



Методика и алгоритмы расчёта энергоэффективных систем сельского домохозяйства с использованием ВИЭ

Рецензия эксперта на статью получена 04.02.2026 [The expert review of the article was received on February 4, 2026]

Актуальность проблемы

По опыту нашей страны, частные домохозяйства в течение многих десятилетий вносили значительный вклад в снабжение населения продукцией сельского хозяйства и обеспечение продовольственной безопасности России. На приусадебных и дачных участках, используя простейшие парники и теплицы сезонного действия, выращивается практически весь набор овощей и фруктов, необходимых населению. Одновременно развивалось строительство мощных тепличных хозяйств круглогодичного действия, сооружение и эксплуатация которых базировалась на нормативных документах агропромышленного комплекса по проектированию зданий и помещений, методических материалов по технологическому проектированию. Для теплиц круглогодичного действия в осенне-зимнее время нормировалась дополнительная освещённость и температура. Отопление теплиц в этот период осуществляется за счёт сжигания органического топлива.

Актуальность этой проблемы на государственном уровне обозначена в Указе Президента РФ №683 «О стратегии национальной безопасности Российской Федерации», в котором ставится задача обеспечения продовольственной независимости России [1].

Наиболее полно проблема рассмотрена в «Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации», утверждённой Указом Президента РФ № 20 [2], в которой ставится задача устойчивого развития и модернизации сельского и рыбного хозяйства и инфраструктуры внутреннего рынка. Она направлена на реализацию положений продовольственной доктрины России, в частности, «разработку и реализацию программ технической и технологической модернизации, в том числе внедрение новой техники и технологий, обеспечивающих повышение производительности труда, энергоэффективность, ресурсосбережение и снижение потерь в сельском и рыбном хозяйстве» (п. 19, н), а также на «пре-

УДК 620.92. Научная специальность: 2.4.5.

Методика и алгоритмы расчёта энергоэффективных систем сельского домохозяйства с использованием ВИЭ

Павел Павлович Безруких, д.т.н., профессор, кафедра «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии», Институт гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии (ИГВИЭ) Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»); **Андрей Викторович Тимеров**, к.т.н., генеральный директор ООО «АльтЭнергия»

В статье приведена методика и алгоритмы расчёта энергоэффективных систем сельского домохозяйства с использованием ВИЭ. Описано сооружение, названное «БиоДом», в котором жилое помещение и теплица (биоветерарий) связаны конструктивно и имеют общие системы электро- и теплоснабжения. Представлены системы электро- и теплоснабжения, в которых используется солнечная энергия. Предложена оригинальная система отопления/охлаждения с использованием тепла грунта. Приведены схемы и алгоритмы работы систем автоматизации всех систем энергоснабжения, при этом одна система не содержит традиционных автоматических устройств, а управляется поступлением солнечной энергии. Приводится оценка возможности применения и внедрения описанных технических решений на различных климатических условиях. Приведён расчёт простого срока окупаемости с учётом передачи электроэнергии в сеть в соответствии с законом «О микрогенерации».

Ключевые слова: сельское хозяйство, домохозяйство, микрогенерация, «БиоДом», биоветерарий, теплица, климатические условия, энергоэффективность, ВИЭ, солнечная энергия, инсоляция, фотоэлектрическая система, электроснабжение, теплоснабжение, отопление, охлаждение, автоматика, срок окупаемости, электрическая энергия, тепловая энергия.

UDC 620.92. Scientific specialty number: 2.4.5.

Methods and algorithms for calculating energy-efficient systems of rural households using renewable energy sources

Pavel P. Bezrukh, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Department of "Hydropower and Renewable Energy Sources" (HPRES), Institute of Hydropower and Renewable Energy Sources (IGIE) of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **Andrey V. Timerov**, PhD (Engineering), General Director of "AltEnergy", LLC

The article provides a methodology and algorithms for calculating energy-efficient systems of a rural household using renewable energy sources. A structure called a "BioDome" (BioHouse) is described, in which a dwelling and a greenhouse (bi-ovegetarium) are structurally connected and have common electrical and heat supply systems. Electrical and heat supply systems are presented, in which solar energy is used in heat and power supply schemes, as well as in the automation system. An original heating/cooling system using ground heat is proposed. The diagrams and algorithms of the automation systems of all power supply systems are presented, while one system does not contain traditional automatic devices, but is controlled by the supply of solar energy. The assessment of the possibility of applying and implementing the described technical solutions in various climatic conditions is given. The results obtained over a five-year period of operation are considered. The calculation of the simple payback period is given, taking into account the transmission of electricity to the grid in accordance with the "On Microgeneration" Federal Law of Russia.

Key words: agriculture, household, microgeneration, "BioDome" (BioHouse), bio-vegetarium, greenhouse, climatic conditions, energy efficiency, renewable energy, solar energy, insolation, photovoltaic system, power supply, heat supply, heating, cooling, automation, payback period, electric energy, thermal energy.

одоление резких региональных различий в социально-экономическом развитии и очагов депрессивности на сельских территориях» (п. 23, в) и др.

Принципиально новые возможности для индивидуальных домохозяйств открыл Федеральный закон № 471-ФЗ [3], в котором была зафиксирована возможность домовладельцев отдавать в сеть излишки электроэнергии, вырабатываемые на базе ВИЭ мощностью до 15 кВт. Это значительно повышает эффективность сооружения установок малой мощности на базе ВИЭ в домохозяйствах.

Объект исследования

Объектом исследования является сооружение «БиоДом», в котором конструктивно и энергетически объединены жилое помещение и биовегетарий (теплица), с обоснованием состава жизнеобеспечивающих систем на базе ВИЭ [4–8]. К конструкции «БиоДома» установлены следующие требования:

1. Возможность транспортировки конструкций, стройматериалов и оборудования к месту сооружения «БиоДома» при помощи доступных транспортных средств, причём перевозимые конструкции должны иметь габаритные размеры, позволяющие свободно транспортировать их по дорогам общего пользования.
2. Сооружение биовегетария должно осуществляться из заготовленных металлоконструкций на месте двумя строителями, один из которых должен иметь специальность сварщика, без особых подъёмных приспособлений.
3. Скат (верхняя овальная прозрачная часть крыши) биовегетария должен быть рассчитан на снеговую, ветровую и все остальные нагрузки без применения каких-либо дорогостоящих покрытий.
4. Возможность установки гибридной фотоэлектрической станции (ФЭС) мощностью 3,84 кВт на скате биовегетария.
5. Обеспечение минимизации затрат на фундамент.
6. Возможность предусмотреть заглубление биовегетария в грунт для создания грунтового теплоаккумулятора для накопления тепловой энергии воздуха (соответственно, фундамент «БиоДома» должен быть выполнен с учётом заглубления биовегетария на 2 м).
7. Возможность предусмотреть вытяжку горячего воздуха из помещений.
8. Возможность обеспечить работу как в автономном режиме, так и с подключением к электросети общего пользования.

Основные конструктивные решения, реализующие указанные выше требования, перечислены далее.



Конструкция «БиоДома»

1. Общее описание конструкции. Габаритные размеры строения (д × ш × в) равны 12 × 7,4 × 5 м. По всей длине здания сторона, обращённая к солнцу, принадлежит биовегетарию. Ширина биовегетария — 5 м, при этом основание его углублено на 2 м для возможности засыпки грунтом нужного качества. В поперечном сечении прозрачная стена биовегетария представляет собой четверть окружности с радиусом 5 м. Этим обеспечивается резкое снижение ветровых и снеговых нагрузок. Внутренняя стена биовегетария отделяет его от двухэтажного жилого и производственного помещений.

2. Конструктив жилого и производственного помещений

Первый этаж «БиоДома» представляет собой стандартный 40-футовый (12-метровый) морской контейнер с габаритными размерами (д × ш × в) 12 × 2,4 × 2,9 м. Его утеплили внутри, обшили вагонкой и создали следующее жизненное пространство: две отдельные спальни; полноценный санузел с душевой, стиральной машиной, унитазом и раковиной; прихожая; полноценная кухня 2,5 м в длину, с холодильником и столом на четыре человека.

Второй этаж — деревянное каркасное строение, выстроенное над контейнером. В нём три помещения — два жилых и одно техническое. В техническом помещении размещены все системы жизнеобеспечения — гибридная система электроснабжения, система ГВС и отопления.

3. Биовегетарий

Покрытие ската биовегетария выполнено из сотового поликарбоната (одного из лучших производителей) толщиной 6 мм с защитой от ультрафиолета. Геометрия самого ската имеет привязанность к нашему варианту строения «БиоДома» и составляет $\frac{1}{4}$ окружности. Снаружи биовегетария, над поликарбонатом, в самой высокой точке установлены солнечные модули, которые подключены к инвертору гибридной системы электроснабжения.

К гибричному инвертору также подключена сеть общего пользования, которая используется, когда отсутствует солнечная активность. При отключении сети общего пользования и отсутствии солнечной активности все потребители, которые подключены к инвертору и являются гарантированной нагрузкой, питаются от аккумуляторной батареи (АКБ). В таком режиме у АКБ уменьшается количество циклов «заряд/разряд», тем самым увеличивается время эксплуатации.

4. Фундамент

Фундамент «БиоДома» выполнен несколькими способами. Под жилым помещением — бетонные сваи диаметром 50 см разной глубины. Фундамент биовегетария сделан отдельно. Со стороны биовегетария глубина составляет 3,5 м, с противоположной — 0,7 м.

5. Теплоаккумулятор

В биовегетарии применён самый простой, недорогой и максимально эффективный грунтовый аккумулятор теплоты. Основной конструктивный элемент — воздуховоды диаметром 100 мм, которые берут начало в верхней точке биовегетария, проложены по его внутренней стене, затем проходят под слоем почвы в заглублении биовегетария на глубине 60 см и выходят на поверхность около стены, обращённой к солнцу. На концах воздуховодов установлены вытяжные вентиляторы, подключённые напрямую к фотоэлектрическому модулю. При наличии солнечной инсоляции на поверхности модуля на выходе модуля появляется электрическая мощность, достаточная для приведения вентиляторов во вращение. В результате проходящий по трубам нагретый воздух нагревает грунт биовегетария. После захода солнца вентиляторы останавливаются, и температура воздуха в биовегетарии поддерживается за счёт остывания грунта. При ширине биовегетария 5 м, длине 12 м и толщине 0,6 м объём грунтового теплоаккумулятора составил 36 м³. В результате получена полностью автоматическая система, без средств автоматики, управляемая солнечной энергией. Данная система работает с поздней осени до ранней весны, затем отключается.

6. Вытяжка горячего воздуха осуществляется через установленную вентиляционную установку. Вытяжка работает в двух режимах: «зима» и «лето».

7. «БиоДом» может существовать в автономном режиме. Для этого понадобится дополнительно установить бензиновый, газовый или дизельный генератор соответствующей мощности.

Системы теплоснабжения «БиоДома»

1. Алгоритм функционирования системы пассивного отопления/охлаждения

При температуре наружного воздуха около нуля и ниже (в городе Тимашевске Краснодарского края, где находится «Био-Дом», зимой температура нередко доходит до -20°C) вода из скважины с температурой $+10...+12^{\circ}\text{C}$ является источником теплоты.

Таким образом, тепловая энергия не производится за счёт сжигания топлива или использования электроэнергии, а перемещается из скважины с водой и передаётся далее воздуху через фанкойлы, обдуваемые внутри установленными вентиляторами. Такой температуры воды, конечно, недостаточно для комфортного проживания. В этом случае к отоплению подключаются другие, указанные ниже системы. Однако эта система существенно снижает требование к объёму потребления энергии для отопления. Если в данный момент в жилом модуле никто не проживает, то плюсовую температуру поддерживает пассивная система [4].

При температуре наружного воздуха $+30^{\circ}\text{C}$ и выше система работает на охлаждение. Охладителем является та же вода из скважины с температурой $+10...+12^{\circ}\text{C}$. Охлаждение производится за счёт воздуха, обдуваемого фанкойлы с холодной водой. При этом нагревается и сама вода из скважины — она используется непосредственно для полива огорода и деревьев или накапливается в ёмкостях для полива. Таким образом, в обоих случаях электроэнергия расходуется лишь для работы скважинного насоса (380 Вт) и четырёх вентиляторов (4×15 Вт). Система защищена патентом № 137793 [4].

2. Расчёты, выполняемые для системы пассивного отопления/охлаждения

Алгоритмом расчёта системы пассивного отопления/охлаждения предусмотрены следующие действия:

а) определение передаваемой мощности:

$$Q_{\text{вод}} = W_{\text{вод}} \rho_{\text{вод}} c_{\text{вод}} (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}), \quad (1)$$
отсюда:

$$Q_{\text{вод}} = 3,5 \text{ м}^3/\text{ч} \times 998 \text{ кг}/\text{м}^3 \times 4,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}) \times (12,5^{\circ}\text{C} - 8,6^{\circ}\text{C}) = 57\,215,34 \text{ кДж}/\text{ч} = 15,89 \text{ кВт};$$

б) определение передаваемой тепловой энергии, которое производится с учётом длительности работы системы (потреблённая за сутки электрическая энергия — 12,48 кВт·ч, полученная тепловая энергия — 381,74 кВт·ч, за отопительный период потребляется 773,76 кВт·ч электроэнергии и производится 23 667,88 кВт·ч тепловой энергии, что в 30,6 раз больше, чем потребляется электроэнергия).

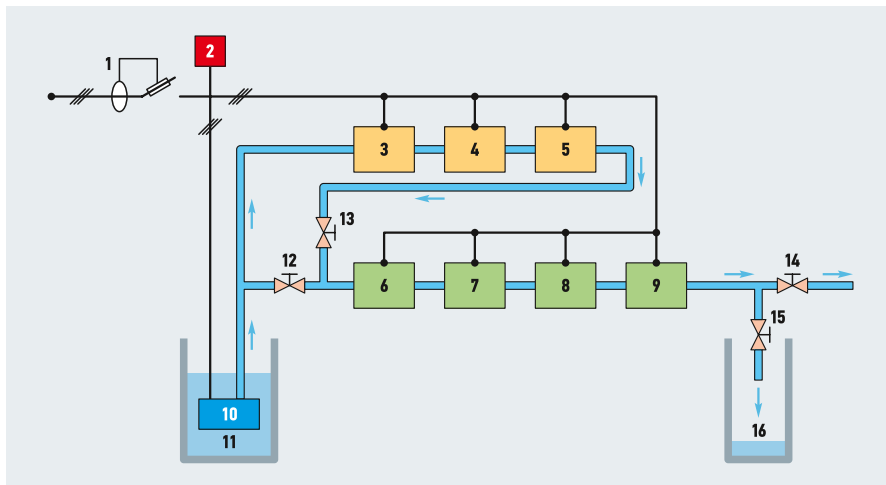


Рис. 1. Схема пассивной системы обогрева/охлаждения «БиоДома» [1 — автомат №8 (220 В); 2 — температурный датчик; 3–5 — фанкойлы жилого модуля; 6–9 — фанкойлы биогеотарии; 10 — погружной насос; 11 — напорная скважина; 12–15 — краны управления; 16 — сливная скважина]

3. Алгоритм функционирования системы ГВС и водяного отопления

Нагрев воды в системе горячего водоснабжения (ГВС) обеспечивается различными устройствами. Это солнечные коллекторы собственного производства, фотоэлектрические модули и сеть общего пользования.

Центральным устройством системы является изготовленный компанией «АльтЭнергия» горизонтальный 1000-литровый бойлер с двумя контурами нагрева. По одному контуру в него передаётся горячая жидкость от солнечных коллекторов, по другому контуру циркулирует горячая вода системы отопления.

Вода от солнечных коллекторов движется самотёком по трубопроводу без насосов и контроллеров. Для поддержания в бойлере необходимой температуры в бойлере установлено две группы электрических ТЭНов, одна из которых работает напрямую от солнечных модулей, а вторая от сети 220 В. Сеть подключается только при необходимости, когда температура в бойлере ниже установленной.

4. Алгоритм функционирования системы воздушного отопления

Данная система является основной для биогеотарии. Она полностью не зависит от присоединения к сети 220 В и «человеческого фактора». Смысл её заключается в следующем. При появлении солнечной освещённости фотоэлектрический модуль начинает вырабатывать электроэнергию. Он напрямую подключён к нескольким маломощным вентиляторам, которые засасывают максимально тёплый воздух из самой высокой точки биогеотарии и направляют его в воздуховоды № 1–8, расположенные под грунтом теплицы. Таким образом происходит принудительная конвекция воздушных масс и передача тепла грунту. В данном случае грунт является теплоаккумулятором — самым простым и недорогим. Также грунт очень хорошо распределяет тепло по всей площади биогеотарии в тот момент, когда солнце уже не светит. Далее за счёт свободной конвекции нагретый от грунта воздух поднимается вверх, и в теплице поддерживается температура воздуха на

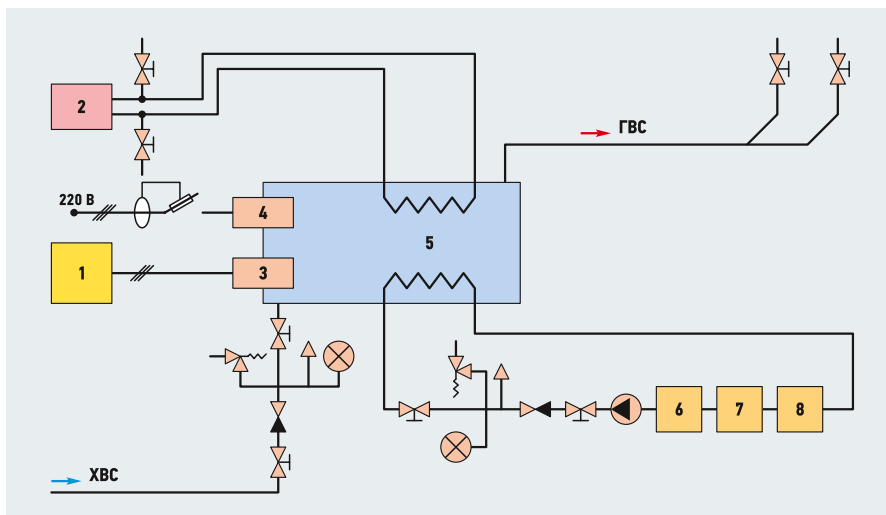


Рис. 2. Структурная схема системы нагрева воды и водяного отопления «БиоДома» [1 — солнечные модули; 2 — солнечные коллекторы; 3 — электроТЭН (от сети 220 В); 4 — электроТЭН (от ФЭС); 5 — двухконтурный бойлер нагрева воды ёмкостью 1000 л; 6–8 — фанкойлы жилого помещения]

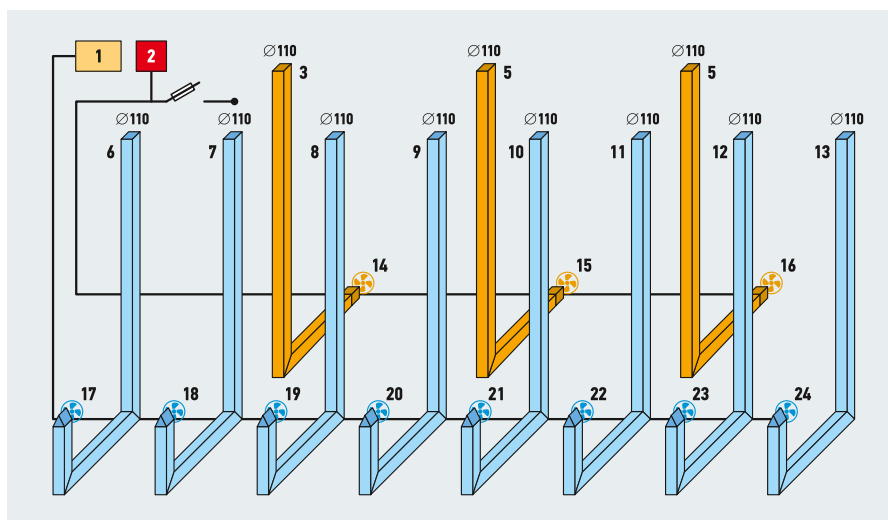


Рис. 3. Структурная схема системы воздушного отопления «БиоДома» [1 — солнечный модуль (150 Вт, 24 В); 2 — датчик температуры; 3–5 — воздухопроводы жилого помещения; 6–13 — воздухопроводы в биоветерии; 17–24 — вентиляторы на постоянном токе]

оптимальном уровне. Таким же образом нагревается воздух в жилом модуле (по воздухопроводам №9–11), с той лишь разницей, что вентиляторы подключены к сети 220 В и включаются от температурного датчика при достижении в верхней точке биоветерии температуры +35 °С.

5. Алгоритм расчёта системы воздушного отопления

5.1. Алгоритм расчёта тепловой мощности, передаваемой в жилой модуль, произведён по формуле, аналогичной (1), только вода заменяется воздухом:

$$Q_{\text{возд}} = W_{\text{возд}} \rho_{\text{возд}} c_{\text{возд}} (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}), \quad (2)$$

в итоге тепловая мощность одного воздухопровода равна:

$$Q_{\text{возд}} = 70,65 \text{ м}^3/\text{ч} \times 1,23 \text{ кг}/\text{м}^3 \times 1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}) \times (45^\circ\text{С} - 21^\circ\text{С}) = 2085,588 \text{ кДж}/\text{ч} = 580 \text{ Вт}.$$

5.2. Количество тепловой энергии, полученной от воздушной системы отопления, поставляемой в жилой модуль за счёт солнечной энергии, определяется временем работы системы, которое принимается равным четыре часа в сутки. Тепловая мощность одного воздухопровода за счёт нагрева воздуха солнечной инсоляцией составляет 580 Вт. В жилой модуль подогретый воздух поступает через три воздухопровода, объём тепловой энергии поступающего воздушного потока равен 6960 Вт·ч в сутки. Работу по перемещению нагретого воздуха совершают три вентилятора, каждый из которых потребляет мощность 8 Вт. В сумме потребляемая вентиляторами за четыре часа энергия составляет $3 \times 8 \times 4 = 96$ Вт·ч. Таким образом, получаемая тепловая энергия в 72,5 раз больше использованной электрической энергии. За весь отопительный сезон полученная энергия составит 1148,4 кВт·ч. Потребление электроэнергии за осень и весну (четыре месяца) со-



ставляет 11,52 кВт·ч, потребление за зиму (три месяца) — 4,32 кВт·ч, итого общее потребление равно 15,84 кВт·ч. В результате получим за период «осень — зима — весна» 1148,4 кВт·ч, а реальное потребление при этом составит 15,84 кВт·ч, что в 72,5 раза меньше.

5.3. Расчёт количества тепловой энергии, передаваемой в биоветерии, производится следующим образом. Расчёт мощности нагрева воздуха биоветерии выполняется по формуле (2), откуда:

$$Q_{\text{возд}} = 132,84 \text{ м}^3/\text{ч} \times 1,23 \text{ кг}/\text{м}^3 \times 1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}) \times (30^\circ\text{С} - 22^\circ\text{С}) = 1307,1456 \text{ кДж}/\text{ч} = 363,4 \text{ Вт}.$$

За четыре часа в сутки от одного воздухопровода биоветерии поступление тепловой энергии составит округлённо $4Q_{\text{возд}} = 1454$ Вт·ч. Суммарно в системе восемь воздухопроводов, итого в помещение биоветерии поступит 11 632 Вт·ч тепловой энергии.

В биоветерии установлены вентиляторы с потребляемой мощностью 6 Вт каждый. Общая потребляемая мощность составляет 48 Вт, а за четыре часа потребление электроэнергии составит 192 Вт·ч.

Поскольку при получении электрической и тепловой энергии не используются внешние источники, соотношение между ними определяется без коэффициентов и равно $K = 11\,632/192 = 60,6$ раз. При этом вентиляторы не подключены к системе электроснабжения, а работают полностью автономно только от солнечного модуля, присоединённого к ним. То есть за получение 11 632 Вт·ч тепловой энергии собственник «БиоДома» не расходует средств в принципе. Но этим не исчерпывается польза рассматриваемой системы. Проходя по воздухопроводу в грунте, воздух передаёт тепло грунту. При этом происходит теплопередача «воздуховод — грунт», что нагревает землю в биоветерии. При

этом грунт биоветерии выполняет роль теплового аккумулятора, который после захода солнца отдаёт тепло обратно в помещение биоветерии. Это очень важная деталь, поскольку исключается необходимость использования подогрева биоветерии за счёт использования покупного топлива или тепловой энергии. Вывод — 11 632 Вт·ч в сутки тепловой энергии собственник получает бесплатно.

В осенние и весенние месяцы (четыре месяца) количество получаемой тепловой энергии составит $11,632 \times 120 = 1395,8$ кВт·ч. В зимние месяцы, принимая время работы системы два часа в сутки, то есть в два раза меньше, чем летом, в сутки получаем 5816 Вт·ч. За зимние месяцы (три месяца) получаем 523,4 кВт·ч тепловой энергии. В результате за период «осень — зима — весна» реально потреблённая тепловая энергия составит 1919,2 кВт·ч, полученных без сжигания топлива на месте сооружения «БиоДома» или из сети общего пользования. Следует отметить, что время работы выбрано условно и с большим занижением реально рабочего времени системы в целом.

Система электроснабжения

1. Постановка задачи. При разработке проекта «БиоДома» и его реализации прежде всего были определены ресурсы возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Ресурсы солнечной и ветровой энергии для Краснодарского края определялись многократно для разных целей и приведены в табл. 4.1 [5].

На стадии строительства было решено отказаться от автономного варианта электроснабжения, но испытать на практике возможность передачи в местную электрическую сеть электроэнергию, производимую на специально сооружённой фотоэлектрической установке (ФЭС) мощностью 15 кВт, в соответствии с Постановлением Правительства РФ № 299 [9] (данное постановление иногда упрощённо называют «Законом о микрогенерации»), и тем самым в некоторой степени компенсировать расходы собственника на сооружение «БиоДома».

Также в «БиоДоме» должна быть предусмотрена фотоэлектрическая гибридная установка, обеспечивающая питание гарантированной нагрузки с учётом возможности её увеличения при расширении тепличной части мощностью 3,84 кВт.

2. Оценка производства электроэнергии фотоэлектрическими установками мощностью 15 кВт и 3,84 кВт. Предварительно с использованием специальной программы PVGIS проведена оценка возможной выработки электроэнергии обеими установками по месяцам года и году. Результаты расчётов представлены на рис. 4. Как видно, годовое производство электрической энергии на ФЭС 15 кВт составило 18 566 кВт·ч, на ФЭС 3,84 кВт — 4753 кВт·ч.

Однако эксплуатация «БиоДома» показала, что электроэнергии, вырабатываемой двумя фотоэлектрическими установками, вполне достаточно для покрытия графика нагрузки, за исключением ночного времени и пасмурных дней и трёх зимних месяцев. Тогда нагрузка частично или полностью запитывается от сети. Расчётное годовое производство электроэнергии на двух фотоэлектрических установках 23 319 кВт·ч. Фактическое годовое потребление от сети равно 5110 кВт·ч, условная годовая экономия составляет 18 209 кВт·ч.

3. Структурная схема электроснабжения «БиоДома» представлена на рис. 5.

Системы автоматики

Для надлежащего функционирования «БиоДома» разработаны и реализованы следующие схемы (рис. 6–13) и алгоритмы автоматизации работы систем жизнеобеспечения жилого помещения и функ-

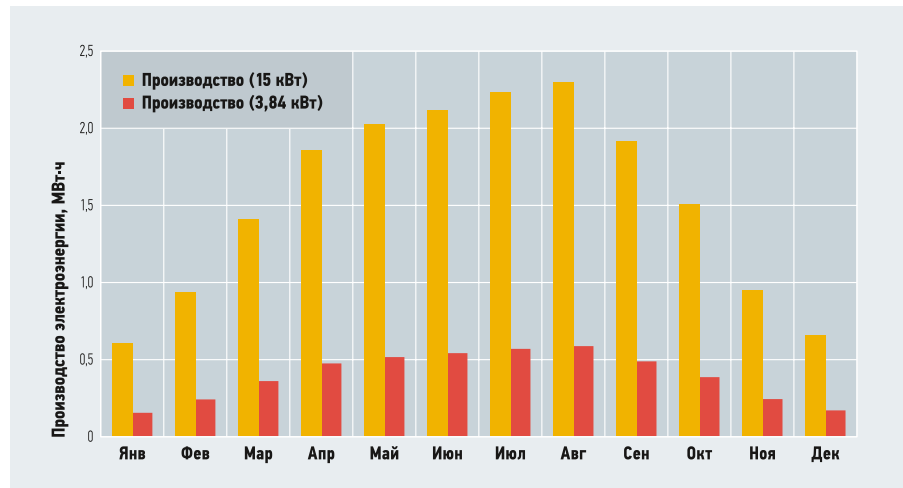


Рис. 4. Производство электроэнергии ФЭС 15 кВт и 3,84 кВт по месяцам года, кВт·ч

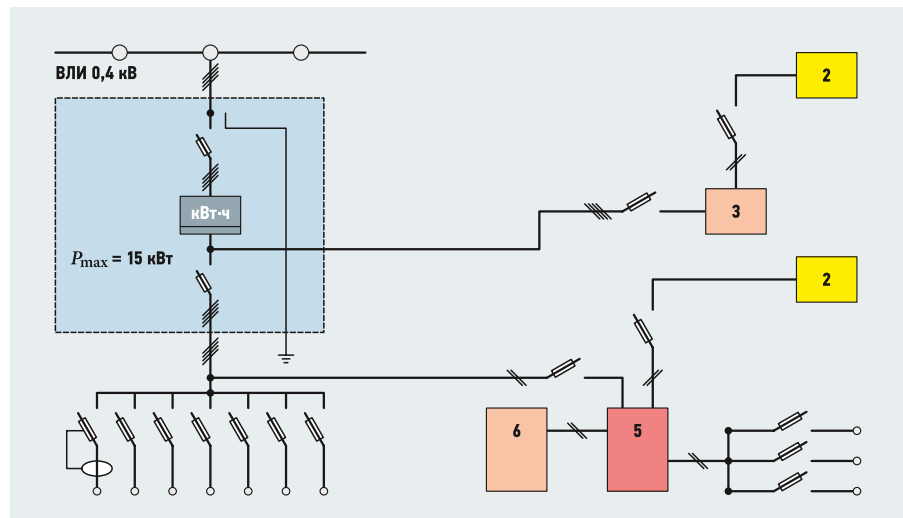


Рис. 5. Структурная схема электроснабжения «БиоДома» (1 — счётчик потребляемой и отдаваемой электроэнергии; 2 — ФЭС мощностью 15 кВт; 3 — системный инвертор мощностью 15 кВт; 4 — ФЭС мощностью 3,84 кВт; 5 — гибридный инвертор 5 кВт; 6 — аккумуляторная батарея; 7 — сборка подключения общей нагрузки; 8 — сборка подключения гарантированной нагрузки)

ционирования биовегетария: полива растений, регулирования состава воздуха в жилом помещении, воздушного отопления жилого помещения, поддержания температуры горячей воды в бойлере, водяного отопления жилого помещения, LED-досветки биовегетария, полива растений методом «дождевания», пассив-

ного отопления биовегетария, которые представлены ниже.

Опишем алгоритмы работы систем, представленных на рис. 6–13. Алгоритм работы системы, показанной на рис. 6: в 18:00 — включение реле, открытие клапана, пуск насоса; в 18:30 — отключение реле, закрытие клапана и остановка насоса.

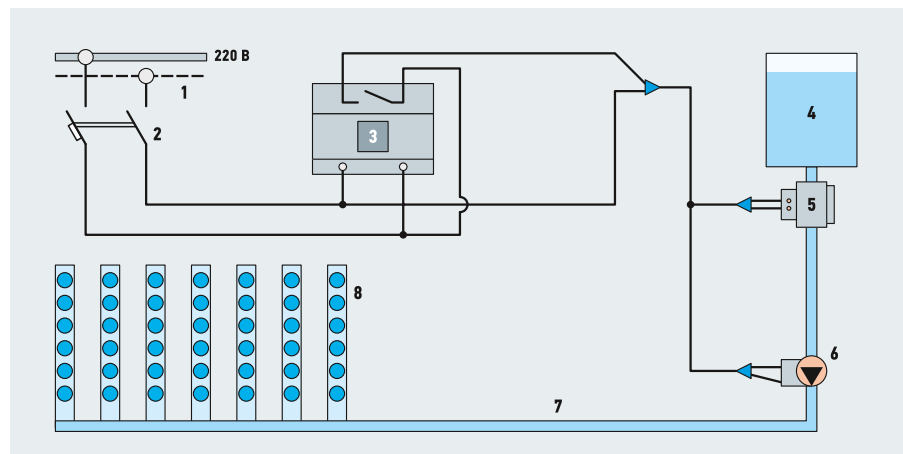


Рис. 6. Принципиальная схема системы капельного полива растений (1 — шина гарантированного электроснабжения; 2 — автомат; 3 — реле времени; 4 — бак с поливочной водой; 5 — нормально закрытый клапан; 6 — насос; 7 — трубопровод; 8 — поливочные трубы)

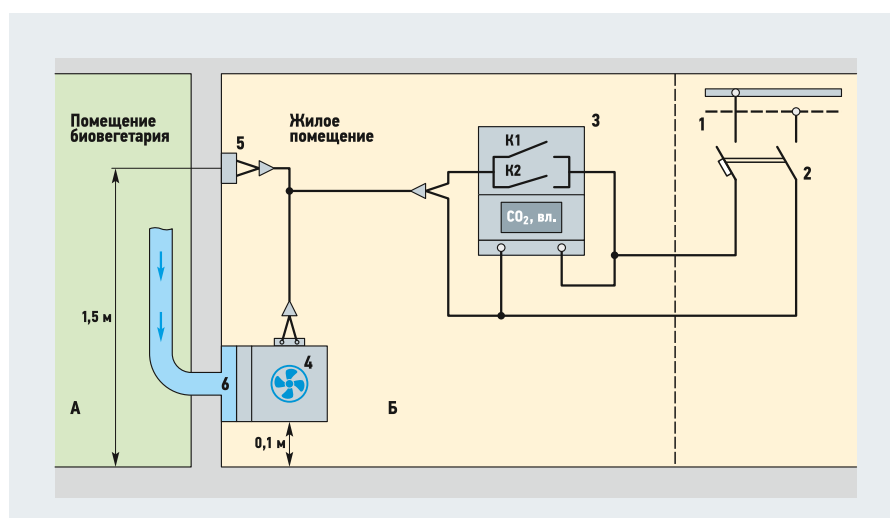


Рис. 7. Принципиальная схема регулирования состава воздуха в помещении за счёт подкачки воздуха биоветерария, обогащённого кислородом, выделяемого растениями (1 — шина гарантированного электроснабжения; 2 — автомат; 3 — реле CO₂ и влажности; 4 — вентилятор; 5 — место установки реле; 6 — клапан; А — жилое помещение, Б — помещение биоветерария)

Алгоритм работы системы, представленной на рис. 7: реле срабатывает — контакт K-1 замыкается при влажности воздуха в помещении 60% и выше, второй контакт K-2 замыкается при концентрации

CO₂, равной 700 ppm (реле крепится на стене на высоте 1,5 м, вентилятор — на высоте 0,1 м от пола).

Алгоритм работы систем, показанной на рис. 8: при температуре более +35°C

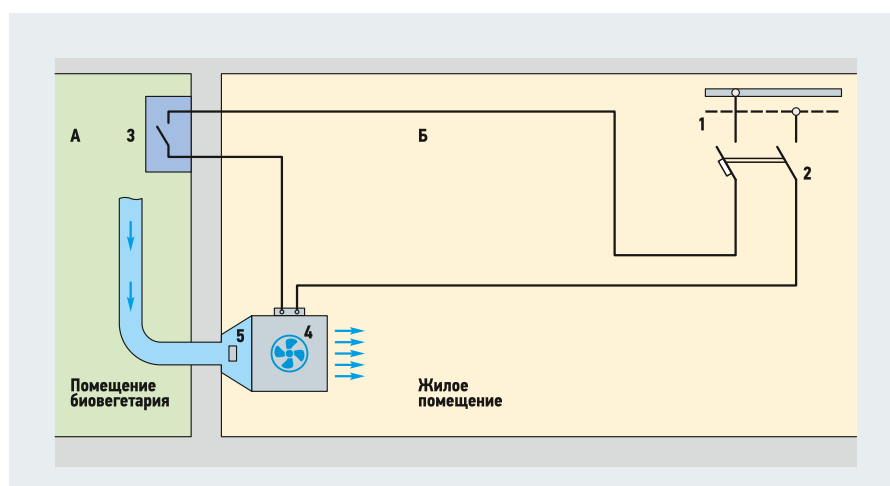


Рис. 8. Принципиальная схема системы воздушного отопления жилого помещения «БиоДома» (1 — шина гарантированного электроснабжения; 2 — автомат; 3 — биметаллический датчик температуры; 4 — вентилятор; 5 — клапан; А — жилое помещение, Б — помещение биоветерария)

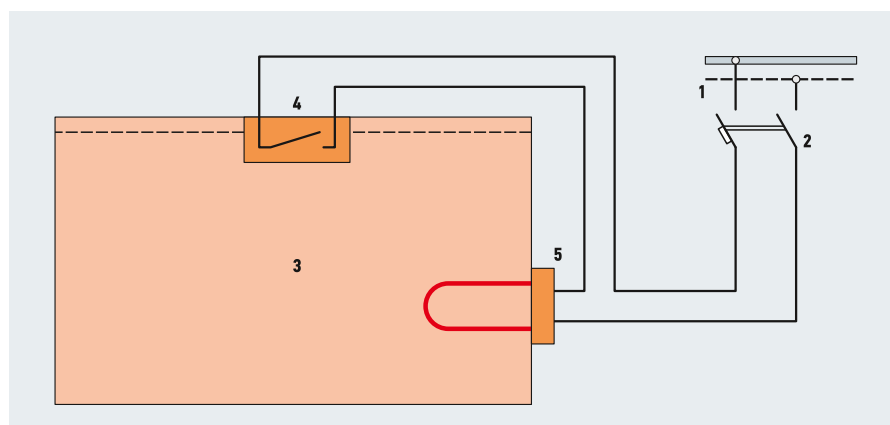


Рис. 9. Принципиальная схема поддержания температуры горячей воды в бойлере [1 — шина гарантированного электроснабжения; 2 — автомат; 3 — бойлер; 4 — биметаллическое термореле; 5 — электротЭН (220 В)]

замыкаются контакты датчика и включается вентилятор, далее тёплый воздух из биоветерария поступает в жилое помещение (данная система работает с декабря по февраль).

Алгоритм работы системы, представленной на рис. 9: реле включается при температуре $\leq +65^\circ\text{C}$, далее включается электрический ТЭН и производится догрев воды в бойлере.

Алгоритм управления системы, показанной на рис. 10: при температуре в комнате менее $+20^\circ\text{C}$ срабатывает реле, которое включает циркуляционный насос горячей воды из бойлера ($+65^\circ\text{C}$), одновременно включаются вентиляторы фанкойлов, обдувая нагревающие змеевики фанкойлов, далее тёплый воздух распространяется по помещению, а кондиционер работает на охлаждение или обогрев и включается вручную.

На стадии строительства было решено отказаться от автономного варианта электроснабжения, но испытать на практике возможность передачи в местную электрическую сеть электроэнергию, производимую на специально сооружённой ФЭС мощностью 15 кВт, и тем самым в некоторой степени компенсировать расходы собственника на сооружение «БиоДома»

Алгоритм работы системы, показанной на рис. 11: реле включает LED-досветку каждые сутки с 16:00 до 20:00 местного времени с ноября по март.

Алгоритм работы системы, показанной на рис. 12: реле включает клапан, вода из водопровода поступает в форсунки с 20:00 до 20:15 с июня по сентябрь.

Алгоритм работы системы, показанной на рис. 13: Датчик температуры включается при температуре менее 6°C и отключается при температуре более 8°C (соответственно, система включается и отключается с помощью реле).

Оценка экономической и энергетической эффективности

Предложена экономическая оценка на базе сравнения фактических финансовых затрат на сооружение и эксплуатацию «БиоДома» с возможными затратами при традиционном подходе к сооружению и энергообеспечению (без использования ВИЭ) от местных электрических и тепловых сетей.

1. Источники экономии расходов на оплату электроэнергии

За экономию на содержание принимается следующее:

- уменьшение расходов на оплату электроэнергии, получаемую из сети, из-за того, что имеется собственное производство электроэнергии на ФЭС;
- продажа излишков электроэнергии сбытовой компании, которые образуются при полном покрытии графика нагрузки «БиоДома»;
- уменьшение затрат на отопление за счёт внедрённых в «БиоДом» систем водяного и воздушного отопления на базе ВИЭ;
- уменьшение на подогрев системы горячего водоснабжения (ГВС) от системы солнечных коллекторов и фотоэлектрических модулей.

На строительство «БиоДома» было израсходовано 1,8 млн руб. в ценах 2020 года. В эту сумму не входит стоимость оборудования обеих фотоэлектрических установок (ФЭС). Примерная рыночная цена ФЭС на момент установки составила за обе ФЭС 1,66 млн руб. Итого общие затраты составили $K_{\Sigma} = 3,46$ млн руб. в ценах 2020 года.

Расчётное годовое производство электроэнергии на двух фотоэлектрических установках составляет 23 319 кВт·ч. Фактическое годовое потребление от сети составило 5110 кВт·ч, отсюда условная годовая экономия:

$$18\,209 \text{ кВт·ч} \times 3,67 \text{ руб.} = 66\,827 \text{ руб.}$$

2. Экономия расходов на оплату тепловой энергии

Для оценки уменьшения затрат на отопление биовегетария определим расход тепловой энергии в холодный период года.

В самые холодные зимние дни (этот период длится примерно 90 дней) расход тепловой энергии составит:

$$\begin{aligned} Q_{\text{от,т}} T_{\text{от}} &= 17,87 \text{ кВт} \times 24 \text{ ч} \times \\ &\times 90 \text{ дней} = 38\,599,2 \text{ кВт·ч.} \end{aligned}$$

На эту же задачу в «БиоДоме» расходует-ся 1123,2 кВт·ч, то есть в 34 раза меньше! Разница (экономия) составляет:

$$38\,599,2 - 1123,2 = 37\,476 \text{ кВт·ч.}$$

В денежном выражении при тарифе 3,67 руб/кВт·ч это будет:

$$I_T = 3747 \times 3,67 = 137\,537 \text{ руб.,}$$

причём это только за три зимних месяца!

А если нет возможности присоединения к тепловым сетям и приходится отапливаться электричеством, экономия составляет $I_T = 137\,537$ руб.

3. Уменьшение затрат на ГВС

Для нагрева 360 л воды от +15 до +65 °C ($\Delta t = 50$ °C) годовой расход электроэнергии составит:

$$Q_{\text{ГВ}} = 0,36 \times 50 \times 1 \times 365 = 6570 \text{ кВт·ч.}$$

При тарифе на электроэнергию, равном 3,71 руб/кВт·ч, экономия будет:

$$I_{\text{ГВ}} = 6570 \times 3,71 = 24\,375 \text{ руб.}$$

4. Экономия за счёт продажи электроэнергии

По данным сетевой компании, сумма расчётов за полученную энергию составила $I_{\text{прд}} = 80\,874$ руб. Суммарная экономия на содержание равна:

$$\begin{aligned} I_{\Sigma} &= I_{\text{пр.э}} + I_T + I_{\text{ГВ}} + I_{\text{прд}} = \\ &= 66\,827 + 137\,537 + 24\,325 + \\ &+ 80\,874 = 309\,563 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Отсюда простой срок окупаемости составит $T_{\text{ок}} = K_{\Sigma} / I_{\Sigma} = 3\,460\,000 / 309\,563 = 11,2$ года.

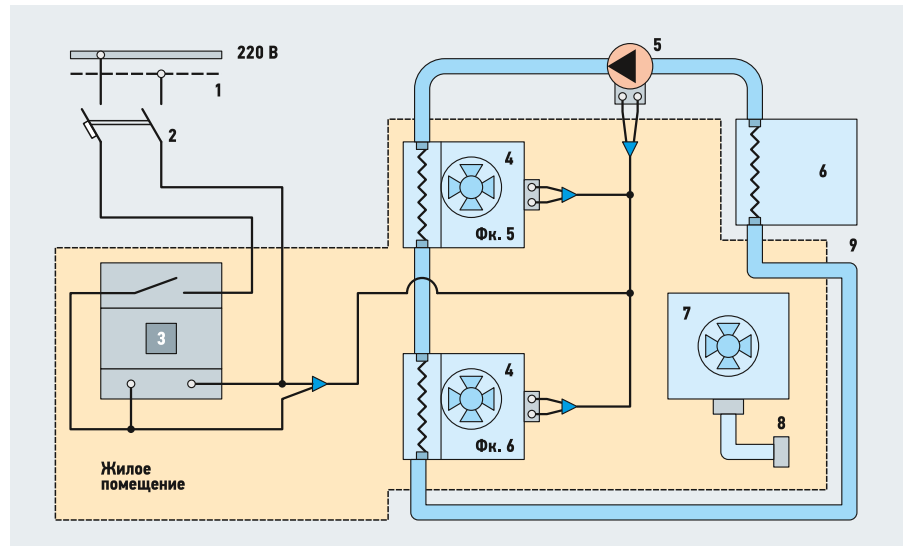


Рис. 10. Принципиальная схема работы водяного отопления жилого помещения «БиоДома» [1 — шина гарантированного электроснабжения; 2 — автомат; 3 — реле температуры; 4 — фанкойлы (змеевик и вентилятор); 5 — насос; 6 — бойлер; 7 — кондиционер]

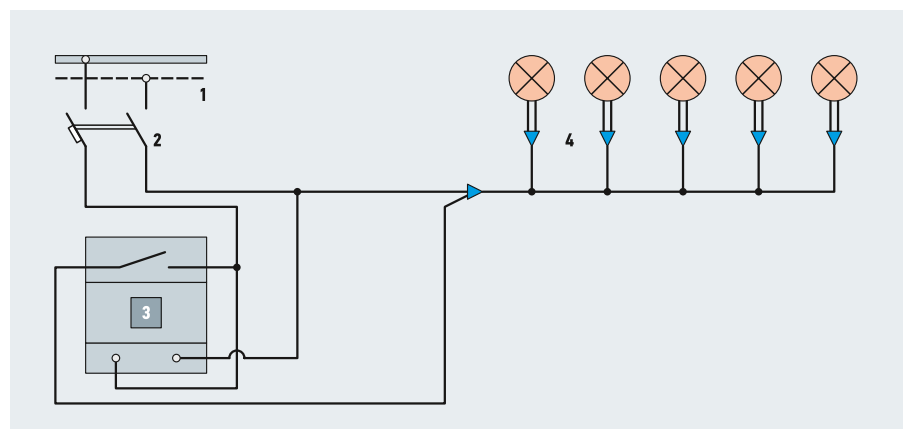


Рис. 11. Принципиальная схема LED-досветки биовегетария (1 — шина гарантированного электроснабжения; 2 — автомат; 3 — реле времени; 4 — LED-светильники)



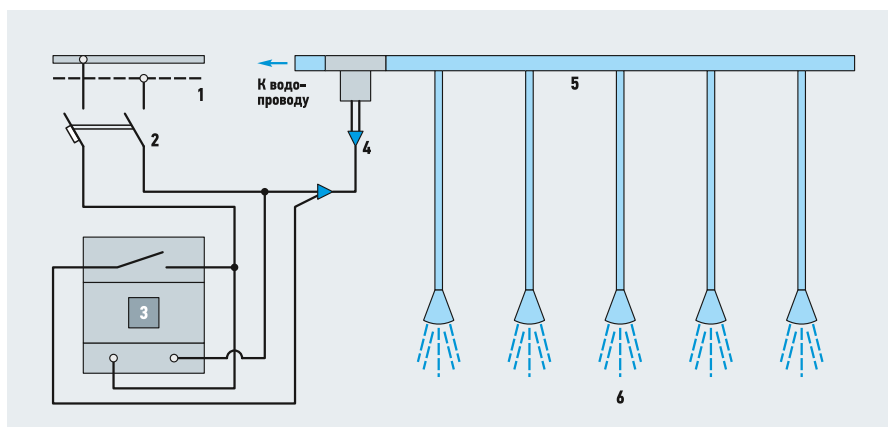


Рис. 12. Схема системы полива растений вида «дождевание» (1 — шина гарантированного электроснабжения; 2 — автомат; 3 — реле времени; 4 — клапан; 5 — трубопровод; 6 — форсунки)

5. Продовольственная эффективность

Продовольственная эффективность «БиоДома» заключается в следующем. При использовании описанных выше решений возможно получение до пяти-шести урожаев в год помидоров, огурцов и других простых сельскохозяйственных продуктов. Объём выращенной продукции может составлять тонны и даже десятки тонн в год. Также в постоянном режиме можно выращивать любую зелень: укроп, петрушку, зелёный лук, листья салата, щавеля, кинзы и побеги молодого чеснока, а также другие, более сложные виды.

В биовегетарии круглогодично выращиваются экзотические растения, которые не растут на нашей территории в естественных условиях. Это папайя, маракуйя, чайот, кумкват, апельсины, мандарины, нони, бананы, лимоны и т.д. Этот подход может использовать для импортозамещения, и здесь можно получить очень внушительные результаты.

Владельцы «БиоДома» уже попробовали собственноручно выращенные лимоны, маракуйю, кумкват, в 2026 году ожидается вызревание другой фруктовой «экзотики». Владельцами для собственного потребления постоянно выращиваются зелень и овощи.

«БиоДом» обладает высокой производительностью в плане производства овощей и фруктов. В «БиоДоме» в год возможно получить до пяти-шести урожаев помидоров, огурцов и других простых сельскохозяйственных продуктов. Объём выращенной продукции может составлять тонны и даже десятки тонн в год. В постоянном режиме можно выращивать и любую зелень

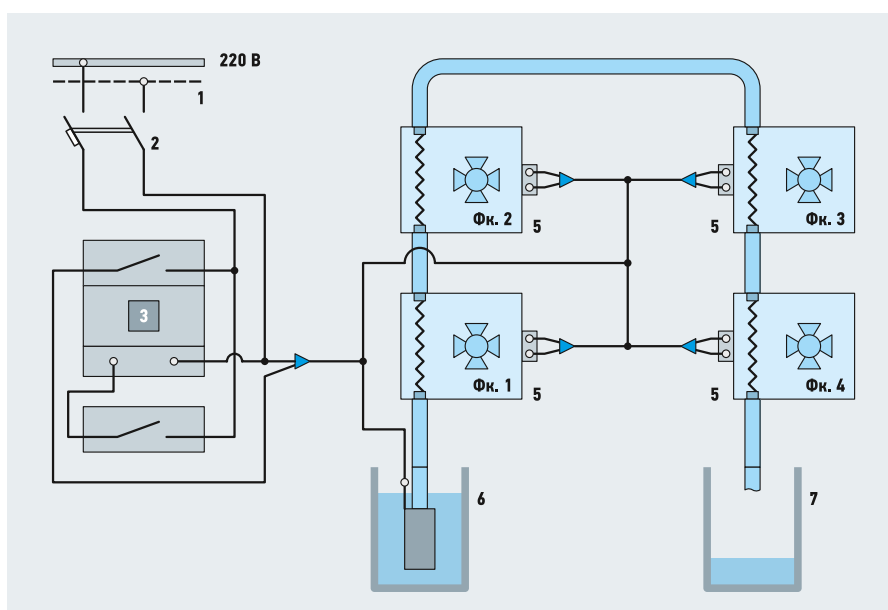


Рис. 13. Принципиальная схема пассивного отопления биовегетарии [1 — реле включения насоса; 2 — автомат; 3 — шина гарантированного электроснабжения; 4 — датчик температуры в нижней точке биовегетарии; 5 — фанкойлы; 6 — скважина водоснабжения с погружным насосом; 7 — сливная скважина (трубопровод не обозначен)]

Заключение

1. Разработаны и реализованы методика и алгоритмы функционирования и расчёта объединённой системы энергоснабжения для жилого помещения и теплицы домохозяйства на базе ВИЭ.

2. Выполнены энергетические расчёты систем теплоснабжения «БиоДома».

3. Разработаны и реализована системы жизнеобеспечения:

- пассивного отопления/охлаждения биовегетарии и жилого помещения;
- система горячего водоснабжения и система отопления;
- система воздушного с использованием грунтового аккумулятора;
- система электроснабжения;
- система автоматизации включения/отключения всех систем энергоснабжения, освещения, контроля и поддержания температуры воздуха в разных точках, а также содержания в воздухе углекислого газа (CO_2).

4. Проведена оценка энергетической и экономической эффективности принятых схемных решений.

5. Дана положительная оценка возможности распространения опыта разработки и эксплуатации «БиоДома» на другие почвенно-климатические условия Российской Федерации.

6. В результате круглогодичной эксплуатации в течение пяти лет подтверждена работа всех систем с расчётными (номинальными) параметрами. ●

1. О стратегии национальной безопасности Российской Федерации: Указ Президента РФ от 31.12.2015 № 683.
2. Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации: Указ Президента РФ от 21.01.2020 № 20.
3. О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» в части развития микрогенерации: Федеральный закон от 27.12.2019 № 471-ФЗ.
4. Патент РФ № 137793. МПК F24F 5/00 (2006.01). Система пассивного охлаждения/отопления помещения / А.В. Темеров. Патентообл.: А.В. Темеров. № 2013143 218/12. Заявл.: 25.09.2013; опубл.: 27.02.2014.
5. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местных видов топлива (показатели по территориям) / П.П. Безруких, В.В. Дегтярёв, В.В. Елистратов [и др.]; под ред. П.П. Безруких. — М.: ИАЦ «Энергия», 2007. 272 с.
6. Темеров А.В. «БиоДом». Жилой модуль и «умная» теплица // Журнал СОК. 2020. № 12. С. 14–18.
7. Безруких П.П., Темеров А.В. О развитии отечественного производства для малой и возобновляемой энергетики // Энергетическая политика, 2023. № 5. С. 68–77.
8. Природная энергия для работы и жизни. 150+ инженерных решений на основе возобновляемых источников энергии: информационный альманах [Электр. ресурс] / В.Н. Афанасьев, С.В. Бондарь, Ф.И. Борисов [и др.]; под ред. Е.Г. Гашо / НИУ «МЭИ»; Ассоциация «Зелёный киловатт». — СПб.: Научное издание, 2023. 292 с.
9. О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации: Постановление Правительства РФ от 02.03.2021 № 299.

References — see page 80.

Methods and algorithms for calculating energy-efficient systems of rural households using renewable energy sources. Pp. 70–77.

Pavel P. Bezrukikh, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Department of “Hydropower and Renewable Energy Sources” (HPRES), Institute of Hydropower and Renewable Energy Sources (IGIE) of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (NRU “MPEI”); Andrey Viktorovich Temerov, PhD (Engineering), General Director of “AltEnergy”, LLC

1. *O strategii natsional'noj bezopasnosti Rossijskoj Federatsii* [On the national security strategy of the Russian Federation]. *Ukaz Prezidenta RF ot 31.12.2015 №683* [The Decree of the President of the Russian Federation No. 683 of December 31, 2015]. [In Russian]
2. *Ob utverzhdenii Doktriny prodovol'svennoj bezopasnosti Rossijskoj Federatsii* [On approval of the Doctrine of Food Security of the Russian Federation]. *Ukaz Prezidenta RF ot 21.01.2020 №20* [The Decree of the President of the Russian Federation No. 20 of January 21, 2020]. [In Russian]
3. *O vnesenii izmenenij v Federal'nyj zakon “Ob elektroenergetike” v chasti razvitiya mikrogeneratsii* [On Amendments to the “On electric power industry” Federal Law regarding the development of microgeneration]. *Federal'nyj zakon ot 27.12.2019 №471-FZ* [The Federal Law of the Russian Federation No. 471-FL of December 27, 2019]. [In Russian]
4. The patent of the Russia Federation No. 137793. IPC F24F 5/00 (2006.01). *Sistema passivnogo okhlazhdeniya/otopleniya pomeshcheniya* [Passive cooling/heating system for a premises]. A.V. Temerov. Patent holder: A.V. Temerov. No. 20 131 43 218/12. Decl.: September 25, 2013; publ.: February 27, 2014. [In Russian]
5. P.P. Bezrukikh, V.V. Degtyarev, V.V. Elistratov et al. *Spravochnik po resursam vozobnovlyаемых источников энергии Rossii i mestnykh vidov topliva (pokazateli po territoriyam)* [Handbook of renewable energy sources and local fuel types in Russia (indicators by territory)]. Edited by P.P. Bezrukikh. Moscow. IATs “Energiya” [“Energy” Publishing and Analytical Center]. 2007. 272 p. [In Russian]
6. A.V. Temerov. “BioDom”. *Zhiloi modul' i umnaya teplitsa* [“BioHouse”. Residential module and smart greenhouse]. *Zhurnal Santehnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2020. No. 12. Pp. 14–18. [In Russian]
7. P.P. Bezrukikh, A.V. Temerov. *O razviti otechestvennogo proizvodstva dlya maloj i vozobnovlyаемой energetiki* [On the development of domestic production for small-scale and renewable energy]. *Energeticheskaya politika* [“Energy Policy” Magazine]. 2023. No. 5. Pp. 68–77. [In Russian]
8. V.N. Afanasev, S.V. Bondar, F.I. Borisov et al. *Prirodnaya energiya dlya raboty i zhizni. 150+ inzhenernykh reshenij na osnove vozobnovlyаемых источников energii: informatsionnyj al'manakh* [Natural energy for work and life. 150+ engineering solutions based on renewable energy sources: An information almanac]. Edited by E.G. Gasho. NIU “MEI” [“Moscow Power Engineering Institute” National Research University]; Assotsiatsiya “Zelenyj kilovatt” [“Green Kilowatt” Association]. St. Petersburg. *Naukoemkie tekhnologii* [“Science-Intensive Technologies” Magazine]. 2023. 292 p. [In Russian]
9. *O vnesenii izmenenij v nekotorye akty Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii v chasti opredeleniya osobennostej pravovogo regulirovaniya otnoshenij po funktsionirovaniyu ob'ektov mikrogeneratsii* [On Amendments to certain acts of the Government of the Russian Federation regarding defining the specifics of legal regulation of relations regarding the operation of microgeneration facilities]. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 02.03.2021 №299* [The Resolution of the Government of the Russian Federation No. 299 of March 2, 2021]. [In Russian]