ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
В АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

THERMODYNAMIC ANALYSIS IN RENEWABLE ENERGY

Статья поступила в редакцию 23.05.15. Ред. рег. № 2266

The article has entered in publishing office 23.05.15. Ed. reg. No. 2266

УДК 658.26

doi: 10.15518/isjaee.2015.08-09.007

ОСОБЕННОСТИ МНОГОЭТАЖНЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ НУЛЕВОГО
ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

А.Н. Пирогов, С.Е. Щеклеин, Н.И. Данилов

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: 27.05.15 Заключение совета экспертов: 30.05.15 Принято к публикации: 03.06.15

Для определения возможности строительства в климатических условиях города Екатеринбурга многоэтажного жилого дома с нулевым потреблением энергии была выбрана методология расчета для типового района (по плотности застройки, этажности, конструктиву и форме), для которого определены характерные значения удельного потребления тепловой, электрической энергии и горячей воды, для выполнения расчетов в типовом доме. С применением пакета PHPP (Passive House Planning Package) для типового дома были разработаны две компьютерные вычислительные модели: стандартные конструкции (базовый вариант) и дом с применением технологий энергопассивных зданий (улучшенный вариант). В ходе исследования определено, что наиболее значимым фактором, ограничивающим увеличение уровня тепловой защиты здания, являются энергозатраты на производство строительных материалов, которые при увеличении толщины утеплителя типового дома сверх базовой величины более чем на 500 мм приводят к росту потребления энергии в течение жизненного цикла (с учетом энергозатрат на производство строительных материалов). В результате проведенного исследования доказана возможность строительства многоэтажного многоквартирного жилого дома с нулевым потреблением энергии (по годовому балансу).

Ключевые слова: энергообеспечение, энергоэффективность.

FEATURES MULTISTORY NEARLY ZERO ENERGY BUILDINGS (NZEB)
FOR A COLD CLIMATE

A.N. Pirogov, S.E. Shcheklein, N.I. Danilov

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: 27.05.15 Expertise: 30.05.15 Accepted: 03.06.15

To determine the possibility of building in the climatic conditions of the city of Yekaterinburg multistorey apartment houses with zero energy consumption has been selected for typical methodology (for building density, number of storeys, constructive and shape) that designates the characteristic values of specific consumption of heat, electricity and hot water to perform calculations in a typical house. Using packet PHPP (Passive House Planning Package) for a typical home computer developed two computer models: the standard design (base case) and a house with energy-passive building technologies (improved version). The study determined that the most significant factor limiting the increase in the thermal protection of the building are energy consumption for the production of building materials, which by increasing the thickness of the insulation over the base model home magnitude of more than 500 mm, lead to an increase in energy consumption over the life cycle (including energy costs in the production of construction materials). The study proved the possibility of building a multi-storey apartment building with a zero energy consumption (as an annual balance sheet).

Keywords: energy supply, energy efficiency.

Алексей Николаевич
Пирогов
Alexey N. Pirogov

Сведения об авторе: магистр наук, главный инженер компании RED-group.
Образование: УрФУ (УрГТУ-УПИ), 2003; Дунайский университет (г. Кремс, Австрия), 2012.
Область научных интересов: устойчивое развитие и энергетическая эффективность в проектировании и строительстве зданий, климат и комфорт, управление объектами недвижимости.
Публикации: 14.

Information about the author: MSc, chief engineer, RED-group.
Education: Ural Federal University (previously Ural State Technical University-UPI), 2003; Donau-Universität Krems (Austria), 2012.
Research area: sustainability and energy efficiency in buildings, climate and comfort, facility management.
Publications: 14.

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.

Николай Игоревич
Данилов
Nikolay I. Danilov

Сведения об авторе: д-р экон. наук, профессор, Заслуженный экономист РФ (1996), награжден Орденом Почета (2000), знаком отличия «За безупречную службу. XXV лет» (2005), знаком отличия «За заслуги перед Свердловской областью» III степени (2009), памятными медалями Готфрида Вильгельма фон Лейбница (2011), Александра фон Гумбольдта (2013) и Владимира Вернадского (2014) Европейской академии естественных наук; профессор-консультант кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского энергетического института УрФУ, научный руководитель, председатель коллегии, член коллегии Некоммерческого партнерства «Союз «Энергоэффективность», зав. кафедрой «Энергосбережение» УрФУ (1999-2014), инициатор создания ГБУ Свердловской области «Институт энергосбережения», первый директор, научный руководитель, главный специалист (2009-2013).

Образование: Ленинградский электротехнический институт (ЛЭТИ), 1969.

Область научных интересов: проблемы устойчивого развития промышленного региона, повышение энергоэффективности региональной экономики, научные и методические основы формирования и оптимизации топливно-энергетического баланса региона, внедрение методов энергетического анализа хозяйственной деятельности, разработка и внедрение системы энергетического менеджмента, региональных программ энергосбережения, системы непрерывного образования в сфере энергосбережения.

Публикации: более 300 научных статей и докладов, 50 монографий, учебных, справочных и учебно-методических пособий.

Information about the author: Doctor of Economical Sciences (PhD), Professor, the Deserved economist of the Russian Federation (1996), he was awarded the Order of Honour (2000), the official insignia "For faultless service. XXV years" (2005), the official insignia "Merit for the Sverdlovsk region" III degree (2009), commemorative medals of the European Academy of natural Sciences: Gottfried Wilhelm von Leibniz (2011), Alexander von Humboldt (2013) and Vladimir Vernadsky (2014); Consultant Professor of the Academic Department "Nuclear power plants and renewable energy sources" Ural power engineering Institute UrFU, scientific director, chairman of the board, member of the Board of Non-Commercial Partnership "Union "Energy", head of Department "Energy Saving" (1999-2014), the initiator of creation of the State Budget Institution of Sverdlovsk region "Institute of energy saving", the first Director, scientific director, chief specialist (2009-2013).

Education: Leningrad Electrotechnical Institute (LETI), 1969.

Research area: problems of sustainable development of the industrial region, improvement of energy efficiency of the regional economy, scientific and methodical bases of formation and optimization of the energy balance in the region, introduction of methods of energy analysis of economic activities, development and implementation of energy management systems, regional energy efficiency programs, continuing education system in the field of energy saving.

Publications: more than 300 scientific articles and conference papers, 50 monographs, academic, reference books and textbooks.

Введение

Интенсивный рост населения земного шара, сопровождаемый быстрым ростом потребностей и промышленного производства, грозит истощением углеводородного топлива и природных ресурсов как таковых и усугубляет проблему глобального потепления. Для коренного изменения данной ситуации необходим переход к принципам устойчивого развития, которое позволит обеспечить насущные потребности, не ставя под угрозу реализацию потребностей будущих поколений. Необходимы коренные изменения в строительном секторе, являющемся одним из крупнейших потребителей природных ресурсов. Простое тиражирование передовых технологий в строительной отрасли невозможно в силу серьезных социальных, культурных и климатических отличий разных стран. Необходима их тщательная адаптация к местной специфике.

В России низкая стоимость энергоресурсов, их избыток и большой дефицит жилья являются важнейшими сдерживающими факторами в развитии строительной индустрии. Это же является причиной практически полного отсутствия российских исследований в области энергетической эффективности многоквартирных зданий.

В крупных городах высокая плотность застройки и преобладающее использование многоэтажных многоквартирных домов серьезно ограничивают возможности использования возобновляемых источников энергии. Задача данного исследования: определить потенциал энергосбережения и возможности использования возобновляемых источников энергии в жилых многоэтажных многоквартирных зданиях в климатических условиях (расчетная температура холодного времени года $-32...-35$ °C, средняя температура отопительного периода $-5,4...-6,0$ °C, расчетная температура теплого периода года 27 °C, 6412 градусо-суток отопительного периода) г. Екатеринбурга (1,0 млн жителей по состоянию на 01.01.2011).

В настоящее время отсутствует общепринятое определение термина «здание нулевого потребления». Существующие концепции энергоэффективных зданий можно укрупненно разделить на энергопассивные (passive house), дома нулевого потребления энергии (zero energy buildings) и дома нулевой эмиссии углерода (zero carbon buildings). Согласно Директиве Европарламента рекомендуется продвигать строительство зданий, у которых эмиссия парниковых газов и потребление первичной энергии низкое или равно нулю [1]. Зданием нулевого потребления является объект с минимальным уровнем энергопотребления, которое возможно компенсировать за счет возобновляемых источников энергии [2]. Целесообразно строительство зданий нулевого потребления, присоединенных к централизованным сетям энергоснабжения, так как в случае автономного здания использовать избытки произведенной энергии будет затруднительно [3]. Здание нулевой эмиссии углерода является частным случаем здания нулевого потребления, обеспечивая компенсацию эмиссии парниковых газов за счет производства энергии посредством возобновляемых источников энергии [2].

Методика исследования

Для определения возможности строительства в климатических условиях г. Екатеринбурга многоэтажного жилого дома с нулевым потреблением энергии была выбрана методология расчета для типового района (по плотности застройки, этажности, конструктиву и форме). За основу, по данным статистической обработки данных строительства жилых зданий в Екатеринбурге с 2006 по 2011 гг., выбран типовой 15-этажный жилой дом, расположенный в микрорайоне Академический [4] (г. Екатеринбург). По данным потребления 28 зданий микрорайона для типового дома были определены характерные значения удельного потребления тепловой, электрической

энергии и горячей воды для выполнения расчетов в типовом доме (табл. 1).

С помощью компьютерного моделирования для типового дома был произведен анализ затенения фасадов в течение светового дня и определена величина энергии, которую возможно получить с учетом затенения от соседних зданий при размещении фотоэлектрических панелей на фасадах и кровле здания. Расчет произведен для видов наиболее распространенных фотоэлектрических панелей: тонкопленочных, монокристаллических и поликристаллических. Использование термальных солнечных панелей для производства тепловой энергии признано нецелесообразным в многоквартирном доме.

Таблица 1
Потребление первичной и конечной энергии в типовом доме (по видам энергоресурсов)

Table 1

The consumption of primary and final energy in a typical house (by energy resources)

Энергоресурс	Энергия, кВт·ч	
	конечная	первичная
Отопление	112	172
Горячая вода	39	60
Электроэнергия (квартиры)	28,2	109
Электроэнергия (инженерное оборудование)	5,3	21
Общее потребление	184,5	362

С применением пакета PHPP (Passive House Planning Package) для типового дома были разработаны две компьютерные вычислительные модели: стандартные конструкции (базовый вариант) и дом с применением технологий энергопассивных зданий (улучшенный вариант) (табл. 2).

Таблица 2
Удельное потребление конечной энергии (базовый и улучшенный вариант)

Table 2

Specific consumption of final energy (basic and improved variants)

Ресурс	Потребление конечной энергии, кВт·ч/м ² год	
	базовый вариант	улучшенный вариант
Отопление	112	10
Горячая вода	39	18,5
Охлаждение	0	0
Бытовое эл. потребление	28	18
Инженерное оборудование	5	1,8
Итого	185	48

Теплоснабжение дома в базовом варианте – централизованное теплоснабжение от городских сетей, в улучшенном варианте – тепловой насос (типа грунт-вода).

Для каждого варианта определен тепловой баланс здания (трансмиссионные, вентиляционные потери, теплопоступления от внутренних источников и теплопоступления от солнца через светопрозрачные конструкции), выполнен анализ жизненного цикла (life cycle assessment) для расчета экономической и энергетической целесообразности выбранных технических решений и достигаемого снижения эмиссии парниковых газов. Для каждого варианта конструкций определена доля энергопотребления, покрытие которой возможно за счет фотоэлектрических панелей (для каждого из трех типов) [5-6]. В улучшенном варианте дома, при применении монокристаллических панелей, можно покрыть свыше 101% от потребности дома в конечной энергии.

Результаты исследования

В ходе исследования определено, что наиболее значимым фактором, ограничивающим увеличение уровня тепловой защиты здания, являются энергозатраты на производство строительных материалов, которые при увеличении толщины утеплителя типового дома сверх базовой величины более чем на 500 мм, приводят к росту потребления энергии в течение жизненного цикла (с учетом энергозатрат на производство строительных материалов) (рисунок).

Сравнение эффективности жизненного цикла базового и улучшенного варианта приведено в табл. 3.

- 1 - Потребление энергии, кВт·ч/м²
- 2 - Общий углеродный потенциал, кг экв. CO₂/м²
- 3 - Общая стоимость, евро/м²
- 4 - Стоимость материала, евро/м²

Анализ эффективности дополнительного утепления типового дома в течение жизненного цикла
Life cycle assesement of a typical building with additional in sulation

Таблица 3

Сравнение эффективности жизненного цикла базового и улучшенного вариантов

Table 3

Comparison of base and improved variants

Категория	Базовый вариант	Улучшенный вариант	% изменения
Эмиссия парниковых газов от материалов (GWP), кг CO ₂ эк.	5 098 285	4 234 120	-17
Энергия на производство материалов и оборудования PE, МВт·ч	18 670	16 996	-9
Общее потребление конечной энергии, Вт·ч/м ²	185	48	-74
Суммарная эмиссия парниковых газов (GWP), тонн CO ₂ эк	171 502	9 760	-94
Суммарное потребление первичной энергии в течение жизненного цикла, МВт·ч	587621	51 488	-91
Стоимость строительства, евро	5 255	6 426	+22
Стоимость жизненного цикла, тыс. евро	198 347	8 577	-96

Закключение

В результате проведенного исследования доказана возможность строительства многоэтажного многоквартирного жилого дома с нулевым потреблением энергии (по годовичному балансу). Увеличение эффективности фотоэлектрических панелей и снижение их стоимости существенно скажется на эффективности

жизненного цикла здания. Высокая эмиссия парниковых газов от существующих энергоисточников в Екатеринбурге позволяет также достичь компенсации эмиссии парниковых газов в процессе жизненного цикла здания, что позволяет сделать вывод о возможности строительства здания нулевой эмиссии углерода в данном климате.

Список литературы

1. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.
2. http://www.zeb.aau.dk/digitalAssets/29/29578_nzeb-working-definition.pdf (25.03.2015).
3. Torcellini P., Pless S., Deru M. NREL; D. Crawley: U.S. Department of Energy, 2.
4. http://www.akademicheskij.org/articles/obshhaja_informacija851 (25.03.2015).
5. Pirogov A. Zero Carbon Building For Cold Climate. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014.
6. Пирогов А.Н., Щеклеин С.Е. Энергетический дизайн – новый концептуальный подход при проектировании и строительстве энергоэффективных и экологических малоэтажных жилых зданий. Научно-практ. конф. «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий» ИТФ СО РАН, 19-20 марта 2013. С. 67-72.

References

1. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.
2. http://www.zeb.aau.dk/digitalAssets/29/29578_nzeb-working-definition.pdf (25.03.2015).
3. Torcellini P., Pless S., Deru M. NREL; D. Crawley: U.S. Department of Energy, 2.
4. http://www.akademicheskij.org/articles/obshhaja_informacija851 (25.03.2015).
5. Pirogov A. Zero Carbon Building For Cold Climate. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014.
6. Pirogov A.N., Šeklein S.E. Energetičeskij dizajn – novyj konceptual'nyj podhod pri proektirovanii i stroitel'stve energoëffektivnyh i èkologičnyh maloëtažnyh žilyh zdaniy. Naučno-prakt. konf. «Energo- i resursoëffektivnost' maloëtažnyh žilyh zdaniy» ITF SO RAN, 19-20 marta 2013. S. 67-72.

Транслитерация по ISO 9:1995