ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

УДК 620.9:658.26 https://doi.org/10.70769/218-4732.ITJ.2026-3.11

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ «ЭНЕРГОАУДИТ ЗДАНИЙ» ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЖИЛЫХ ДОМОВ

Худаяров Музаффар Бурханович[1], доктор технических наук, профессор,
E-mail: muzaffar_hb@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2829-8980, Science ID: DQD-0525-0004
Курбонов Сарвар Холхожаевич[2], директор**,** E-mail: oloviddin1985@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-7651-1048, Science ID:MNM-0826-0121

[1]Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова,
г. Ташкент, Узбекистан
[2]СП ООО “SKB”, г. Ташкент, Узбекистан

Аннотация. *В статье рассмотрены вопросы моделирования и составления баланса энергопотребления жилого здания с учетом влияющих факторов. Для решения данной задачи используются ряд методов, а также программных средств, основанных на различных подходах и использующих различный объем исходной информации по зданию и внешним климатическим условиям. В качестве примера представлен процесс моделирования энергопотребления жилого дома с использованием программы «ЭНЕРГОАУДИТ ЗДАНИЙ», основанного на физических законах и учитывающий квазистационарное состояние в течение одного месяца.*

Результаты моделирования показали, что после реализации мероприятий по повышению энергоэффективности в системах отопления и горячего водоснабжения жилого дома имеется возможность сокращения энергопотребления до 219,05 кВт·час/м^2 или около 15 % относительно текущего уровня, а также повышения класса энергоэффективности с текущего уровня D (нормальный) до уровня C (повышенный).

Результаты моделирования с помощью данной программы могут использоваться в качестве исходных данных для энергетической сертификации, энергоаудита зданий, а также для оценки соответствия зданий строительным нормам.

Ключевые слова: *квазидинамическое моделирование, жилое здание, энергоаудит зданий, баланс энергопотребления, энергетическая эффективность, энергосберегающие мероприятия*

UO‘K 620.9:658.26

AHOLI TURAR JOYI ENERGIYA ISTE’MOLINI MODELLASHTIRISHDA “BINOLAR ENERGOAUDITI” DASTURINI QO‘LLASH

Xudayarov Muzaffar Burxanovich[1], texnika fanlari doktori, professor
Kurbonov Sarvar Xolxojaevich[2], direktor

[1]Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, O‘zbekiston
[2]QK “SKB” MChJ, Toshkent, O‘zbekiston

Annotatsiya. *Maqolada ta’sir etuvchi omillarni hisobga olgan holda turar joy binosining energiya iste’moli balansini modellashtirish va tuzish masalalari ko‘rib chiqilgan. Ushbu masalalarni yechish uchun turlicha yondashuvlarga asoslangan hamda bino va tashqi iqlim sharoitlari bo‘yicha turli hajmdagi boshlang‘ich ma’lumotlardan foydalanadigan bir qator usullar va dasturiy vositalar qo‘llaniladi. Misol tariqasida kvazidinamik yondashuvga asoslangan “BINOLAR ENERGOAUDITI” dasturi yordamida aholi turar joyi energiya iste’molini modellashtirish jarayoni keltirilgan.*

Modellashtirish natijalari shuni ko‘rsatdiki, turar joy binosining issiqlik ta’minoti va issiq suv ta’minoti tizimlarida energetik samaradorlikni oshirish bo‘yicha tadbirlar amalga oshirilgandan so‘ng energiya iste’molini 219,05 kVt·soat/m² gacha yoki joriy darajaga nisbatan taxminan 15 % ga

ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

kamaytirish, shuningdek, energiya samaradorligi sinfini joriy D (normal) darajadan S (yuqori) darajagacha oshirish imkoniyati mavjud.

Ushbu dastur yordamida olingan modellashtirish natijalari binolarni energetik sertifikatlash va energoauditdan o‘tkazish, shuningdek, binolarning qurilish me’yorlariga muvofiqligini baholash uchun boshlang‘ich ma’lumotlar sifatida ishlatilishi mumkin.

Kalit so‘zlar: *kvazidinamik modellashtirish, turar joy binosi, binolar energoauditi, energiya iste’moli balansi, energetik samaradorlik, energiya tejovchi tadbirlar.*

UDC 620.9:658.26

APPLICATION OF THE “BUILDING ENERGY AUDIT” PROGRAM FOR MODELING THE ENERGY CONSUMPTION OF RESIDENTIAL BUILDINGS

Muzaffar Khudayarov[1], Doctor of Technical Sciences, Professor
Sarvar Kurbonov[2], Director

[1]Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan
[2]JV LLC “SKB”, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. *The article examines the modeling and balancing of residential building energy consumption, taking into account various influencing factors. To solve this problem, a number of methods and software tools are used, based on different approaches and requiring varying amounts of input data regarding the building and external climatic conditions. As an example, the energy modeling process of a residential building using the "BUILDING ENERGY AUDIT" software which is based on physical laws and accounts for quasi-stationary states over a one-month period is presented.*

The simulation results demonstrated that after implementing energy efficiency measures in the residential building's heating and domestic hot water systems, it is possible to reduce energy consumption to 219.05 kWh/m² or by approximately 15 % relative to the current level and to upgrade the energy efficiency class from the current level D (normal) to level C (increased).

The modeling results obtained using this software can serve as input data for building energy certification, energy audits, and assessing compliance with building codes and standards.

Keywords: *quasi-dynamic modeling, residential building, building energy audit, energy consumption balance, energy efficiency, energy-saving measures*

Введение

Для различных типов зданий и, в частности, жилых домов определение картины притока и потребления энергоресурсов, учитывающие разные влияющие факторы (климатические данные, геометрию здания, структуру и состав ограждающих конструкций, энергопотребляющее оборудование и др.), очень важны при проектировании, эксплуатации, а также, при проведении энергетических обследований (энергоаудитов). Так, неправильная оценка энергопотребления здания приводит к увеличению последующих эксплуатационных расходов.

Существующие в настоящее время подходы для моделирования и оценки энергопотребления зданий можно условно разделить на три типа: «белый ящик», «черный ящик» и «серый ящик» [1].

Модели «белого ящика» основаны на физическом моделировании с учётом ограждающих конструкций, оборудования, людей в здании, различных систем жизнеобеспечения, климатических условий и др. Моделирование при данном подходе занимает много времени из-за большого количества необходимых параметров, но результаты моделирования более точны, чем в других типах моделей. В [2] построена подробная модель офисного здания в EnergyPlus, после чего её параметры калибровались на основе реальных измерений. Для калибровки энергоэффективности систем отопления, освещения, оборудования, вентиляции и кондиционирования воздуха в здании используются почасовые и

ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

ежемесячные данные о мощности, энергопотреблении и температуре. В [3] авторы предлагают калибровочную платформу байесовского вывода, используемую для моделирования энергопотребления зданий. Также существует несколько популярных программ, в которых используются модели «белого ящика», например, EnergyPlus [4], TRNSYS [5] и др [6-8].

Ещё одним подходом к моделированию энергопотребления зданий являются модели «черного ящика». Данные модели физически не интерпретируются и опираются на данные, обработка которых выполняется различными методами машинного обучения. В [9] представлен обзор исследований, посвященных разработке моделей прогнозирования энергопотребления зданий на основе данных. Рассмотрены модели на основе метода опорных векторов (SVM), искусственных нейронных сетей (ИНС), деревьев решений и других статистических алгоритмов. В [10] ряд алгоритмов машинного обучения используются для прогнозирования энергопотребления здания университета. В [11] рассматривается упрощенная модель на основе генетического алгоритма (GA). В [12] рассматриваются способы объединения физических моделей и моделей на основе данных. В частности, результаты физической модели используются как вход для моделей на основе данных (ML, residual learning, surrogate modeling, fine-tuning). В [13] применяется physics-informed neural network, где физические зависимости теплопотерь здания вводятся непосредственно в процесс обучения нейронной сети, а в [14] рассматривается прогнозирование энергопотребления здания с помощью Long Short-Term Memory (LSTM). Особенность подхода — способность LSTM учитывать долговременные зависимости временного ряда.

Модели «серого ящика» [15] иногда называют моделями пониженного порядка или упрощенными моделями. Модель «серого ящика» более интерпретируема, чем модель «черного ящика». Она более эффективна с точки зрения вычислений и проще, чем модель «белого ящика». Наиболее распространённой моделью «серого ящика» является резистивно-ёмкостная (RC) модель. Так в [16] авторами рассмотрена модель «серого ящика» структуры R2C2, параметры которой первоначально идентифицируются на основе данных, сформированных детальной моделью «белого ящика» здания.

Выбор того или иного типа моделирования зависит от типа решаемых задач. Так при энергоаудите здания наиболее важной задачей, помимо оценки величины и структуры энергопотребления, является оценка влияния энергосберегающих мероприятий. С этой точки зрения из рассмотренных трёх типов моделирования наиболее приемлемой является модель «белого ящика», так как она, основана на физических законах теплопередачи, вентиляции, инфильтрации, солнечных и внутренних теплопоступлений и позволяет непосредственно учитывать конструктивные и теплофизические характеристики здания. Их основными преимуществами для энергоаудита зданий являются физическая интерпретируемость результатов, возможность формирования энергетического баланса, определения структуры тепловых потерь и непосредственной оценки эффекта от энергосберегающих мероприятий. Вместе с тем их применение требует значительного объёма исходных данных о геометрии здания, теплофизических свойствах материалов, режимах эксплуатации и климатических условиях. В связи с этим для энергетического аудита жилых зданий наиболее целесообразным представляется применение упрощённых моделей «белого ящика», основанных на физических уравнениях теплового баланса и реализующую метод квазистационарного состояния. В отличие от детального динамического моделирования, требующего почасовых (субчасовых) климатических данных и большого количества параметров, квазистационарный подход позволяет выполнять расчёт для укрупнённого временного интервала, например, одного месяца, в пределах которого наружные климатические воздействия, режим эксплуатации и теплотехническое состояние здания рассматриваются посредством усреднённых характеристик.

Материалы и методы

Одной из таких программ, где используется упрощённая модель «белого ящика» является программа «ЭНЕРГОАУДИТ ЗДАНИЙ», разработанная в среде Excel.

ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

Программа «ЭНЕРГОАУДИТ ЗДАНИЙ» служит для построения энергетической модели как строящихся, так и реконструируемых зданий, а также позволяет выполнять оценку мероприятий по повышению энергоэффективности в существующих зданиях. В программе предусмотрен выбор различных типов зданий. Например, административные здания такие как офисы; социальные объекты - больница, поликлиника; образовательные учреждения - детский сад, школа, университет; жилые здания – многоквартирный дом, жилой дом. Также имеется возможность добавления и других типов зданий.

Программа учитывает квазистационарное состояние, где в качестве неизменного временного периода принят месяц. Расчёты выполняются с учетом влияющих факторов для каждого месяца года отдельно. На основе выполненных расчётов определяется годовое энергопотребление здания. Расчёты в программе выполняются по девяти расходным составляющим внутри и снаружи здания, к которым относятся:

- Отопление – потребность в покрытии потерь тепла вследствие теплопроводности и инфильтрации за вычетом тепла от солнечной радиации, освещения, приборов и метаболических тепловыделений от присутствия людей;
- Механическая вентиляция т.е. её влияние на расход тепловой энергии – потребность в покрытии потерь тепла от механической вентиляции;
- Горячее водоснабжение (ГВС) – потребность в горячей воде по зданию;
- Освещение – потребность в электроэнергии системой освещения внутри здания;
- Вентиляторы – потребность в электроэнергии вентиляторов внутри здания;
- Насосы – потребность в электроэнергии насосов во всех системах внутри здания;
- Прочее электрооборудование - потребность для всего оборудования, которое не учтено в других статьях бюджета;
- Охлаждение – потребность для охлаждения кондиционируемых помещений;
- Наружное оборудование – потребность в электроэнергии оборудования вне здания.

Расчеты в программе выполняются для четырех различных условий:

- По норме – энергопотребление по данным принятых по умолчанию;
- по факту - существующая ситуация по энергопотреблению здания;
- базовый уровень – существующая ситуация при выполнении нормативов;
- после мероприятий - энергопотребление после выполнения мероприятий.

При выполнении расчетов учитывается взаимное влияние различных систем и энергосберегающих мероприятий, т.е. эффекты от систем и индивидуальных мероприятий не могут механически суммироваться, а должны рассчитываться как единый пакет.

Одним из преимуществ программы является учёт местных климатических условий и нормативных требований Узбекистана [17-19].

Результаты

В качестве примера в статье представлен процесс моделирования энергопотребления жилого дома с учётом его текущего состояния (по факту).

На рис.1. представлена форма для ввода данных по проекту. В данном случае вводится информация по зданию, а также климатические данные в зависимости от выбранного региона. Также вводятся данные по кондиционируемой площади и объему, количеству людей и метаболическому теплу от них, графика пребывания людей и графика отопления в рабочие и выходные дни.

В процессе выполнения энергоаудита, проведен сбор необходимой для моделирования информации. Предварительно выполняется ввод данных по наружным стенам, дверям и окнам (рис. 2) здания с учётом их направления. По каждой конструкции вводятся: площадь – S, м^2; сопротивление – R, м^2·°С/Вт (коэффициент – U, Вт/м^2·К) теплопередачи, коэффициент теплопоступлений - g и количество – n для окон).

ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

Далее вводится информация по крыше и полу (рис. 3). По каждой конструкции вводятся: площадь – S, м^2; сопротивление – R, м^2·°C/Вт (коэффициент – U, Вт/м^2·К) теплопередачи, коэффициент теплопоступлений - g и наклон для фонарей на крыше).

Далее вводится информация по системам отопления, вентиляции, ГВС, вентиляторам и насосам, системе освещения и прочего электрооборудования, охлаждения.

Ввод исходных данных по проекту

Название проекта	здание жилого дома				
Адрес	Ташкентская обл, Юкори-Чирчикский район,ул. Гулистон, 14				
Климатические данные	Ташкент				
Тип здания	Жилой дом				
Градусо-сутки	2000-3000			°C*сут	
Кондиционируемая площадь	Ввод		110	м^2	
Кондиционируемый объем	Из базы		560	м^3	
Теплоемкость здания	72,00		72,00	Вт/м^2*К	
Человек /Метаболическое тепло	5	4,55	5,00	Вт/м^2	
Расчётная внутренняя и наружная температура	20	-14	20	-16	°C

Площадь ограждающих конструкций			
Стены	Окна	Крыша	Пол
м2			
453,20	30,50	110,00	110,00

График пребывания		Отопительный график	
Раб.	24	Раб.	24
Суб.	24	Суб.	24
Вос.	24	Вос.	24

Ручной ввод данных				ОП	
1	10	25	4	10 окт	10 апр

Среднемесячная температура	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек
Ручной ввод данных	-2,3	3,2	9,4	16,0	24,3	28,5	31,2	28,7	21,3	14,1	6,9	-3,2
Средняя температура	-0,4	2,0	7,9	14,7	20,2	24,9	27,1	25,1	19,6	12,8	6,7	2,0

Солнечные поступления	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек
Ручной ввод данных по гор. лов.	73	113	149	229	292	328	320	287	229	149	87	63
Горизонтальная поверхность	73	113	149	229	292	328	320	287	229	149	87	63
Ручной ввод данных по сев. напр.	27	39	43	58	75	90	81	63	50	39	27	21
Северное направление	27	39	43	58	75	90	81	63	50	39	27	21
Ручной ввод данных по вос. напр.	57	73	89	137	171	193	181	173	141	100	57	42
Восточное направление	57	73	89	137	171	193	181	173	141	100	57	42
Ручной ввод данных по южн. напр.	125	151	134	153	135	124	131	160	194	184	132	110
Южное направление	125	151	134	153	135	124	131	160	194	184	132	110
Ручной ввод данных по зап. напр.	53	78	94	138	169	182	179	170	239	96	58	43
Западное направление	53	78	94	138	169	182	179	170	144	96	58	43

Рис. 1. Ввод исходных данных по жилому дому.

Ввод данных по наружным стенам, дверям и окнам

Ориентация	По факту								
Северо-Восток, (СВ)	№	Стены			Окна				
		S, м2	R, м2*oC/Вт	U, Вт/м2К	S, м2	R, м2*oC/Вт	U, Вт/м2К	g	n
Общая площадь	1	78	3	0,33	6,3	0,4	2,50	0,8	1
84,30	2	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0
двери	3	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0
0	4	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0
0	5	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0
Сумма/Эквивалент		78,00	3,00	0,33	6,30	0,40	2,50	0,80	

Ориентация	По факту								
Юго-Восток, (ЮВ)	№	Стены			Окна				
		S, м2	R, м2*oC/Вт	U, Вт/м2К	S, м2	R, м2*oC/Вт	U, Вт/м2К	g	n
Общая площадь	1	72	3	0,33	5	0,4	2,50	0,8	1
79,10	2	2,1	2	0,50	0	0	0,00	0	0
двери	3	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0
2,1	4	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0
0	5	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0
Сумма/Эквивалент		74,10	2,97	0,34	5,00	0,40	2,50	0,80	

Рис. 2. Ввод данных по наружным стенам и окнам здания.

ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

Ввод данных по крыше и полу

Общая площадь	№	По факту: Крыша S, м2	Крыша R, м2*оС/Вт	Крыша U, Вт/м2К	Фонари S, м2	Фонари R, м2*оС/Вт	Фонари U, Вт/м2К	Фонари g	Фонари Наклон	
	1	110	3,4	**0,29**	0	0	**0,00**	0	0	Север
110,00	2	0	0	**0,00**	0	0	**0,00**	0	0	Восток
с кровлей	3	0	0	**0,00**	0	0	**0,00**	0	0	Юг
110,00	4	0	0	**0,00**	0	0	**0,00**	0	0	Запад
без кровли	5	0	0	**0,00**	0	0	**0,00**	0	0	СВ/СЗ
0,00	6	0	0	**0,00**	0	0	**0,00**	0	0	ЮВ/ЮЗ
Сумма/Эквивалент		**110,00**	**3,40**	**0,29**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**		

Общая площадь	№	По факту: Пол S, м2	Пол R, м2*оС/Вт	Пол U, Вт/м2К
110,00	1	110	5	**0,200**
по грунту	2	0	0	**0,000**
194,00	3	0	0	**0,000**
на лагах	4	0	0	**0,000**
-84,00	5	0	0	**0,000**
Сумма/Эквивалент		**110,00**	**5,00**	**0,20**

Рис. 3. Ввод данных по крыше и полу здания.

Для системы отопления (рис. 4) учитываются такие показатели как: характеристики ограждающих конструкций, теплопоступления от солнечной радиации, инфильтрация, снижение температуры в нерабочее время, вклад от систем вентиляции, освещения и прочего оборудования, КПД теплоотдачи, распределения и генерации, наличие систем автоматики для управления, выполнение мероприятий по эксплуатации, обслуживанию и энергомониторингу.

Ввод данных по системе отопления

1) Отопление				*По Нормам*		*По Факту*		*Базовая линия*		*После Мер*	
R - стены	м2*оС/Вт	U - стены	Вт/м2К	**1,79**	**0,56**	**2,99**	**0,33**	**2,99**	**0,33**	**2,99**	**0,33**
R - окон	м2*оС/Вт	U - окон	Вт/м2К	**0,39**	**2,56**	**0,40**	**2,50**	**0,40**	**2,50**	**0,40**	**2,50**
R - крыши	м2*оС/Вт	U - крыши	Вт/м2К	**2,56**	**0,39**	**3,40**	**0,29**	**3,40**	**0,29**	**3,40**	**0,29**
R - пола	м2*оС/Вт	U - пола	Вт/м2К	**3,57**	**0,28**	**5,00**	**0,20**	**5,00**	**0,20**	**5,00**	**0,20**
Коэффициент компактности				**0,87**		**1,26**		**1,26**		**1,26**	
Коэффициент остекления			**%**	**27,73**		**27,73**		**27,73**		**27,73**	
Солнечные поступления				**0,80**		**0,80**		**0,80**		**0,80**	
Инфильтрация			**1/час**	**0,50**		**0,5**		**0,5**		**0,5**	
Внутренняя температура			оС	**20,0**		**20**		**20**		**20**	
Сниженная температура			оС	**18,0**		**20**		**20**		**20**	
Вклад от вентиляции (отопл)			кВт*час/м2 год	**0,00**		**0,00**		**0,00**		**0,00**	
Вклад от освещения			кВт*час/м2 год	**5,88**		**2,26**		**2,26**		**2,26**	
Вклад от прочего оборудования			кВт*час/м2 год	**3,36**		**3,61**		**3,61**		**3,61**	
Потребность в энергии			***кВт*час/м2 год***	**190,46**		**125,00**		**125,00**		**125,00**	
КПД теплоотдачи			%	**90**		90		**90**		**96**	
КПД распределения			%	**97**		95		**95**		**97**	
Автомат. Управление			%	**97**		95		**95**		**97**	
Э иО / ЭМ			%	**98**		97		**97**		**97**	
Сумма			***кВт*час/м2 год***	**229,51**		**158,65**		**158,65**		**142,67**	
КПД генерации			%	**98**		90		**90**		**96**	
Потребление энергии			***кВт*час/м2 год***	**234,19**		**176,28**		**176,28**		**148,61**	
Потери энергии			***кВт*час/м2 год***	**43,73**		**51,28**		**51,28**		**23,61**	
			%	**18,7**		**29,1**		**29,1**		**15,9**	

Рис. 4. Ввод данных по системе отопления.

При наличии системы механической вентиляции (рис. 5) для нее выполняется ввод следующих данных: время работы, кратность воздухообмена, средняя температура приточного воздуха, КПД утилизационной установки, КПД теплоотдачи, распределения и генерации, наличие систем автоматики, выполнение мероприятий по эксплуатации, обслуживанию и энергомониторингу, наличие увлажнения воздуха. При использовании естественной вентиляции она учитывается как инфильтрация и вводится в окне для системы отопления (рис. 4).

ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

Ввод данных по системе вентиляции

2) Вентиляция (отопл)		*По Нормам*	*По Факту*	*Базовая линия*	*Меры*
Время работы	ч/нед	0	0,0	0,0	0,0
Кратность воздухообмена	м3/час м2	0	0	0	0
Температура на подаче	oC	20	0	0	0
Утилизация тепла	%	0	0	0	0
Потребность в энергии	***кВт*час/м2 год***	0,00	0,00	0,00	0,00
КПД теплоотдачи	%	90	95	95	95
КПД распред. системы	%	98	90	90	95
Автомат. Управление	%	97	90	90	95
Увлажнение		Нет	Нет	Нет	Нет
Э иО / ЭМ	%	98	93	93	93
Сумма	***кВт*час/м2 год***	0,00	0,00	0,00	0,00
КПД генерации	%	98	92	92	92
Потребление энергии	***кВт*час/м2 год***	0,00	0,00	0,00	0,00
Потери энергии	***кВт*час/м2 год***	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
	%	0,0	0,0	0,0	0,0
Вклад в отопление		0,00	0,00	0,00	0,00

Рис. 5. Ввод данных по системе механической вентиляции.

По системе ГВС (рис. 6) вводятся следующие данные: температура горячей воды, норма расхода горячей воды на 1 человека в месяц, КПД распределения и генерации, наличие систем автоматики, выполнение мероприятий по эксплуатации, обслуживанию и энергомониторингу. Расход тепловой энергии на ГВС выполняется как с учётом увеличения объема, так и за счет увеличения температурного перепада в зимний период.

Ввод данных по системе горячего водоснабжения

3) Горячее водоснабжение		*По Нормам*	*По Факту*	*Базовая линия*	*Меры*
Температура горячей воды	°C	60,00	60	60	55
Расход горячей воды на 1 человека в месяц	л/чел	100	50,0	50,0	50,0
Расход горячей воды на здание в месяц	м3	13,0	6,5	6,5	6,5
Потребность в энергии	***кВт*час/м2 год***	80,31	40,15	40,15	36,02
КПД распред. системы	%	97	95	95	97
Автомат. Управление	%	97	95	95	97
Э иО / ЭМ	%	98	97	97	97
Сумма	***кВт*час/м2 год***	87,09	45,87	45,87	39,46
КПД генерации	%	98	90	90	96
Потребление энергии	***кВт*час/м2 год***	88,87	50,96	50,96	41,11
Потери энергии	***кВт*час/м2 год***	8,56	10,81	10,81	5,09
	%	9,6	21,2	21,2	12,4

Рис. 6. Ввод данных по системе горячего водоснабжения.

По системе охлаждения (рис. 7) используются следующие данные: температура для включения системы охлаждения, внешние (через ограждающие конструкции, естественную вентиляцию и инфильтрацию, за счёт солнечной радиации) и внутренние (метаболические от людей, от системы освещения и прочего оборудования) теплопоступления. В случае когда охлаждается отдельное помещение или часть здания также вводится информация по площади занимаемая этими помещениями, а также температура внутри этих помещений. Для определения расхода электроэнергии на охлаждение, учитывается класс и соответствующий сезонный коэффициент энергоэффективности.

Далее вводится информация по электрооборудованию (рис. 8). По системе освещения и прочего оборудования вводятся данные по времени работы в течение недели, средняя удельная мощность и данные по максимальной единовременной мощности для определения баланса мощности. В разделе вентиляторы и насосы дополнительно учитывается выполнение мероприятий по эксплуатации, обслуживанию и энергомониторингу. По наружному

ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

оборудованию вводятся данные годового энергопотребления внешними установками (наружное освещение, фонтаны и др.).

Ввод данных по системе охлождения

8) Охлаждение		*По Нормам*	*По Факту*	*Базовая линия*	*Меры*
Температура включения охлаждения	°C	*25*	*25*	*25*	*25*
Теплопоступления через ограждающие конструкции	кВт*час/м2 год	*31,0*	*31,0*	*31,0*	*31,0*
Ест. вентиляция и инфильтрация	кВт*час/м2 год	*7,9*	*7,9*	*7,9*	*7,9*
Солнечные теплопоступления	кВт*час/м2 год	*49,6*	*49,6*	*49,6*	*49,6*
Теплопоступления от освещения	кВт*час/м2 год	*2,9*	*2,5*	*2,5*	*2,5*
Теплопоступления от прочего оборудования	кВт*час/м2 год	*1,6*	*3,4*	*3,4*	*3,4*
Метаболическое тепло от людей	кВт*час/м2 год	*2,3*	*2,3*	*2,3*	*2,3*
Удельный расход холода для здания	***кВт*час/м2 год***	95,3	96,7	96,7	96,7
Площадь помещений для охлаждения	м2	*25*	*25*	*25*	*25*
Коэффициент площади		*0,2*	*0,2*	*0,2*	*0,2*
Температура внутри помещения	°C	*20,0*	*20,0*	*20,0*	*20,0*
Удельный расход холода для охлаждаемых помещений	***кВт*час/м2 год***	21,7	22,0	22,0	22,0
Класс энергоэффективности		C	C	C	C
Сезонный коэффициент энерго-эффективности охлаждения	***SEER***	4,1	4,1	4,1	4,1
Потребление электроэнергии	***кВт*час/м2 год***	5,28	5,36	5,36	5,36

Рис. 7. Ввод данных по системе охлаждения.

Ввод данных по системе освещения и электрооборудованию

5) Вентиляторы		*По Нормам*	*По Факту*	*Базовая линия*	*Меры*
время работы	час/нед	0	0,00	0,00	0,00
средняя мощность	Вт/м2	0,00	0	0	0
Э и О/ЭМ	%	98	90	90	90
Потребление энергии	кВт*час/м2 год	0,00	0,00	0,00	0,00
6.1) Насосы системы вентиляции		*По Нормам*	*По Факту*	*Базовая линия*	*Меры*
время работы	час/нед	0	0,00	0,00	0,00
средняя мощность	Вт/м2	0,00	0	0	0
Э и О/ЭМ	%	98	90	90	90
Потребление энергии	*кВт*час/м2 год*	0,00	0,00	0,00	0,00
6.2) Насосы системы отопления		*По Нормам*	*По Факту*	*Базовая линия*	*Меры*
время работы	час/от.пер.	4392	4392	4392	4392
средняя мощность	Вт/м2	0,30	0,1	0,1	0,1
Потребность в энергии	*кВт*час/м2 год*	1,32	0,44	0,44	0,44
Э и О/ЭМ	%	98	98	98	98
Потребление энергии	*кВт*час/м2 год*	1,34	0,45	0,45	0,45
6.3) Насосы системы охлаждения		*По Нормам*	*По Факту*	*Базовая линия*	*Меры*
Потребление энергии	*кВт*час/м2 год*	0,00	0,00	0,00	0,00
7.1) Прочее (влияющее)		*По Нормам*	*По Факту*	*Базовая линия*	*Меры*
время работы	час/нед	72	40,00	40,00	40,00
средняя мощность	Вт/м2	2,00	4,00	4,00	4,00
Потребление энергии	*кВт*час/м2 год*	7,51	8,34	8,34	8,34
7.2) Прочее (невлияющее)		*По Нормам*	*По Факту*	*Базовая линия*	*Меры*
время работы	час/нед	72	40,00	40,00	40,00
средняя мощность	Вт/м2	1,00	4	4	4
Потребление энергии	*кВт*час/м2 год*	3,75	8,34	8,34	8,34
9) Наружное оборудование		*По Нормам*	*По Факту*	*Базовая линия*	*Меры*
Потребление энергии	*кВт*час/ год*	0,00	180,00	180,00	180,00
	*кВт*час/м2 год*	0,00	1,64	1,64	1,64

Рис. 8. Ввод данных по электрооборудованию.

Одним из результатов программы является баланс энергии (рис. 9), где на входе учитываются данные приборов учёта по зданию, а также генерация от ФЭС и/или солнечных коллекторов при наличии. Расходная часть включает девять показателей.

ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

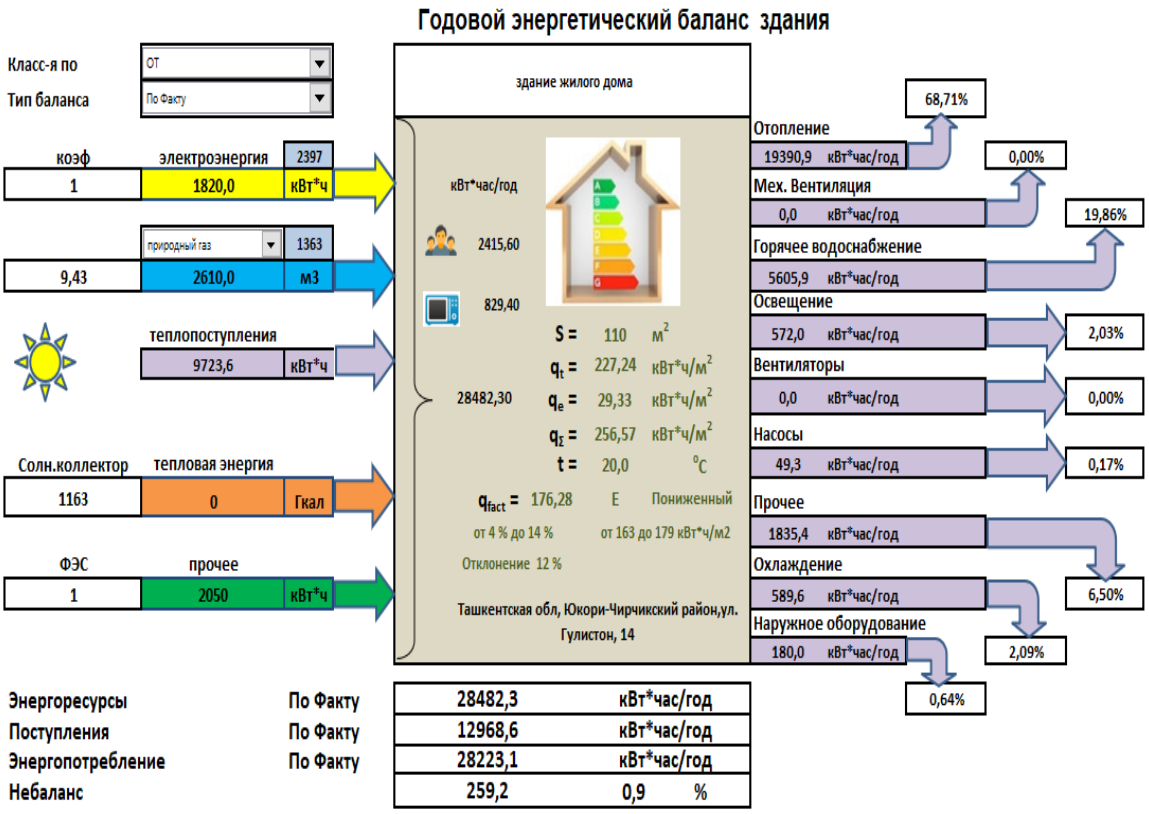


Рис. 9. Баланс энергопотребления здания.

Энергетический баланс здания показывает, что наибольший потенциал для повышения энергоэффективности имеют система отопления и горячего водоснабжения. Учитывая это для рассматриваемого здания, рассмотрим выполнение энергосберегающих мероприятий именно в этих системах. Оценку энергосберегающих мероприятий рассмотрим на примере трёх мероприятий, связанных с модернизацией системы отопления, а также трех мероприятий, связанных с модернизацией системы горячего водоснабжения.

Для системы отопления данное реализуется путём улучшения: КПД теплоотдачи с 90 до 96 % (замена радиаторов), КПД распределения с 95 до 97 % (замена трубопровода), КПД генерации с 90 до 96 % и автоматического управления с 95 до 97 % (замена котла с более новой автоматикой) (на рис. 4 выделено красным).

Для системы горячего водоснабжения данное реализуется путём: снижения температуры горячей воды с 60 до 55 °С, улучшения КПД распределения с 95 до 97 % (замена трубопровода), КПД генерации с 90 до 96 % и автоматического управления с 95 до 97 % (замена котла с более новой автоматикой) (на рис. 6 выделено красным).

Энергетический баланс и оценка энергосбережения за счёт внедрения энергосберегающих мероприятий представлены в табл.1.

Экономия определяется за счёт разницы между энергопотреблением по базовой линии и энергопотреблением после мер. Экономия составила:

по системе отопления – 27,67 кВт*час/м^2 или 3043,67 кВт*час в год или 10,8 % относительно текущего состояния.

по системе горячего водоснабжения – 9,86 кВт*час/м^2 или 1084,22 кВт*час в год или 3,8 % относительно текущего состояния.

общая экономия по всем мероприятиям – 37,53 кВт*час/м^2 или 4127,89 кВт*час в год или 14,6 % относительно текущего состояния здания.

В дополнение к балансу, также определяется класс энергоэффективности здания (рис. 10), который учитывает нормативные требования [18] и включает только работу системы отопления и влияние вентиляции на систему отопления.

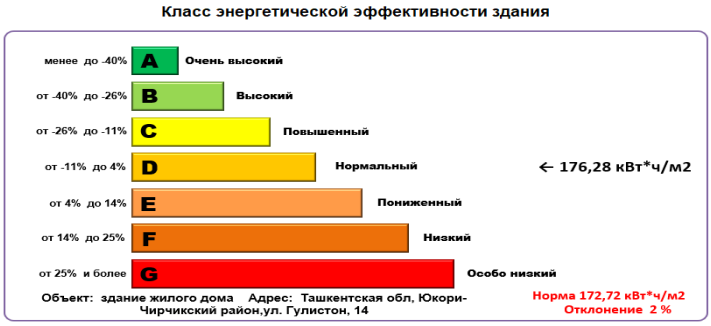
ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

Таблица 1. Энергетический баланс и оценка энергосбережения

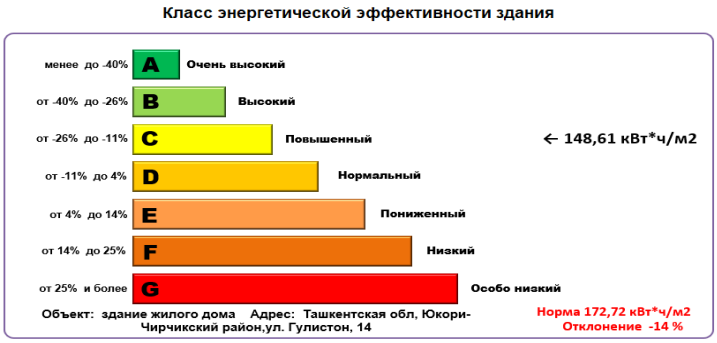
№	Статьи баланса	По Нормам		По Факту		Базовая линия		После Мер	
		кВт*час/м2	кВт*час/год	кВт*час/м2	кВт*час/год	кВт*час/м2	кВт*час/год	кВт*час/м2	кВт*час/год
1	Отопление	234,19	25761,28	176,28	19390,92	176,28	19390,92	148,61	16347,25
2	Мех. Вентиляция	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	Горячее водоснабжение	88,87	9775,55	50,96	5605,90	50,96	5605,90	41,11	4521,68
4	Освещение	13,10	1441,44	5,20	572,00	5,20	572,00	5,20	572,00
5	Вентиляторы	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	Насосы	1,34	147,89	0,45	49,30	0,45	49,30	0,45	49,30
6.1	*системы вентиляции*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*
6.2	*системы отопления*	*1,34*	*147,89*	*0,45*	*49,30*	*0,45*	*49,30*	*0,45*	*49,30*
6.3	*системы охлаждения*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*	*0,00*
7	Прочее	11,26	1238,91	16,69	1835,43	16,69	1835,43	16,69	1835,43
7.1	*влияющее*	*7,51*	*825,94*	*8,34*	*917,71*	*8,34*	*917,71*	*8,34*	*917,71*
7.2	*невлияющее*	*3,75*	*412,97*	*8,34*	*917,71*	*8,34*	*917,71*	*8,34*	*917,71*
8	Охлаждение	5,28	581,17	5,36	589,56	5,36	589,56	5,36	589,56
9	Наружное оборудование	0,00	0,00	1,64	180,00	1,64	180,00	1,64	180,00
	Сумма	354,06	38946,25	256,57	28223,11	256,57	28223,11	219,05	24095,22
	Экономия энергии						14,6%	37,53	4127,89

Согласно [18] удельный расход энергии для одноэтажного отдельностоящего частного дома при градусо-сутках от 2000 до 3000 составляет 99 Вт/м^2 или по формуле 1.2 представленного в [18] составит 172,72 кВт*ч/м^2 за отопительный период. Данный показатель используется в качестве нормативной величины относительно которой определяется класс энергоэффективности здания.

Согласно представленной классификации, здание жилого дома по энергоэффективности относится к классу D (нормальный) с удельным расходом на отопление здания равным 176,28 кВт*ч/м^2. После реализации мероприятий за счёт полученной экономии класс энергоэффективности здания поднимется до C (повышенный) с удельным расходом на отопление здания равным 148,61 кВт*ч/м^2.



А) текущее состояние



Б) После мероприятий

Рис. 10. Оценка класса энергоэффективности здания.

Дополнительно к полученным результатам также выводится кривая «Энергия – Температура» которая может быть использована как инструмент для энергомониторинга будущих данных по энергопотреблению. Кривая «Энергия – Температура» включает отопительный, нормальный и жаркий периоды (рис. 11).

ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

По Факту		
№	Удельная энергия	Темпера-тура
	кВт*час/м^2	^{o}C
1	72,67	-0,40
2	19,96	19,60
3	19,68	24,90
4	70,92	27,10

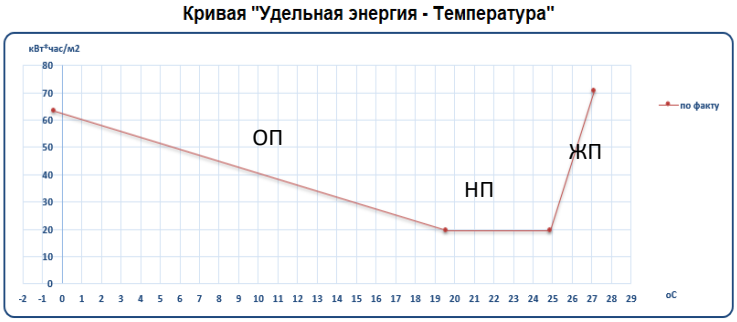


Рис. 11. Кривая “Энергия - Температура” (по факту).

Заключение

При проведении энергоаудита здания наиболее приемлемым представляется применение упрощённой модели «белого ящика», основанной на физических законах и учитывающая квазистационарное состояние в течение длительного периода времени, (например, один месяц).

Как показали результаты моделирования, текущее значение энергопотребления здания составляет 256,57 кВт·ч/м^2 (28223 кВт·ч/год) по всем статьям баланса. Учитывая, что в текущем состоянии все необходимые санитарные требования поддерживаются, базовая линия соответствует текущему состоянию. После реализации мероприятий по повышению энергоэффективности в системах отопления и горячего водоснабжения имеется возможность сокращения энергопотребления до 219,05 кВт·ч/м^2 (24 095 кВт·ч/год) или 14,6 % относительно текущего уровня.

Согласно представленной классификации, здание жилого дома по энергоэффективности относится к классу D (нормальный) с удельным расходом на отопление здания равным 176,28 кВт·ч/м^2. После реализации мероприятий за счёт полученной экономии класс энергоэффективности здания поднимется до C (повышенный) с удельным расходом на отопление здания равным 148,61 кВт·ч/м^2.

Результаты моделирования с помощью программы «ЭНЕРГОАУДИТ ЗДАНИЙ» могут использоваться как исходные данные для энергетической сертификации и энергоаудита зданий, а также оценки соответствия зданий строительным нормам.

Литература

[1] Yu J., Chang W.-S., Dong Y. Building Energy Prediction Models and Related Uncertainties: A Review // Buildings. – 2022. – Vol. 12, No. 8. – Article 1284. – DOI: 10.3390/buildings12081284
[2] Lam K. P., Zhao J., Ydstie E., Wirick J., Qi M., Park J. An EnergyPlus Whole Building Energy Model Calibration Method for Office Buildings Using Occupant Behavior Data Mining and Empirical Data // Proceedings of ASHRAE/IBPSA-USA Building Simulation Conference. – 2014. – P. 160–167.
[3] Hou D., Zhan D., Wang L., Hassan I. G., Sezer N. Development and performance assessment of a new open-source Bayesian inference R platform for building energy model calibration // Discover Mechanical Engineering. – 2023. – Vol. 2. – Article 19. – DOI: 10.1007/s44245-023-00027-2.
[4] EnergyPlus™ — программа для моделирования энергопотребления всего здания. https://energyplus.net/.
[5] Графическая программная среда, для моделирования зданий (включая энергетическое моделирование по стандарту LEED). https://www.trnsys.com/.
[6] Пакеты для оценки энергопотребления DesignBuilder. https://designbuilder.co.uk/.
[7] Building Energy ST Formerly hosted by US Dept. of Energy. https://www.buildingenergysoftwaretools.com/.

ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

[8] IDA ICE (Indoor Climate and Energy) инструмент для моделирования зданий и его систем. https://www.equa.se/en/ida-ice/case-studies.

[9] Amasyali K., El-Gohary N. M. A review of data-driven building energy consumption prediction studies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 81. – P. 1192–1205. – DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.095.

[10] Yesilyurt H., Dokuz Y., Dokuz A. S. Data-driven energy consumption prediction of a university office building using machine learning algorithms // Energy. – 2024. – Vol. 310. – Article 133242. – DOI: 10.1016/j.energy.2024.133242.

[11] Wang S., Xu X. Simplified building model for transient thermal performance estimation using GA-based parameter identification // International Journal of Thermal Sciences. – 2006. – Vol. 45, No. 4. – P. 419–432. – DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2005.06.009.

[12] Von Krannichfeldt L., Orehounig K., Fink O. Combining physics-based and data-driven modeling for building energy systems // Applied Energy. – 2025. – Vol. 391. – Article 125853. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2025.125853.

[13] Michalakopoulos V., Pelekis S., Kormpakis G., Karakolis V., Mouzakitis S., Askounis D. Data-driven building energy efficiency prediction using physics-informed neural networks // 2024 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech). – 2024. – P. 84–91. – DOI: 10.1109/SusTech60925.2024.10553513.

[14] Somu N., Gauthama Raman M. R., Ramamritham K. A deep learning framework for building energy consumption forecast // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 137. – Article 110591. – DOI: 10.1016/j.rser.2020.110591.

[15] Li, Y.; O'Neill, Z.; Zhang, L.; Chen, J.; Im, P.; DeGraw, J. Grey-box modeling and application for building energy simulations—A critical review.Renew.Sustain.Energy Rev. 2021, 146, 111174.

[16] Lecocq E. M., Pascual J., Salom J. Development of physically coherent grey-box models for residential buildings using a simplified adjustment method // Energy and Buildings. – 2025. – Vol. 328. – Article 115215. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.115215.

[17] КМК 2.01.04-18 «Строительная теплотехника», Минстрой РУз, Ташкент, 2018 г., https://lex.uz/docs/6874131.

[18] КМК 2.01.18-24 «Нормативы расхода энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование зданий и сооружений», Минстрой РУз, Ташкент, 2024 г., https://lex.uz/ru/docs/7340715.

[19] КМК 2.01.01 – 22 «Климатические и физико-геологические данные для проектирования», Минстрой РУз, Ташкент, 2022 г., https://lex.uz/docs/6363141.