



ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ДОМ С КОМПЛЕКСНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В СУРОВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

В.И. Велькин, В.В. Власов, С.Е. Щеклеин

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
Тел: (343) 375-95-08, e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

Заключение совета рецензентов: 23.05.15 Заключение совета экспертов: 27.05.15 Принято к публикации: 31.05.15

Разработана математическая модель и созданы алгоритмы оптимизации энергопотребления здания для районов, не имеющих подключения к централизованным электрическим и газовым сетям. В модели учтены особенности климатических условий, характерных для резко-континентального климата: большие сезонные и суточные перепады температур, экстремально низкие температуры в зимние периоды.

На основе выполненных расчетов и оптимизации разработана модель совместного использования ряда систем энергообеспечения на базе возобновляемых источников энергии (ветроустановки, солнечные коллекторы, фотоэлектрические преобразователи, тепловой насос) с когенерационным дизель-генераторным источником электрической и тепловой энергии. Показано, что данная модель энергообеспечения сокращает расход дизельного топлива и экологическую нагрузку на территорию более чем в 1,5 раза.

Результаты расчетов положены в основу проекта энергоэффективного сельского дома, который был реализован в Свердловской области (поселок Растущий). В 2009 г. проект получил Национальную экологическую премию имени В.И. Вернадского.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), комплексное использование ВИЭ, энергоэффективный дом.

ENERGY EFFICIENCY HOUSE WITH COMPLEX USE OF RENEWABLE ENERGY IN HARSH ENVIRONMENTS

V.I. Velkin, V.V. Vlasov, S.E. Shcheklein

Urals Federal University named after the first President of Russia Boris Yeltsin
19 Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia
Tel.: (343) 375-95-08, e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

Referred: 23.05.15 Expertise: 27.05.15 Accepted: 31.05.15

The mathematical model and algorithms developed for the energy optimization of the building areas without connection to centralized electricity and gas networks. The model takes into account particular climate conditions characteristic of sharply continental climate: big seasonal and daily changes in temperature, extremely low temperatures in winter.

On the basis of the calculations and optimization of the model of joint use of a number of power supply system based on renewable energy sources (wind turbines, solar collectors, photovoltaic cells, heat pump) with a diesel generator cogeneration source of electricity and heat. It is shown that this model reduces the energy consumption of diesel fuel and the environmental burden on the territory of more than 1.5 times.

The calculation results are the basis for energy efficiency projects farmhouse, which was implemented in the Sverdlovsk region (the village Rising). In 2009, the project received the National Environmental Award Vernadsky.

Keywords: renewable energy, renewable energy sources (RES), the integrated use of renewable energy, energy-efficient house.





Владимир Иванович
Велькин
Vladimir I. Velkin

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент кафедры «Атомные электростанции и возобновляемые источники энергии» УрФУ. Технический руководитель реализованного инновационного проекта «Энергоэффективный дом для села».

Образование: УПИ им. С.М. Кирова (1982).

Область научных интересов: ядерные энергетические установки, проблемы атомной энергетики и теплофизики двухфазных потоков, возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика, ветровая энергетика, биоэнергетика, энергосбережение, энергоэффективность.

Публикации: более 200, в том числе 1 монография, 10 изобретений.

Information about the author: Ph.D., associate professor of the department “Nuclear power plants and renewable energy sources” Ural Federal University. Technical Manager implemented the innovative project “Energy-efficient house for the village.”

Education: Ural Polytechnic Institute (1982).

Research area: nuclear power plants, the problems of nuclear energy and thermo-phase flows, renewable energy, solar energy, wind energy, bio-energy, energy conservation, energy efficiency.

Publications: more than 200 scientific works, including 1 monograph, 10 inventions.



Вадим Викторович
Власов
Vadim V. Vlasov

Сведения об авторе: ст. преподаватель кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ. Лауреат премии национальной лаборатории им. Лоуренса (США) за комплекс работ по безопасности объектов атомной энергетики.

Образование: Уральский гос. тех. университет (УГТУ-УПИ) (1999).

Область научных интересов: обоснование схем энергоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии, моделирование нестационарных случайных процессов.

Публикации: 19.

Information about the author: Senior lecturer of the Department “Nuclear power plants and renewable energy sources” UrFU. Award winner of the National Laboratory of Lawrence (US) for a complex of works on safety of nuclear power facilities.

Education: Ural State Technical University (1999).

Research area: justification for schemes of energy supply from renewable energy sources, modeling non-stationary random processes.

Publications: 19.



Сергей Евгеньевич
Щеклеин
Sergey E. Shcheklein

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ.

Научный руководитель ряда реализованных инновационных проектов, в т. ч. «Энергоэффективный дом для села», «Системы солнечного энергоснабжения автономных потребителей специального назначения», «Солнечные системы охранной сигнализации» и др.

Член редколлегии журнала «Известия вузов. Ядерная энергетика», сборника трудов УГТУ-УПИ «Теплофизика ядерных энергетических установок», научно-технического журнала «Энергоэффективность и анализ». Заслуженный энергетик России, действительный член Международной энергетической академии.

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1972).

Область научных интересов: термодинамика ядерных энергетических установок, проблемы атомной энергетики и теплофизики двухфазных потоков, продление ресурса и повышение надежности оборудования АЭС, солнечная энергетика, ветровая энергетика, биоэнергетика, энергосбережение, энергоэффективность.

Публикации: более 450, в том числе 6 монографий и учебников, 28 изобретений.

Information about the author: doctor of technical science, professor, Urals State Technical University “Atomic Stations and Renewable Energy Sources” Department head.

A scientific director of several realized innovation projects, including “The energoefficient house for the village”, “Special systems of individual consumer solar energy supply”, “The solar systems for the guarding alarm” etc.

A member of the editorial board of “Institute of Higher Education News. Nuclear Power” magazine, “Nuclear power units heat engineering” USTU article collection, “Energoeffectiveness and analysis” scientific magazine. A Honoured power engineering specialist of Russian Federation, a member of International Energy Academy.

Education: Urals Polytechnic Institute (1972).

Research area: nuclear power units thermodynamics; questions of nuclear energy and thermophysics of the two-phase flows; NPP equipment lifetime enduring and reliability increasing; solar, wind and bioenergetics, energy conservation, energy efficiency.

Publications: more than 450 scientific works, including 6 monographs and textbooks, 28 inventions.



Введение

Стремление построить энергоэффективное здание стимулируется желанием создания благоприятных для человека условий жизнедеятельности на фоне дефицитности и повышения стоимости энергетических ресурсов (страны ЕС) либо их значительных расходов в суровых климатических условиях (РФ), что также ведет к росту затрат на эксплуатацию зданий. Одним из мировых трендов снижения затрат на энергоснабжение является обеспечение значительной доли потребления зданий за счет возобновляемых источников энергии. Однако в условиях сурового климата, характерных для многих регионов РФ, широкому внедрению возобновляемой энергетики вредит как консервативный скептицизм, так и неоправданный оптимизм потенциальных потребителей энергоресурсов.

Расчеты, основанные на усредненных показателях прихода энергии, неучет реальных колебаний характеристик внешней среды и графиков потребления энергии; непонимание проблем пусковых токов и качества энергии; пренебрежение правилами санитарно-гигиенической безопасности для установок горячего водоснабжения и прочее – приводят к многочисленным ошибкам при практическом создании многих проектов энергообеспечения [1, 2]. Природно-климатические условия многих регионов России характеризуются аномально низкими температурами окружающей среды в течение 2/3 годового периода. На рис. 1 приведены данные многолетних измерений среднесуточной температуры наружного воздуха для Уральского Федерального округа. Следует отметить, что среднесуточные температуры, определяемые по соотношению

$$T^{\text{сут}}(T_i) = \int_{-T_i/2}^{T_i/2} T(n) dt, \quad (1)$$

не характеризуют абсолютные годовые минимумы температур, которые имеют место в ночные периоды суточных циклов.

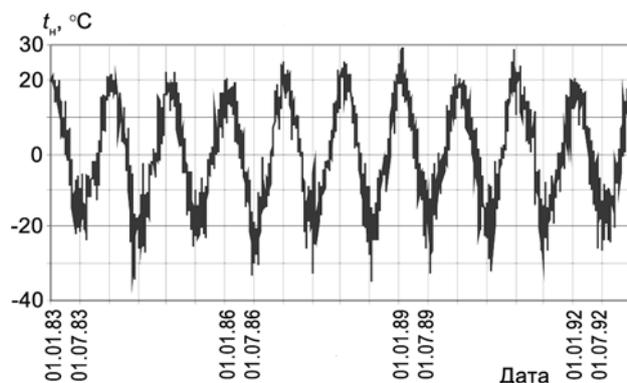


Рис. 1. Данные многолетних измерений среднесуточной температуры наружного воздуха
Fig. 1. These multi-year average daily temperature measurements outdoor air

Анализ климатических данных показывает, что РФ является одним из лидеров по требуемому количеству энергии. При равном уровне тепловой защиты зданий объем потребляемой энергии значительно выше (от 2 до 5 раз), чем для стран ЕС.

В данной работе на основании анализа природно-климатических факторов, параметров эффективности современных установок солнечной, ветровой и традиционной энергетики моделируются условия достижения комфортных условий жизни в автономном сельском жилом доме, не имеющем подключения к центральному электрическому и газовым сетям.

Постановка задачи

Рассматривается автономный жилой дом, не имеющий подключения к центральному электрическому и газовым сетям, общей площадью 200 квадратных метров, расположенный в Уральской климатической зоне. Тепловая защита здания и нормы потребления холодной и горячей воды соответствуют принятым в России строительным и коммунальным нормативам для энергоэффективных зданий [3, 4].

Математически моделируется возможность комбинированного использования различных видов нетрадиционных и возобновляемых источников энергии совместно с когенерационной дизель-электрической станцией (ДЭС), необходимой для надежности энергоснабжения при отсутствии энергии от альтернативных источников. Для снижения потребления топливных ресурсов, снижения затрат на энергоснабжение в состав системы входят аккумуляторы тепловой и электрической энергии, теплонасосная установка (использующая сбросное тепло ДЭС либо тепловую энергию грунта).

В годовом цикле моделируется энергообеспечение здания с оптимизацией структуры установок по критерию минимизации расхода органического топлива на замыкающую ДЭС [5].

Выполнено сравнение полученных оптимальных структур с традиционными методами энергоснабжения здания котельными установками (теплоснабжение) и ДЭС (электроснабжение).

Математическая модель

Эффективность схем энергоснабжения с участием возобновляемых источников зависит от большого числа разнородных факторов:

- величины расчетных электрических и тепловых нагрузок;
- климатических факторов;
- состава и типа оборудования.

Коммунально-бытовые потребности в энергии имеют комплексный характер и складываются из бытовых потребностей в электроэнергии, тепловой энергии на горячее водоснабжение (ГВС) и отопление. Отопительная нагрузка зависит от климатических факторов и теплотехнических параметров зда-



ний. Выбор оптимальных решений основан на определении интегрального экономического эффекта, который представлен соотношением

$$\Xi_{\Sigma} = \sum_{t=0}^T (W_t \Pi_t - K_t - I_t)(1 + E_{н.п.})^{-t} + \Phi_T (1 + E_{н.п.})^{-T}, \quad (2)$$

где W_t – количество продукции (электрической и тепловой энергии), отпущенной потребителям в t -й год операционной деятельности системы; Π_t – цена энергии, руб.; T – время эксплуатации, лет; K_t – инвестиционные издержки на осуществление проекта в t -й год; I_t – эксплуатационные издержки на операционную деятельность, включая налоги, сборы, платежи в t -й год; $E_{н.п.}$ – коэффициент нормативной эффективности инвестиций; Φ_T – остаточная на момент времени T стоимость основных фондов.

Математическая модель расчета показателей эффективности и надежности исследуемой системы основана на посуточном расчете величины нагрузки, графиков изменения температуры наружного воздуха, скорости ветра и энергии солнечного излучения с последующим определением производительности основного энергетического оборудования и параметров состояния системы (степени заряда накопителей энергии). Интегральные годовые показатели выработки энергии определяются суммированием результатов посуточных показателей.

К математической модели оптимизации предъявляются следующие требования:

- 1) Использование в качестве исходных данных:
 - графиков потребления электроэнергии;
 - графиков суточных сумм солнечной радиации на горизонтальной поверхности;
 - графиков изменения температуры наружного воздуха;
 - географические координаты местоположения энергоустановки;
 - требования к надежности энергоснабжения.
- 2) Возможность варьирования параметров основного энергетического оборудования:
 - типа ВЭУ, ТНУ, ДЭС, КА;
 - площади и ориентации солнечных преобразователей энергии;
 - емкости накопителей энергии.

Блок-схема алгоритма расчета показана на рис. 2.

После ввода исходных данных выполняется расчет основных климатологических характеристик по методикам. На основе полученной климатологической информации и математических моделей выполняются среднеинтервальные оценки производительности энергоустановок с учетом ветрового и солнечного потенциала предполагаемого района их размещения.

Расчет графиков электрической и тепловой нагрузок. Бытовые потребности в электроэнергии определяются выражением [6]

$$W_{\text{б}} = pN_{\text{ч}}, \quad (3)$$

где p – средняя норма бытового потребления электроэнергии на 1 человека (освещение, радио, телефон, телевизор, водоснабжение, бытовые электроинструменты), кВт·ч/(чел.·сут.); $N_{\text{ч}}$ – количество человек, нуждающихся в обеспечении быта электроэнергией.

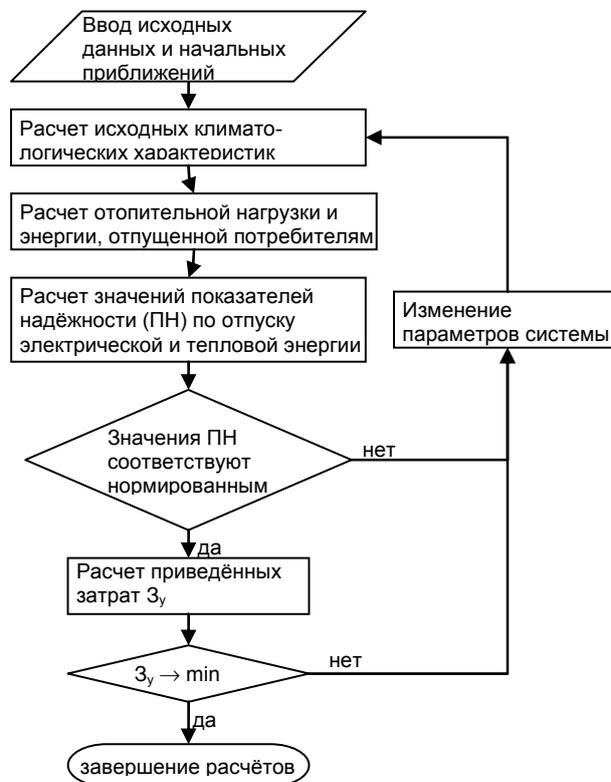


Рис. 2. Алгоритм оптимизации
Fig. 2. The optimization algorithm

Тепловая энергия на отопление $Q_{\text{от}}$, вентиляцию $Q_{\text{в}}$ и бытовые нужды $Q_{\text{ГВС}}$ обычно подается потребителю с горячей водой. Общее количество тепловой энергии, передаваемой потребителю, определяется выражением

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{от}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{ГВС}}. \quad (4)$$

Расход тепла на отопление определяется потерями через наружные ограждения и инфильтрацией наружного воздуха через неплотности.

Количество тепловой энергии, кДж/с, теряемой зданием, можно приближенно определить по формуле

$$Q_{\text{тп}} = \chi_0 V (t_{\text{п}} - t_{\text{н}}), \quad (5)$$

где χ_0 – отопительная характеристика здания, кДж/(с·м³·°C); $t_{\text{п}}$, $t_{\text{н}}$ – температура внутри помещения и снаружи, °C; V – объем здания, вычисленный по наружным размерам, м³.

Отопительная характеристика χ_0 численно равна потерям тепла через наружные ограждения здания в единицу времени при разности температур внутри

помещения и снаружи в 1 °С, отнесенным к 1 м³ объема здания, рассчитанного по наружным размерам. Среднесуточный расход тепла на бытовые нужды (горячее водоснабжение) практически не зависит от температуры наружного воздуха. По существующим строительным нормам и правилам потребность в горячей воде на одного человека для городских условий составляет 100 л в сутки при температуре 60 °С, по некоторым оценкам эта норма считается завышенной. В целом по России, включая сельские районы, предлагается норма 50 л на человека [2].

Разность между суточным потреблением энергии и выработкой от ВИЭ:

$$\Delta Q_{\text{ВИЭ}i} = Q_{\text{СК}i} - (Q_{\text{б.н.}i} + Q_{\text{ОТ}i}); \quad (6)$$

$$\Delta W_{\text{ВИЭ}i} = W_{\text{ВЭУ}i} + W_{\text{ФЭП}i} - W_{\text{Б}i}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{СК}i}$ – суточная выработка тепловой энергии солнечными коллекторами; $W_{\text{ВЭУ}i}$, $W_{\text{ФЭП}i}$ – суточная выработка энергии ветроэлектрической и фотоэлектрической установками.

При значении среднесуточной температуры наружного воздуха $t_{\text{н}} \leq 8$ °С $Q_{\text{ОТ}i}$ определяется из (6), (7), при $t_{\text{н}} > 8$ °С $Q_{\text{ОТ}i} = 0$.

Полученные значения разностей ΔQ_i и ΔW_i позволяют выполнить расчет объема и режимов работы накопителей энергии и установок с использованием невозобновляемых энергоресурсов. Если значения разностей энергии, полученные из (6), (7), положительные, то избыток энергии заряжает накопители. Если разности энергии отрицательные, то в первую очередь энергоснабжение осуществляется от накопителей, после исчерпания накопленной энергии питание нагрузки осуществляется от внешней энергосети либо за счет использования невозобновляемого топлива.

Для расчета надежности электроснабжения необходимо в каждый расчетный интервал времени i знать величину недоотпуска электроэнергии, которую можно оценить по формуле

$$\Delta W_i = \sum_j W_{i,j}^{\text{отп}} - \sum_k W_{i,k}^{\text{потр}}, \quad (8)$$

где $W_{i,j}^{\text{отп}}$ – энергия, отпущенная j -м источником системы (ФЭП, ВЭУ, ДЭС, внешняя энергосистема) в i -й расчетный интервал времени; $W_{i,k}^{\text{потр}}$ – энергия, необходимая для покрытия k -й составляющей электрической нагрузки системы в i -й расчетный интервал времени.

Если на i -м шаге расчетов получена величина недоотпуска энергии $\Delta W_i < 0$, то значение коэффициента обеспеченности составит

$$k_{\text{об}i} = 1 - \frac{-\Delta W_i}{\sum_k W_{i,k}^{\text{потр}}}. \quad (9)$$

При избыточной выработке энергии $\Delta W_i > 0$ коэффициент $k_{\text{об}i} = 1$, при этом величина ΔW_i может быть использована на покрытие тепловой нагрузки.

Интегральный коэффициент обеспеченности заданного отпуска энергии может быть получен суммированием $k_{\text{об}i}$ в пределах годового интервала времени:

$$k_{\text{об}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_{\text{об}i}. \quad (10)$$

Разность между отпущенной тепловой энергией и необходимой для покрытия нагрузки на i -м расчетном шаге можно оценить по формуле

$$\Delta Q_i = \sum_j Q_{i,j}^{\text{отп}} - Q_{\text{ОТ}i}, \quad (11)$$

где $Q_{i,j}^{\text{отп}}$ – тепловая энергия, отпущенная j -м источником системы (СК, КА, ТНУ) в i -й расчетный интервал времени; $Q_{\text{ОТ}i}$ – величина отопительной нагрузки в i -й расчетный интервал времени.

Если $\Delta Q_i > 0$, то $t_{\text{П}i} = t_{\text{П}i}^{\text{норм}}$. Избыток энергии может расходоваться на заряд теплового аккумулятора.

При недовыработке тепловой энергии $\Delta Q_i < 0$, в соответствии с (11), температуру воздуха внутри отапливаемого здания можно оценить по формуле

$$t_{\text{П}i} = t_{\text{П}i}^{\text{норм}} - \Delta Q_i / (\chi_{\text{о}} V), \quad (12)$$

где $t_{\text{П}i}^{\text{норм}}$ – температура, соответствующая комфортным условиям жизнедеятельности.

По результатам расчета значений $t_{\text{П}i}$ можно оценить вероятности достижения граничных значений температур, которые являются показателями надежности теплоснабжения.

При расчете отпуска тепловой энергии Q расход условного топлива в котельном агрегате $B_{\text{КА}}$ и электроэнергии (из внешней энергосистемы) в теплонасосной установке $W_{\text{ТНУ}}$ можно определить из выражений

$$W_{\text{ТНУ}} = \frac{Q}{K(T_{\text{НПИ}})}; \quad (13)$$

$$B_{\text{КА}} = \frac{Q}{\eta_{\text{КА}} Q_{\text{н}}^{\text{п}}}. \quad (14)$$

Исходя из этих соотношений, при фиксированных тарифах на электроэнергию $C_{\text{эл}}$, руб./кВт·ч, и топливо $C_{\text{т}}$, руб./кг у.т., выбор варианта теплоснабжения между КА и ТНУ будет зависеть от температуры источника низкопотенциального тепла $T_{\text{НПИ}}$. Критическое значение этой температуры будет определяться из выражения

$$K(T_{\text{НПИ}}^{\text{кр}}) = \frac{C_{\text{эл}}}{C_{\text{т}}} \eta_{\text{КА}} Q_{\text{н}}^{\text{п}}. \quad (15)$$



При условии $T_{\text{нпн}} \geq T_{\text{нпн}}^{\text{кр}}$ целесообразно использовать ТНУ, при $T_{\text{нпн}} < T_{\text{нпн}}^{\text{кр}}$ теплоснабжение от КА оценивается меньшими экономическими затратами. В свою очередь $T_{\text{нпн}}^{\text{кр}}$ зависит от соотношения тарифов на топливо и электроэнергию.

На основе вышеизложенного алгоритма в среде математического моделирования MatLab была разработана и реализована на ЭВМ программа оптимизации схем энергоснабжения с комплексным использованием ВИЭ и традиционных энергоустановок. Использование в программе специальных подпрограмм расчета исходных климатических характеристик и производительности основного энергетического оборудования дает принципиальную возможность варьировать большое количество параметров. Алгоритм также позволяет учитывать климатические факторы (изменение уровня инсоляции, скорости ветра, температуры наружного воздуха и источника низкопотенциального тепла).

Вывод об экономических преимуществах того или иного варианта состава основного оборудования может быть сделан лишь на основании технико-экономических расчетов и будет зависеть, прежде всего, от соотношения климатических факторов и тарифов на традиционные энергоресурсы.

Результаты моделирования системы энергоснабжения коммунально-бытовых потребителей с комплексным использованием ВИЭ

Система энергоснабжения на основе ВИЭ отличается от традиционных систем тем, что здесь часть потребляемых внешних энергоресурсов замещается местными возобновляемыми источниками энергии. Идея сочетания двух типов энергоресурсов заключается в том, чтобы, во-первых, максимально улучшить эффективность работы системы за счет снижения потребления дорогостоящего топлива и, во-вторых, обеспечить отпуск тепловой и электрической энергии в соответствии с графиками их потребления за счет аккумулирования энергии и работы традиционных энергоустановок.

Достижимая экономия традиционных энергоресурсов зависит от потенциала ВИЭ, графиков тепловых нагрузок (т.е. климатических условий района), схемы и состава оборудования. Создание систем энергоснабжения сопровождается соответствующими капитальными вложениями в оборудование. Поэтому общая экономическая эффективность должна определяться с учетом капитальных вложений в сравниваемые варианты, а также обеспечения надежности энергоснабжения. Для определения эффективности схем комплексного энергоснабжения рассмотрены возможные системы с использованием следующих источников энергии:

1. Электроснабжение:

- фотоэлектрические панели (ФЭП);
- ветроэлектрическая станция (ВЭС);
- дизель-электрическая станция (ДЭС).

2. Теплоснабжение:

- солнечные тепловые коллекторы (СК);
- теплонасосная установка (ТНУ);
- утилизация сбросного тепла ДЭС;
- котельный агрегат (КА);
- сезонный аккумулятор тепловой энергии (ТА).

На рис. 3 приведены результаты измерений поступления энергии солнечного излучения и скорости ветра по месяцам года и данные по основным климатическим характеристикам г. Екатеринбурга.

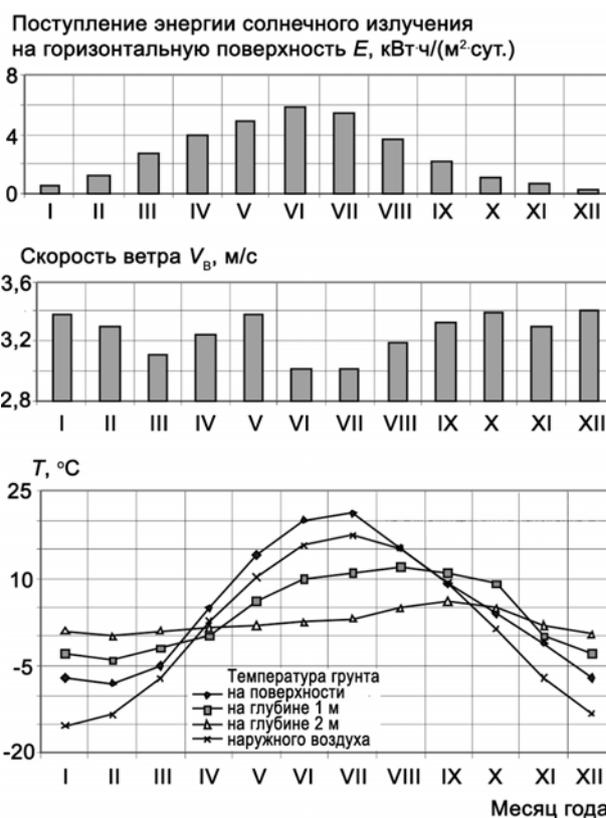


Рис. 3. Экспериментальные данные по основным климатическим характеристикам г. Екатеринбурга [7]
Fig. 3. Experimental data on the main climatic characteristics of Ekaterinburg [7]

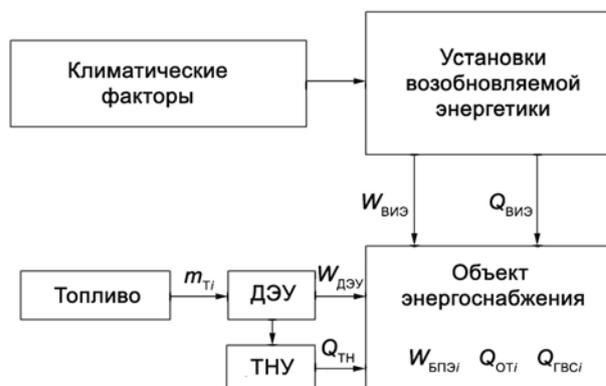


Рис. 4. Физическая модель энергоснабжения здания
Fig. 4. Physical model energy building

На рис. 4 приведена физическая модель энергообеспечения здания, построенная по принципу «черного ящика», используемому в задачах математической оптимизации.

В расчетах учитываются следующие функциональные зависимости:

$$W_{ДЭУ}(m_T), Q_{ДЭУ}(m_T), Q_{СК}(S_{СК}, E_i, T_{O_i}),$$

$$W_{ФЭУ}(S_{ФЭУ}, E_i, T_{O_i}), W_{ВЭУ}(P_{уст}, V_{Вi}), Q_{ТН}(T_{НПИ}, W_{ТНi}),$$

где m_T – расход топлива, кг у.т.; $S_{СК}$ и $S_{ФЭУ}$ – площади поверхностей солнечных коллекторов и фото-

электрических установок, m^2 ; $P_{уст}$ – номинальная установленная мощность ветроэнергетических установок (при аппроксимации рабочей характеристики ВЭУ кусочно-линейной функцией), кВт; E_i – изменение солнечной радиации на горизонтальную поверхность для среднемноголетних условий, кВт·ч/(m^2 сут); T_{O_i} – изменение наружной температуры воздуха по месяцам для среднемноголетних условий, °С; $V_{Вi}$ – изменение скорости ветра по месяцам для среднемноголетних условий, м/с.

Структура и взаимосвязь элементов системы показаны на рис. 5.

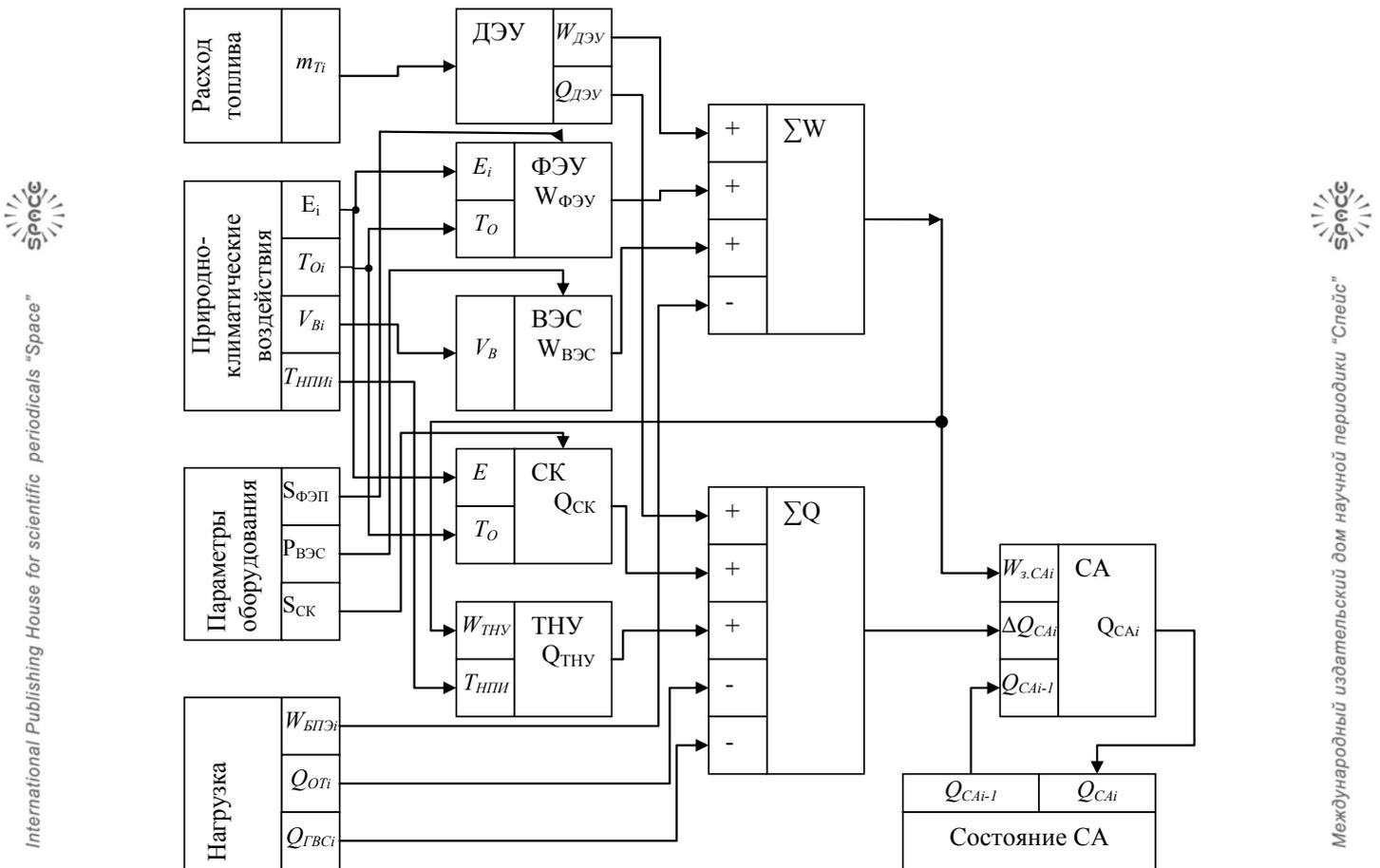


Рис. 5. Структура системы комплексного энергоснабжения

Fig. 5. Structure of the integrated power supply

С учетом принятых в модели допущений и норм энергопотребления в коммунально-бытовой сфере результаты моделирования показали, что покрытие нагрузки ГВС и БПЭ можно обеспечить включением в систему следующих элементов:

- ВЭУ «Радуга-001», $P_{уст} = 1$ кВт;
- ФЭП: $S_{ФЭП} = 3$ m^2 ;
- СК: $S_{СК} = 6$ m^2 .

Результаты моделирования приведены в виде графиков на рис. 6-9

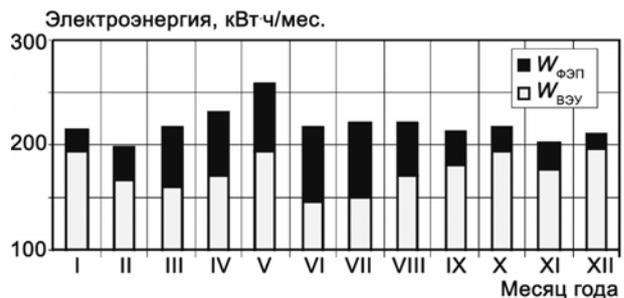


Рис. 6. Структура выработки электроэнергии от ВИЭ

Fig. 6. Structure of electricity generation from renewable energy sources

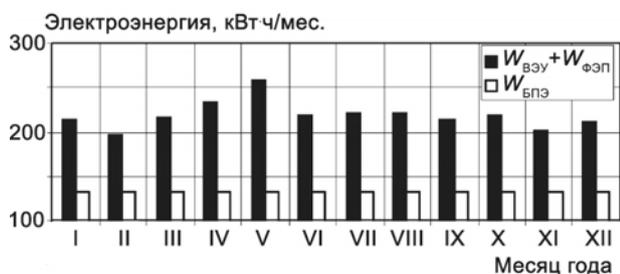


Рис. 7. Электроэнергия, отпущенная ВИЭ и необходимая для покрытия бытовых потребностей
 Fig. 7. Power supplied by renewable energy sources and needed to cover domestic needs

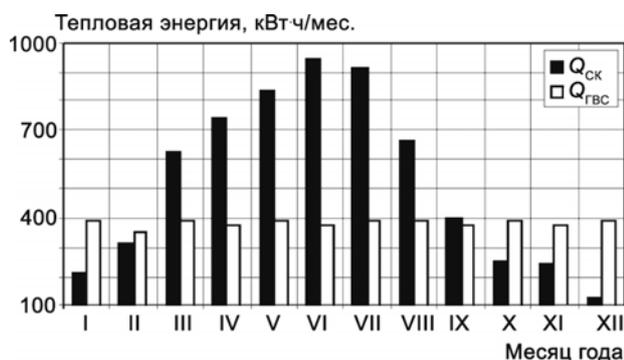


Рис. 8. Тепловая энергия, отпущенная СК и необходимая для покрытия нагрузки ГВС
 Fig. 8. The thermal energy released by the UK and needed to cover the hot water load

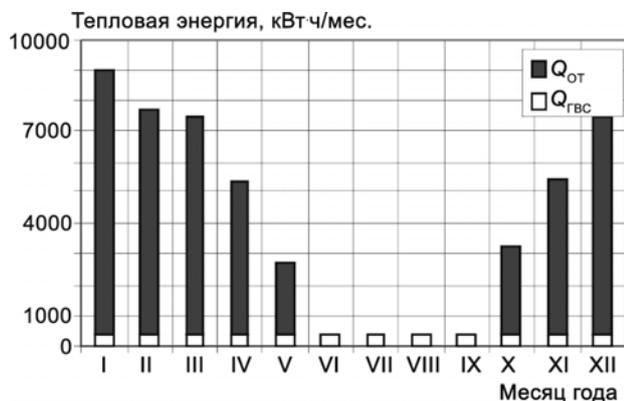


Рис. 9. Суммарная тепловая нагрузка системы
 Fig. 9. The total heat load of the system

Из рис. 9 видно, что покрытие нагрузки ГВС от СК обеспечивается только в летние месяцы.

Для покрытия отопительной нагрузки рассмотрено две альтернативных схемы на основе КА (вариант 1) и комбинации теплофикационной ДЭС и ТНУ (вариант 2). Результаты сравнительного анализа рассматриваемых вариантов приведены в таблице.

На основании данных таблицы можно сделать вывод, что вариант 2 характеризуется большей топливной эффективностью, т.е. позволяет снизить го-

довой расход топлива более чем в 2 раза в сравнении с вариантом 1. Использование в системе сезонного аккумулятора тепловой энергии позволяет дополнительно снизить потребление топлива на 6%.

Результаты расчета эффективности вариантов энергоснабжения
 The results of calculating the efficiency of energy supply options

Параметр	Без сезонного аккумулярования		С сезонным аккумулярованием	
	вар. 1	вар. 2	вар. 1	вар. 2
Годовое потребление тепловой энергии, кВт·ч/год, в том числе:	49807			
отопление	45240			
ГВС	4567			
Годовая выработка тепловой энергии, кВт·ч/год, в том числе:	50516	51196	48786	48786
СК	6266			
КА	44250	-	42520	-
теплофикация от ДЭС	-	19320	-	18240
ТНУ	-	25610	-	24280
Годовое потребление электроэнергии, кВт·ч/год, в том числе:	1600	8720	1600	8360
потребление электроэнергии в быту	1600			
расход электроэнергии на привод теплового насоса	-	7120	-	6760
Годовая выработка электроэнергии, кВт·ч/год, в том числе:	2614	9055	2614	8696
ФЭП	521			
ВЭУ	2 093			
ДЭС	-	6441	-	6082
Расход органического топлива, кг у.т.	6795	3165	6529	2988

При наличии в системе сезонного накопителя энергии существует принципиальная возможность полностью исключить потребление органического невозобновляемого топлива. В летний период происходит заряд сезонного аккумулятора, а в холодный период – разряд для целей отопления объекта. Для обеспечения полного покрытия отопительной нагрузки, по данным расчетов, необходимая площадь СК должна быть не менее 47 м².

Заключение

Разработана методика обоснования локальных систем тепло- и электроснабжения с комплексным использованием возобновляемых ресурсов и традиционных источников энергии. В отличие от известных разработанных методика позволяет выполнять оптимизацию схем на основе комбинации ВИЭ и традиционных энергоустановок для комплексного энергоснабжения локальных объектов. Методика, реализованная в виде программного кода, дает воз-

можность анализа вариантов по выбору наиболее рационального состава оборудования для локальных систем комплексного энергоснабжения с точки зрения экономичности и надежности. Исследования системы энергоснабжения коммунально-бытовых потребителей, выполненные на основе предложенной методики для заданных условий, показали возможность существенного снижения годового расхода топлива для климатических условий России за счет использования ВИЭ.

Список литературы

1. Безруких П.П. Возобновляемая энергетика: Вчера, сегодня, завтра // Электрические станции. 2005. № 2.
2. Проблемы и перспективы развития возобновляемых источников энергии в России (материалы «круглого стола») / Под общ. ред. акад. Ю.В. Гуляева. М.: НИЦ Инженер, 2003.
3. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях» (СанПиН 2.1.2. 2645-10).
4. СНИП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий».
5. Клима К. Оптимизация энергетических систем: Пер. с чешского Л.Г. Ублинской / Под ред. В.Р. Окоорокова. М.: Высш. шк., 1991.
6. Чукреев Ю.Я. Модели обеспечения надежности электроэнергетических систем. Сыктывкар, 1995.
7. Щеклеин С.Е., Власов В.В. Моделирование нестационарных случайных процессов в задачах обоснования возобновляемых источников энергии // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEE. 2012. № 3. С. 67-71.

References

1. Bezrukikh P.P. Vozobnovlâemaâ ènergetika: Vçera, segodnâ, zavtra // Èlektriçeskie stancii. 2005. № 2.
2. Problemy i perspektivy razvitiâ vozobnovlâemyh istochnikov ènergii v Rossii (materialy «kruglogo stola») / Pod obš. red. akad. Ū.V. Gulâeva. M.: NIC Inžener, 2003.
3. Sanitarno-èpidemiologiçeskie trebovaniâ k usloviâm proživaniâ v žilyh zdaniâh i pomešeniâh» (SanPiN 2.1.2. 2645-10).
4. SNIP 23-02-2003 «Teplovaâ zašita zdaniij».
5. Klima K. Optimizaciâ ènergetiçeskih sistem: Per. s češskogo L.G. Ublinskoj / Pod red. V.R. Okorokova. M.: Vysš. šk., 1991.
6. Çukreev Ū.Â. Modeli obespeçeniâ nadežnosti èlektroènergetiçeskih sistem. Syktyvkar, 1995.
7. Šeklein S.E., Vlasov V.V. Modelirovanie nestacionarnyh slučajnyh processov v zadaçah obosnovaniâ vozobnovlâemyh istochnikov ènergii // Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ – ISJAEE. 2012. № 3. S. 67-71.

Транслитерация по ISO 9:1995

