 4, титана 5, палладия 6 и либо никеля, либо серебра 7. На обеих сторонах устанавливаются сетчатые токосъемные контакты 8. В верхнем слое кремния толщиной $\delta_{верх} = 0,2...0,5$ мкм [17], легированном атомами фосфора, мышьяка или сурьмы, преобладают свободные электроны (отрицательная n -проводимость).

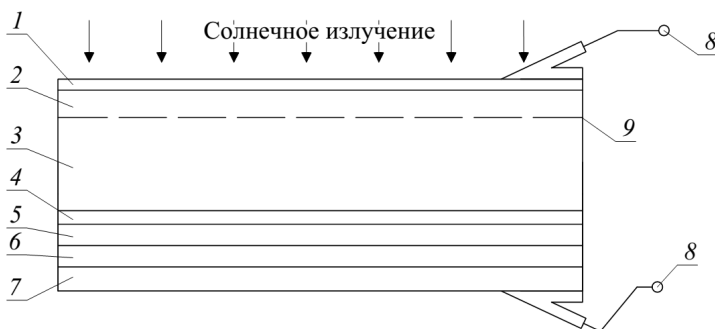


Рис. 4.16. Принципиальная схема монокристаллического кремниевого фотоэлемента: 1 – антиотражающее светопрозрачное покрытие; 2 – слой кремния с *n*-проводимостью; 3 – то же, с *p*-проводимостью; 4 – алюминий; 5 – титан; 6 – палладий; 7 – никель; 8 – сетчатый токосъемный контакт; 9 – область *p-n* перехода

Базовый слой с $\delta_{\text{верх}} = 200 \dots 400$ мкм состоит из кремния с добавлениями бора, алюминия, галлия или индия, что создает в нем положительные носители – дырки (положительная *p*-проводимость).

На границе соприкосновения двух слоев создается область *p-n* перехода, представляющая собой диод. При облучении или нагреве *p-n* перехода фотоэлемента происходит создание свободных носителей заряда и перенос их через *p-n* переход. При замыкании внешней цепи фотоэлемента по ней потечет ток, величина которого пропорциональна энергетической освещенности светового потока E , Вт/м², или тепловому воздействию. Процесс передачи энергии фотонов света к электронам полупроводника имеет свои особенности для различных материалов.

Фотоэлектрический модуль представляет собой совокупность последовательно или параллельно соединенных между собой фотоэлементов.

Фотоэлектрическая батарея является электрически соединенными между собой фотоэлектрическими модулями (рис. 4.17). Коэффициенты полезного действия $\eta_{\text{ф}}$ современных фотоэлементов, изготовленных из различных конструктивных материалов в лабораторных условиях, могут достигать 0,3...0,4, как указано в табл. 4.2 [12, 20], однако, в реальных условиях эксплуатации, как правило, не превышают $\eta_{\text{ф}} = 0,2$.

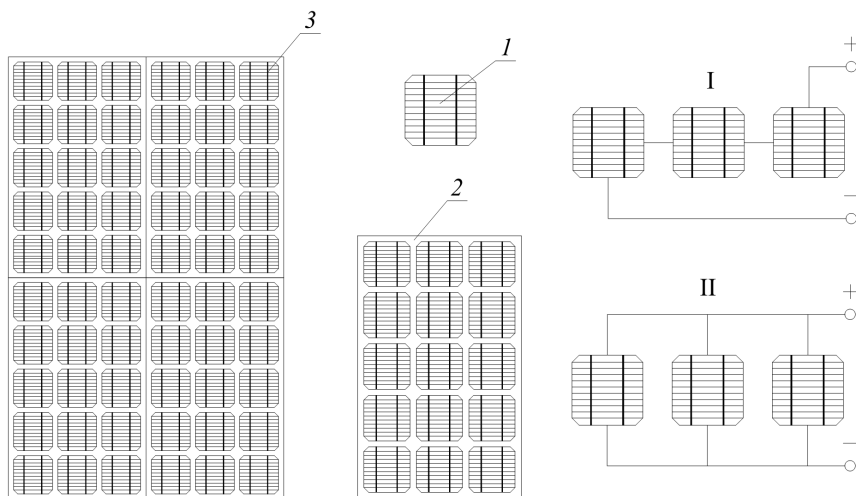


Рис. 4.17. Конструкция фотоэлектрической батареи: 1 – фотоэлемент; 2 – фотоэлектрический модуль; 3 – фотоэлектрическая батарея; I – последовательное соединение фотоэлементов; II – параллельное соединение фотоэлементов

Таблица 4.2

Лабораторные коэффициенты полезного действия различных типов фотоэлементов

Тип фотоэлемента	η_f , %
1. Многопереходные элементы:	
- с линзой Френеля	44
- трехпереходные	36
- двухпереходные	32
2. Кристаллические кремниевые элементы:	
- монокристаллические	25
- поликристаллические	20
- тонкий кремний	18
3. Арсенид галлия (GaAs)	25
4. Тонкопленочные элементы:	
- купрум-индий диселенид (CuInSe ₂)	15
- телурид кадмия (CdTe)	15
- аморфный кремний (a-Si)	12
5. Фотохимические	10
6. Органические элементы	5

Фотоэлектрические системы электроснабжения имеют различную по сложности конструкцию, что не мешает выделить типовую принципиальную схему, свойственную для большинства бытовых фотоэлектрических систем, приведенную на рис. 4.18. Постоянный ток низкого напряжения фотоэлектрических батарей 1, объединенных через соединительную коробку 2, подается в

инвертор 5, где преобразуется в переменный ток с требуемым напряжением $U = 220 \text{ В}$, и поступает в систему освещения 7 или к бытовым электропотребляющим приборам 8. При малом потреблении электрической энергии её накапливают в блоке аккумуляторов 4. Контроллер заряда аккумуляторных батарей 3 предназначен для предотвращения губительных для батарей глубокого разряда и перезаряда. Для сервисного обслуживания фотоэлектрических батарей эксплуатируемую кровлю требуется оборудовать люком 6.

Фотоэлектрическая система электроснабжения должна дублироваться резервным источником электропитания, в качестве которого, как правило, используют бензоэлектродгенераторы или дизельэлектродгенераторы.

Наличие резервного источника позволяет, в первую очередь, значительно снизить расчетное количество фотоэлементов за счет отсутствия необходимости расчета фотоэлектрической системы на наихудшие погодные условия, например, зимние условия эксплуатации, а также за счет снижения требуемой емкости аккумуляторных батарей.

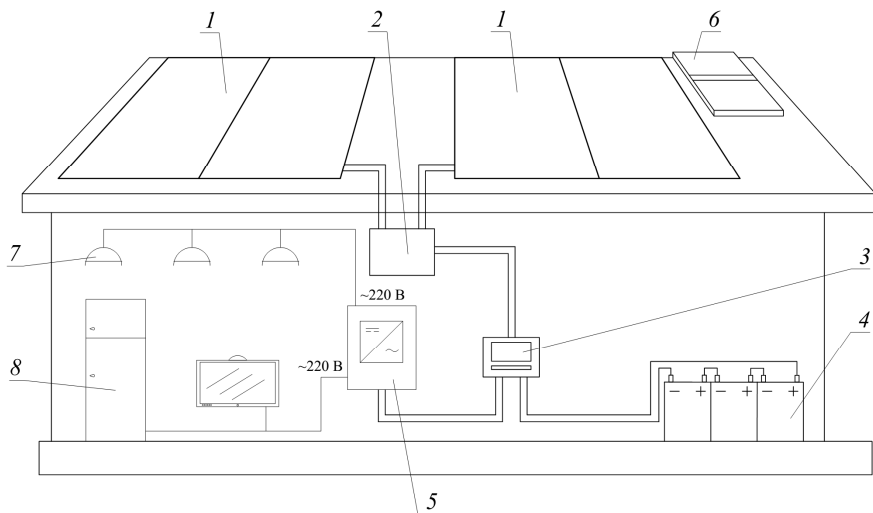


Рис. 4.18. Принципиальная схема электроснабжения жилого дома с применением фотоэлектрических модулей: 1 – фотоэлектрические батареи; 2 – соединительная коробка; 3 – контроллер заряда аккумуляторных батарей; 4 – блок аккумуляторов; 5 – инвертор; 6 – люк для обслуживания; 7 – система внутреннего освещения; 8 – электропотребляющие приборы

4.2.3. Характеристики фотоэлементов

Находящийся под действием солнечной радиации фотоэлемент может быть рассмотрен как диод, состоящий из полупроводников n -типа и p -типа с образованной зоной, обедненной носителями (рис. 4.19 [20]).

Ток I , А, протекающий по фотоэлементу определяется по формуле:

$$I = I_{\text{фт}} - I_{\text{диф}} \left[\exp\left(\frac{U_{\text{диф}}}{mU_{\text{тн}}}\right) - 1 \right], \quad (4.18)$$

где $I_{\text{фт}}$ – фототок источника питания, А; $I_{\text{диф}}$ – ток насыщения фотоэлемента, А; $U_{\text{диф}}$ – напряжение насыщения, В; m – фактор диода, $m \approx 1$; $U_{\text{тн}}$ – температурное напряжение фотоэлемента при 25 °С, В, $U_{\text{тн}} = 25,7$ мВ.

Током насыщения или диффузионным током $I_{\text{диф}}$ называется ток, проходящий через переход при обратном смещении, меньше напряжения пробоя, для фотоэлементов $I_{\text{диф}} \approx 10^{-10}$ А.

Фототок, вырабатываемый источником питания, равен

$$I_{\text{фт}} = kq_{\text{ср}}, \quad (4.19)$$

где k – коэффициент пропорциональности приходящей солнечной радиации, А·м²/Вт; $q_{\text{ср}}$ – солнечная радиация приходящая на фотоэлемент, Вт/м².

Оптимальная выходная мощность элемента фотоэлектрического модуля $P_{\text{опт}}$, Вт, может быть определена по формуле [9]:

$$P_{\text{опт}} = \xi I_{\text{к}} U_{\text{к}}, \quad (4.20)$$

где ξ – коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики (фактор кривизны), показывающий степень приближения формы характеристики к прямоугольной, $\xi = 0,75 \dots 0,9$; $I_{\text{к}}$ – ток короткого замыкания; $U_{\text{к}}$ – напряжение короткого замыкания.

Данная зависимость в графической форме, в качестве вольт-амперной характеристики $I = f(U)$ фотоэлемента и зависимости его мощности от напряжения $P = f(U)$, приведена на рис. 4.20 и 4.21, соответственно. Точка на кривой вольт-амперной характеристики, соответствующая оптимальной выходной мощности $P_{\text{опт}}$ (максимальной), называется точкой пиковой мощности.

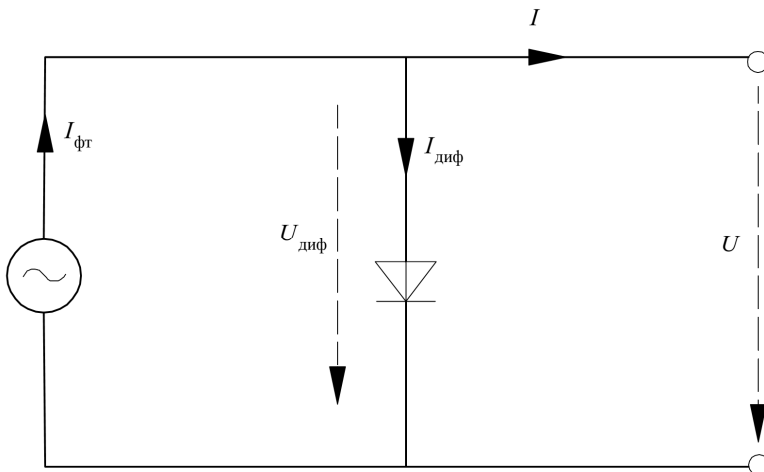


Рис. 4.19. Схема замещения освещенного фотоэлемента

Коэффициент полезного действия фотоэлемента, $\eta_{\text{ф}}$, %, равен [14]:

$$\eta_{\text{ф}} = \frac{P_{\text{опт}}}{F_{\text{ф}} E_{\text{э}}} \cdot 100, \quad (4.21)$$

где $F_{\text{ф}}$ – площадь фотоэлемента, м^2 ; $E_{\text{э}}$ – эталонная энергетическая освещенность, $E_{\text{э}} = 1000 \text{ Вт/м}^2$.

Как видно из рис. 4.22 [12], с ростом энергетической освещенности E , Вт/м^2 , увеличивается оптимальная мощность $P_{\text{опт}}$, Вт , и ток $I_{\text{опт}}$, А , при практически неизменяющемся оптимальном напряжении $U_{\text{опт}}$, В . В режиме холостого хода напряжение достигает своего максимального значения $U = U_{\text{хх}}$ при сопротивлении активной нагрузки $R = \infty$. При коротком замыкании напряжение фотоэлемента $U = 0$, а ток достигает своего максимального значения $I = I_{\text{к}}$, при сопротивлении $R = 0$.

На рис. 4.23 приведена зависимость вольтамперной характеристики фотоэлектрического модуля при различных величинах энергетической освещенности E , Вт/м^2 , и постоянной температуре фотоэлементов $t_{\text{ф}} = \text{const}$.

На рис. 4.24 приведена зависимость вольтамперной характеристики от температуры фотоэлемента $t_{\text{ф}}$, $^{\circ}\text{C}$. Чем выше температура фотоэлемента, тем меньше его фактическая активная мощность P .

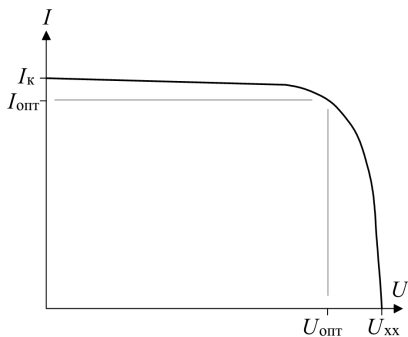


Рис. 4.20. Вольт-амперная характеристика фотоэлемента

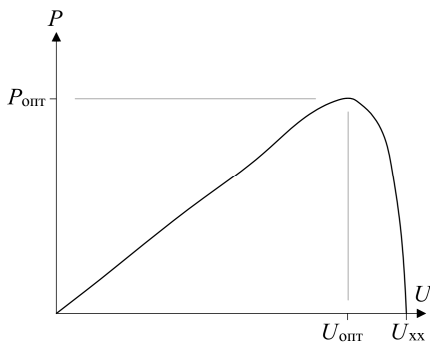


Рис. 4.21. Зависимость мощности фотоэлемента от напряжения

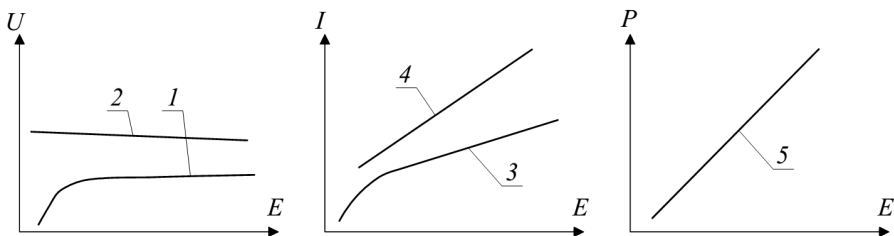


Рис. 4.22. Зависимости основных параметров фотоэлектрического модуля от энергетической освещенности: 1 – $U_{\text{опт}}$; 2 – U_{xx} ; 3 – $I_{\text{опт}}$; 4 – I_k ; 5 – $P_{\text{опт}}$

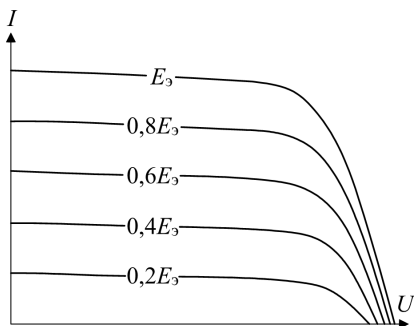


Рис. 4.23. Зависимости вольт-амперной характеристики фотоэлемента от энергетической освещенности при $t_{\phi} = \text{const}$; E_3 – эталонная энергетическая освещенность

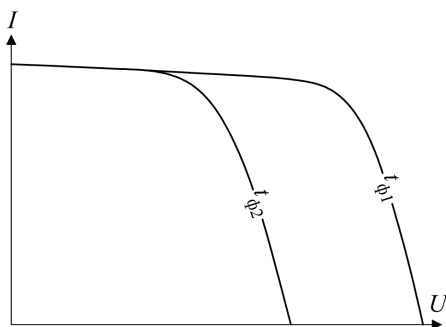


Рис. 4.24. Зависимость мощности фотоэлемента от его температуры: $t_{\phi 1}$, $t_{\phi 2}$ – температуры фотоэлемента; соотношение $t_{\phi 1} < t_{\phi 2}$

Вольт-амперные характеристики фотоэлектрических модулей, состоящих из нескольких фотоэлементов приведены на рис. 4.24. У модулей с последовательным соединением фотоэлементов складываются значения напряжений, а у параллельно соединенных – значения токов. Батареи, собираемые из большого количества фотоэлектрических модулей, имеют вольтамперные характеристики, требующие более подробного анализа.

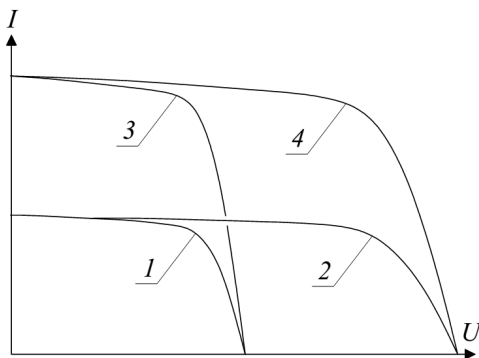


Рис. 4.24. Зависимость вольт-амперной характеристики фотоэлектрического модуля в зависимости от последовательности соединения его фотоэлементов: 1 – состоящего из одного фотоэлемента; 2 – из двух фотоэлементов, соединенных последовательно; 3 – из двух фотоэлементов, соединенных параллельно; 4 – из четырех фотоэлементов соединенных друг с другом последовательно и параллельно или параллельно и последовательно

4.3. Контрольные вопросы для самостоятельной работы

1. Опишите конструкцию и принцип работы промышленной ветроэнергетической установки.
2. Чему равен коэффициент полезного действия ветроколеса?
3. Каков физический смысл критерия Бетца?
4. Опишите основные схемы подключения ветроэлектрогенераторов к сети.
5. Дайте определение коэффициента использования мощности ветроприемного устройства ветроэнергетической установки.
6. Опишите принцип работы фотоэлектрической батареи.
7. Из каких элементов состоит схема электроснабжения жилого дома с применением фотоэлектрических модулей?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авезов, Р.Р. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения / Р.Р. Авезов, М.А. Барский-Зорин, И.М. Васильев и др.; Под ред. Э.В. Сарнацкого и С.А. Чистовича. – М.: Стройиздат, 1990. – 328 с.: ил.
2. Амерханов, Р.А. Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии / Р.А. Амерханов. – М.: КолосС, 2003. – 532 с.
3. Германович, В. Альтернативные источники энергии. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы / В. Германович, А. Турулин. – СПб.: Наука и техника, 2011. – 320 с.
4. Гибилиско, С. Альтернативная энергетика без тайн / С. Гибилиско. – М.: Эксмо, 2010. – 368 с.
5. Голицын, М.В. Альтернативные энергоносители / М.В. Голицын, А.М. Голицын, Н.В. Пронина. – М.: Наука, 2004. – 159 с.
6. ГОСТ 25380-2014. Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. – М.: Стандартинформ, 2015. – 8 с.
7. ГОСТ 31167-2009. Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях. – М.: Стандартинформ, 2011. – 16 с.
8. ГОСТ Р 54852-2011. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций. – М.: Стандартинформ, 2012. – 15 с.
9. Даффи, Д. Основы солнечной теплоэнергетики / Д. Даффи, У. Бекман. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2013. – 888 с.
10. Документация. Расчёт теплового потока на примере трубы ТЕВО technics // Полипропиленовые трубы и фитинги. URL: <http://www.tebo.ru/support/docum/> (дата обращения: 29.10.2017).
11. Евсюков, А.А. Электротехника / А.А. Евсюков. – М.: Просвещение, 1979. – 248 с.
12. Елистратов, В.В. Использование возобновляемой энергии / В.В. Елистратов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 224 с.
13. Инструкция по проектированию. Основные сведения о тепловых насосах. – М.: Viessmann, 2010. – 20 с.
14. Каменев, П.Н. Вентиляция / П.Н. Каменев, Е.И. Тертичник. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2011. – 632 с.
15. Кацман, М.М. Расчет и конструирование электрических машин / М.М. Кацман. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с.
16. Крупнов, Б.А. Отопительные приборы, производимые в России и ближнем зарубежье: научно-популярное издание. – М.: Изд-во АСВ, 2015. – 176 с.
17. Лосюк, Ю.А. Нетрадиционные источники энергии / Ю.А. Лосюк, В.В. Кузьмич. – Минск: УП «Технопринт», 2005. – 234 с.
18. Мирам, А.О. Техническая термодинамика. Теплообмен / А.О. Мирам, В.А. Павленко. – М.: Издательство АСВ, 2011. – 352 с.
19. Настольная книга проектировщика. – Вена: Герц Арматурен ГмБх, 2008. – 192 с.

20. Обозов, А.Д. Возобновляемые источники энергии / А.Д. Обозов, Р.М. Ботпаев. – Бишкек.: КГТУ, 2010. – 218 с.
21. Отопление и охлаждение помещения поверхностью пола, стен и потолка. – М.: – Вена: Герц Арматурен ГмБх, 2010. – 56 с.
22. Развитие солнечных технологий в Мире. Информационная справка. ФГБУ Аналитический центр при Правительстве РФ, 2013. – 9 с.
23. Распределители для систем подпольного отопления. Штанговые распределители. – М.: Herz Armaturen. – 6 с.
24. Рассольно-водяные тепловые насосы для отопления и горячего водоснабжения. – Киев.: Роберт Бош Лтд, 2009. – 95 с.
25. Рекомендации по применению литых под давлением алюминиевых секционных радиаторов т. м. «Fondital» и «Nova Florida» новой серии S5, серии Super и Super Al-eternum, изготавливаемых итальянской компанией «Fondital S.p.A.». – М.: НТФ ООО «Витатерм», 2010. – 44 с.
26. Рекомендации по применению отопительных приборов медно-алюминиевых конвекторов серии «Бриз». – Кирмы: ООО КЗТО «Радиатор». – 31 с.
27. Рекомендации по применению стальных панельных радиаторов «PRADO». – М.: НТФ ООО «Витатерм», 2014. – 50 с.
28. Система внутреннего холодного и горячего водоснабжения и отопления. – М.: Ekoplastik, 2013. – 28 с.
29. Системы электрического отопления. – М.: ООО «ЭнстоРус», 2015. – 48 с.
30. Сканави, А.Н. Отопление / А.Н. Сканави, Л.М. Махов. – М.: Издательство АСВ, 2008. – 576 с.
31. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. – М.: Госстрой России, 2003. – 26 с.
32. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. – М.: ОАО ЦНИИ-Промзданий, 2004. – 139 с.
33. СП 31-106-2002. Проектирование и строительство инженерных систем одноквартирных жилых домов. – М.: ФГУП ЦПП, 2002. – 22 с.
34. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – М.: ФАУ «ФЦС», 2012. – 95 с.
35. СП 55.13330.2016. Дома жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31-02-2001. – М.: Стандартинформ, 2016. – 34 с.
36. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. – М.: ФАУ «ФЦС», 2012. – 75 с.
37. СП 230.1325800.2015. Конструкции ограждающие зданий. Характеристики тепло-технических неоднородностей. – М.: ФАУ «ФЦС», 2015. – 72 с.
38. СТО 501-52-01-2007. Проектирование и возведение ограждающих конструкций жилых и общественных зданий с применением ячеистых бетонов в Российской Федерации. – М.: Ассоциация строителей России, 2007. – 40 с.
39. Теплый плинтус: паспорт изделия. – М.: ООО «Орион», 2017 – 10 с.

40. Терморегулирующая и запорная арматура. Памятка монтажника. – М.: Herz Armaturen. – 72 с.
41. Файст, В. Основные положения по проектированию пассивных домов. – М.: Издательство ассоциации строительных вузов. – 144 с.
42. Шпаннеберг, Х. Электрические машины: 1000 понятий для практиков / Х. Шпаннеберг. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 252 с.
43. Энергосберегающие отопительные конвекторы с автоматическими терморегуляторами Danfoss. Каталог-рекомендации. – М.: ООО «Данфосс», 2011. – 27 с.
44. Яушовец, Р. Гидравлика – Сердце водяного отопления / Р. Яушовец. – Вена: Герц Арматурен ГмБх, 2005. – 198 с.
45. AWADUKT THERMO. Грунтовые теплообменники системы вентиляции. Техническая информация. – М.: Rehau, 2009. – 40 с.
46. Byggforskserien [Электронный ресурс] // SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer. URL: <https://bks.byggforsk.no/DrillDown.aspx?sectionId=2&portalMenuId=0&nodeId=2> (дата обращения: 18.05.2015).
47. Chiras, D. Wind Power. Basics / D. Chiras. – Gabriola Island, Canada: New Society Publishers, 2010. – 180 p.
48. E-126 EP8 [Электронный ресурс] / Enercon. Energy for the World. URL: <http://www.enercon.de> (дата обращения: 12.08.2015).
49. Ground-air heat exchanger systems. Carclaze community primary school, st austell, cornwall. – London: Rehau, 2009. – 2 с.
50. Hausbaudämmung mit Strohballen [Электронный ресурс] // BAUWOHNWELT. URL: <http://www.bauwohnewelt.at/bauen-und-wohnen/renovieren/innenausbau/hausbaudämmung-mit-strohballen/> (дата обращения: 12.08.2015).
51. Schneller dämmen im Großformat [Электронный ресурс] // VARIOTEC. URL: <http://variotec-presse.de/hp1456/Schneller-daemmen-im-Grossformat.htm> (дата обращения 12.08.2015).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. ТЕПЛОВОЙ КОНТУР ПАССИВНЫХ ДОМОВ.....	7
1.1. Общие принципы конструирования.....	7
1.2. Наружные стены.....	9
1.3. Покрытия и перекрытия.....	19
1.4. Светопрозрачные конструкции.....	22
1.5. Повышение теплотехнической однородности элементов наружных ограждающих конструкций.....	23
1.6. Контрольные вопросы и задания для самостоятельной работы.....	29
Глава 2. ОТОПЛЕНИЕ ПАССИВНЫХ ДОМОВ.....	30
2.1. Общие принципы конструирования.....	30
2.2. Конвекторное и радиаторное отопление.....	33
2.3. Напольное отопление.....	38
2.4. Плинтусное отопление.....	41
2.5. Трубопроводы систем отопления.....	42
2.6. Электрическое отопление.....	43
2.7. Воздушное отопление.....	45
2.8. Пассивные системы солнечного отопления.....	47
2.9. Контрольные вопросы и задания для самостоятельной работы.....	51
Глава 3. ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЯ ПАССИВНЫХ ДОМОВ.....	52
3.1. Общие принципы конструирования.....	52
3.2. Теплоснабжение систем отопления и горячего водоснабжения.....	55
3.3. Солнечные коллекторы систем теплоснабжения.....	63
3.4. Приточно-вытяжная вентиляция.....	67
3.5. Контрольные вопросы и задания для самостоятельной работы.....	71
Глава 4. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПАССИВНЫХ ДОМОВ.....	72
4.1. Ветроэлектрогенераторы.....	72
4.1.1. Общие сведения о ветроэнергетических установках.....	72
4.1.2. Конструкция и принцип работы промышленных ВЭУ.....	73
4.1.3. Основные характеристики ветроприемных устройств ВЭУ.....	77

4.1.4. Принцип работы и основные характеристики генераторов ВЭУ.....	83
4.1.5. Схемы подключения ветроэлектрогенераторов к сети.....	85
4.2. Фотоэлектрические батареи.....	95
4.2.1. Общие сведения о фотоэлектрических батареях.....	95
4.2.3. Конструкция и принцип работы фотоэлектрической батареи.....	96
4.2.3. Характеристики фотоэлементов.....	100
4.3. Контрольные вопросы и задания для самостоятельной работы.....	103
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	105

Бодров Валерий Иосифович
Бодров Михаил Валерьевич
Кузин Виктор Юрьевич
Шевченко Жанна Анатольевна

Инженерные основы создания пассивных домов

Учебник

Подписано в печать 04.10.15. Формат 60×90, 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Уч. изд. л. 9,4. Усл. печ. л. 9,8. Тираж 300 экз. Заказ № 17.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования

«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.

<http://www.nngasu.ru>

Типография «Юнион Принт», 603002, г. Нижний Новгород, ул. Окский съезд, д. 2