

УДК 697.133

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ОСТЕКЛЕНИЯ ЖИЛОГО ЗДАНИЯ ИЗ CLT-ПАНЕЛЕЙ

Д.И. Арзиманов, З.А. Гаевская

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. Современная экологическая парадигма диктует необходимость снижать затраты энергии на отопление и вентиляцию жилого здания. Остекление фасадов жилого здания напрямую связано с показателями расхода тепловой энергии, поэтому его оптимизация является актуальной проблемой проектирования. Для решения такой задачи используется параметрический редактор Grasshopper. В статье исследуются параметрические зависимости между площадью остекления фасадов жилого здания из CLT-панелей и параметрами энергоэффективности. Использованы возможности программы Grasshopper и генетического алгоритма Galapagos для параметрической оптимизации площадей остекления. Проведенная в 2 этапа оптимизация привела к сокращению площадей остекления в 2 раза, благодаря чему было достигнуто снижение расхода энергии на отопление и вентиляции за отопительный период на 10%. Методика и результаты оптимизации, изложенные в статье, будут полезны проектировщикам для принятия решений в части выбора объемно-планировочных решений на начальной стадии проектирования многоэтажного многоквартирного жилого дома.

Ключевые слова: оптимизация, энергоэффективность, Grasshopper, Galapagos, генетический алгоритм, CLT, жилое здание, площадь остекления, параметризация, расход энергии.

Ссылка для цитирования: Арзиманов Д.И., Гаевская З.А. Параметрическая энергоэффективная оптимизация остекления жилого здания из CLT-панелей // Инженерные исследования. 2023. №3 (13). С. 12-18. EDN: LSGRZO.

PARAMETRIC ENERGY EFFICIENT CLT RESIDENTIAL BUILDING'S GLAZING OPTIMIZATION

D.I. Arzimanov, Z.A. Gaevskaia

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. The modern ecological paradigm dictates the need to reduce energy costs for heating and ventilation of residential buildings. Glazing of facades of residential buildings is directly related to the indicators of heat energy consumption, so its optimization is an urgent design problem. To solve such a problem, the parametric editor Grasshopper is used. The paper investigates parametric dependencies between the area of glazing of residential building facades made of CLT-panels and energy efficiency parameters. Grasshopper and Galapagos genetic algorithm were used for parametric optimization of glazing areas. The optimization carried out in 2 stages resulted in the reduction of glazing areas, thanks to which a 10% reduction of energy consumption for heating and ventilation during the heating period was achieved. The methodology and optimization results presented in the article will be useful for designers to make decisions regarding the choice of volume-planning solutions at the initial stage of design of a multi-storey apartment building.

Keywords: optimization, energy efficiency, Grasshopper, Galapagos, genetic algorithm, CLT, residential building, glazing area, parameterization, energy consumption.

For citation: Arzimanov D.I., Gaevskaia Z.A. Parametric energy efficient CLT residential building's glazing optimization // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.3 (13). Pp. 12-18. EDN: LSGRZO.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергоэффективности архитектурно-строительных решений сегодня является актуальной проблемой [1]. Появление новых строительных материалов, таких как CLT (ДПК, древесина перекрестно-клееная, от англ. Cross Laminated Timber) может поспособствовать ее решению [2]. В [3] был проведен сравнительный анализ энергозатрат различных деревянных ограждающих конструкций, и сделан вывод о снижении на 20% потребности в отоплении здания из CLT-панелей. Однако на стены и перекрытия приходится треть всех теплопотерь здания.

Согласно исследованию [4], доля теплопотерь для окон составляет от 24 до 35%. Это означает, что при проведении соответствующих мероприятий можно сократить на треть все потери тепла здания. Таким образом, оптимизация параметров остекления является актуальной строительной задачей.

Однако, ручной метод подбора нужных параметров с целью уменьшения расхода энергии может оказаться затруднительным, в связи с необходимостью постоянно пересчитывать показатели. Поэтому хорошим решением будет использование средств визуального программирования для параметризации [5].

Наиболее популярным параметрическим редактором сегодня является Grasshopper. Он позволяет создавать визуальные блок-схемы (ноды), соединяемые между собой для создания зависимостей (рис. 1) [6].

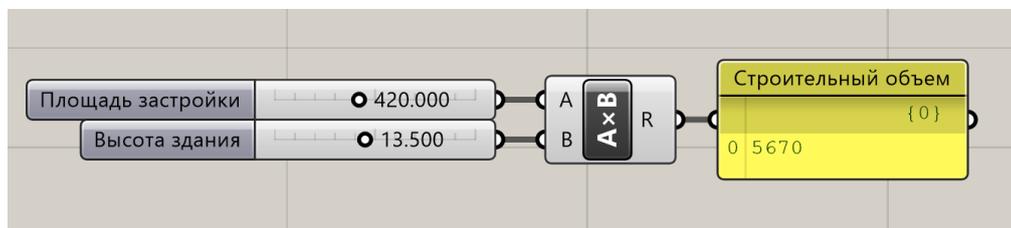


Рис. 1. Использование нодов для параметризации строительного объема здания. Автор: Д.И. Арзиманов
Fig. 1. Using nodes to parameterize the construction volume of a building. Author: D.I. Arzimanov

Как правило, строительные задачи не ограничиваются двумя-тремя параметрами, а содержат большое количество со-зависимых переменных, сплетенных в сложную структуру-сеть из нодов. Для решения таких проблем метод ручного перебора параметров уже не является эффективным и задействуется генетический алгоритм оптимизации [7], основанный на принципе эволюции. Существующие гены – параметры конструкции скрещиваются, комбинируются и варьируются, создавая популяции – наборы генов. Затем процесс повторяется до тех пор, пока не будет получен такой набор параметров, который будет наиболее приспособленный к условиям задачи [8]. К примеру, в [9] так была оптимизирована арка и подобрано сечение двутавровой балки.

В среде Grasshopper генетический алгоритм представлен нодом Galapagos. Нод имеет всего 2 входа: fitness (приспособленность) и genome (набор генов) (рис. 2).

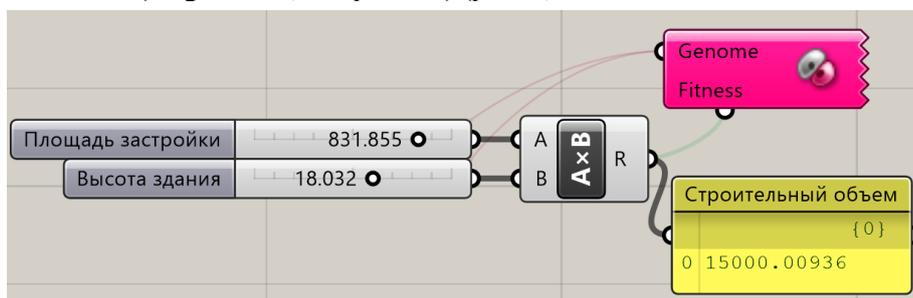


Рис. 2. Использование Galapagos для оптимизации параметров строительного объема. Автор: Д.И. Арзиманов
Fig. 2. Using Galapagos to optimize the parameters of the building volume. Author: D.I. Arzimanov

Цель исследования – оптимизация пофасадных площадей остекления жилого здания из CLT-панелей для минимизации расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания за отопительный период с помощью параметрического энергомоделирования в Grasshopper.

Задачи исследования:

1. Определение переменных и констант объемно-планировочных решений по нормативным документам;
2. Проведение первоначального расчета показателя расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания за отопительный период;

3. Изучение возможностей Grasshopper для параметризации;
4. Интерпретация переменных в среде визуального программирования Grasshopper;
5. Проведение оптимизации параметров остекления с помощью генетического алгоритма Galapagos;
6. Анализ и сравнение результатов оптимизации с первоначальным расчетом.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ И КОНСТАНТ

Все переменные, используемые в статье взяты из формул, указанных в Приложении Г СП50.13330.2012¹. Климатические параметры взяты для г. Санкт-Петербург. Значение градусо-суток отопительного периода (ГСОП), °С·сут/год, посчитано по формуле:

$$ГСОП = (t_e - t_{om}) z_{om} = (20 - (-1,2)) 211 = 4473,2, \quad (1)$$

где t_{om} , z_{om} - средняя температура наружного воздуха, °С, и продолжительность, сут/год, отопительного периода, принимаемые по СП 131.13330² для жилых и общественных зданий для периода со среднесуточной температурой наружного воздуха не более 8°С;

t_e - расчетная температура внутреннего воздуха здания, °С, принимаемая при расчете ограждающих конструкций групп зданий указанных в таблице 3 ГОСТ 30494³.

Значения термического сопротивления теплопередачи R ограждающих конструкций из CLT- панелей посчитаны в работе [10].

В рамках исследования рассматривается жилое многоквартирное многоэтажное здание со следующими архитектурно-строительными параметрами (табл. 1).

Таблица 1. Архитектурно-строительные параметры здания
Table 1. Architectural and construction parameters of the building

Наименование параметра	Значение параметра	Ед. изм.
Отапливаемый объем здания	6340.66	м ³
Площадь крыши	301.023	м ²
Площадь наружных стен	1332	м ²
Суммарная площадь окон	417	м ²
Площадь наружных дверей	3.9	м ²
Площадь жилых помещений	1723	м ²
Высота здания	24.8	м

Суммарная площадь окон рассматривается как переменная величина и для первичных расчетов была принята равной 417 м².

Следующие показатели посчитаны в соответствии с методикой, изложенной в СП50.13330.2012, Приложение Г:

Удельная теплозащитная характеристика здания определена по формуле:

$$k_{o\delta} = \frac{1}{V_{om}} \sum_i \left(n_{t,i} \frac{A_{\phi,i}}{R_{o,j}^{np}} \right) = \frac{1}{6340.66} \left(1 \frac{301.023}{3.14} + 1 \frac{1332}{3.14} + 1 \frac{417}{0.56} + 1 \frac{3.9}{0.83} + 0.85 \frac{301.023}{3.14} \right) = 0.213, \quad (2)$$

где $R_{o,j}^{np}$ - приведенное сопротивление теплопередаче i-го фрагмента теплозащитной оболочки здания, (м²·°С)/Вт;

$A_{\phi,i}$ - площадь соответствующего фрагмента теплозащитной оболочки здания, м²;

V_{om} - отапливаемый объем здания, м³;

$n_{t,i}$ - коэффициент, учитывающий отличие внутренней или наружной температуры у конструкции от принятых в расчете ГСОП.

Удельная вентиляционная характеристика здания посчитана по формуле:

¹ СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 (с Изменениями N 1,2)

² СП 131.13330.2020 СНиП 23-01-99* Строительная климатология

³ ГОСТ 30494-2011 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях

$$k_{\text{вент}} = 0.28c \left(L_{\text{вент}} \rho_{\text{в}}^{\text{вент}} n_{\text{вент}} (1-k) + G_{\text{инф}} n_{\text{инф}} \right) / (168V_{\text{от}}) = 0.28 \cdot 1(13784 \cdot 1.29 \cdot 168 \cdot (1-0.6) + 210 \cdot 168) / (168 \cdot 6340.66) = 0.444 \quad (3)$$

Удельная характеристика внутренних теплопоступлений здания определена по формуле:

$$k_{\text{быт}} = \frac{q_{\text{быт}} A_{\text{ж}}}{V_{\text{от}} (t_{\text{в}} - t_{\text{от}})} = \frac{17 \cdot 1723}{6340.66 \cdot (20 - (-1.2))} = 0.218 \quad (4)$$

Коэффициент полезного использования посчитан по формуле:

$$\beta_{\text{КПИ}} = K_{\text{рез}} / (1 + 0.5n_{\text{в}}) = 0.7 / (1 + 0.5 \cdot 2.855) = 0.288 \quad (5)$$

Основной переменной величиной в задаче является удельная характеристика теплопоступлений в здание от солнечной радиации $k_{\text{рад}}$, Вт/(м³·°C), определяемая по формуле:

$$k_{\text{рад}} = \frac{11.6Q_{\text{рад}}^{\text{год}}}{(V_{\text{от}} \text{ГСОП})}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{рад}}^{\text{год}}$ - теплопоступления через окна и фонари от солнечной радиации в течение отопительного периода, МДж/год;

$V_{\text{от}}$ - отапливаемый объем здания, м³;

ГСОП – градусо-сутки отопительного периода;

Согласно п.10.3 СП345.1325800.2017, $Q_{\text{рад}}^{\text{год}}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$Q_{\text{рад}}^{\text{год}} = \tau_{1\text{ок}} \tau_{2\text{ок}} (A_{\text{ок1}} I_1 + A_{\text{ок2}} I_2 + A_{\text{ок3}} I_3 + A_{\text{ок4}} I_4) + \tau_{1\text{фон}} \tau_{2\text{фон}} A_{\text{фон}} I_{\text{гор}}, \quad (7)$$

где $\tau_{1\text{ок}}$, $\tau_{1\text{фон}}$ – коэффициенты относительного проникания солнечной радиации;

$\tau_{2\text{ок}}$, $\tau_{2\text{фон}}$ - коэффициенты, учитывающие затенение светового проема;

$A_{\text{ок1}}$, $A_{\text{ок2}}$, $A_{\text{ок3}}$, $A_{\text{ок4}}$ – площадь световых проемов фасадов здания, м²;

$A_{\text{фон}}$ – площадь световых проемов зенитных фонарей здания, м²;

I_1 , I_2 , I_3 , I_4 - средняя за отопительный период величина солнечной радиации на вертикальную поверхность;

$I_{\text{гор}}$ (Q_i^{hor}) – средняя за отопительный период величина солнечной радиации на горизонтальную поверхность

Переменными являются площади окон. Фонари в проекте не предусмотрены. В качестве окон выбран двухкамерный стеклопакет из обычного стекла с межстекольным расстоянием 12 мм.

Далее определяются расчетные характеристики для солнечной радиации на вертикальную поверхность (табл. 2).

Таблица 2. Расчетные характеристики солнечной радиации для определения количества суммарной солнечной радиации на вертикальную поверхность

Table 2. Calculated solar radiation characteristics for determining the amount of total solar radiation to a vertical surface

Месяцы отопитель- ного периода	S_i^{hor} МДж м ²	k_{ij}				D_i^{hor} МДж м ²	Q_i^{hor} МДж м ²	A_i^{cal} %	I_j , МДж/м ² ,			
		С	Ю	З	В				С	Ю	З	В
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
январь	3		7.20	1.19	0.76	20	24	62	17.44	39.04	21.01	19.72
февраль	32		3.50	1.18	0.87	52	73	62	48.63	160.63	86.39	76.47
март	98		1.85	0.66	0.66	117	215	41	102.58	283.88	167.26	167.26
апрель	176	0.02	1.03	0.56	0.64	168	344	17	116.76	294.52	211.80	225.88
октябрь	33		2.60	0.74	0.72	61	94	21	40.37	126.17	64.79	64.13
ноябрь	6		5.50	0.86	0.86	21	27	39	15.77	48.77	20.93	20.93
декабрь	2					12	14	56	9.92	9.92	9.92	9.92
Итого за отопительный период $I_j =$									351.46	962.92	582.09	584.30

В рамках исследования допустим, что минимальная площадь остекления фасада равна 50 м². Максимальная – 150 м². Таким образом, получаем систему выражений:

$$\begin{cases} Q_{рад}^{zод} = 0.76 \cdot 0.78 (A_{ок1} \cdot 351.46 + A_{ок2} \cdot 962.92 + A_{ок3} \cdot 582.09 + A_{ок4} \cdot 584.30); \\ 50 \leq A_{ок1} \leq 150; \\ 50 \leq A_{ок2} \leq 150; \\ 50 \leq A_{ок3} \leq 150; \\ 50 \leq A_{ок4} \leq 150 \end{cases} \quad (8)$$

Однако, суммарная площадь остекления нужна при расчете удельной теплозащитной характеристики здания. Кроме того, она напрямую связана с площадью окон лестничной клетки, учитываемую при расчете удельной вентиляционной характеристики здания. Таким образом, необходимо параметризовать выражения.

GRASSHOPPER ДЛЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ

Посчитанные выше показатели интерпретированы в пространстве программы как константы – вещественные числовые ноды. Переменные заданы в виде слайдеров вещественных чисел. Для каждого фасада предусмотрена группа, включающая переменную площадь окон и фиксированные значения суммарной радиации на вертикальную поверхность (рис. 3).

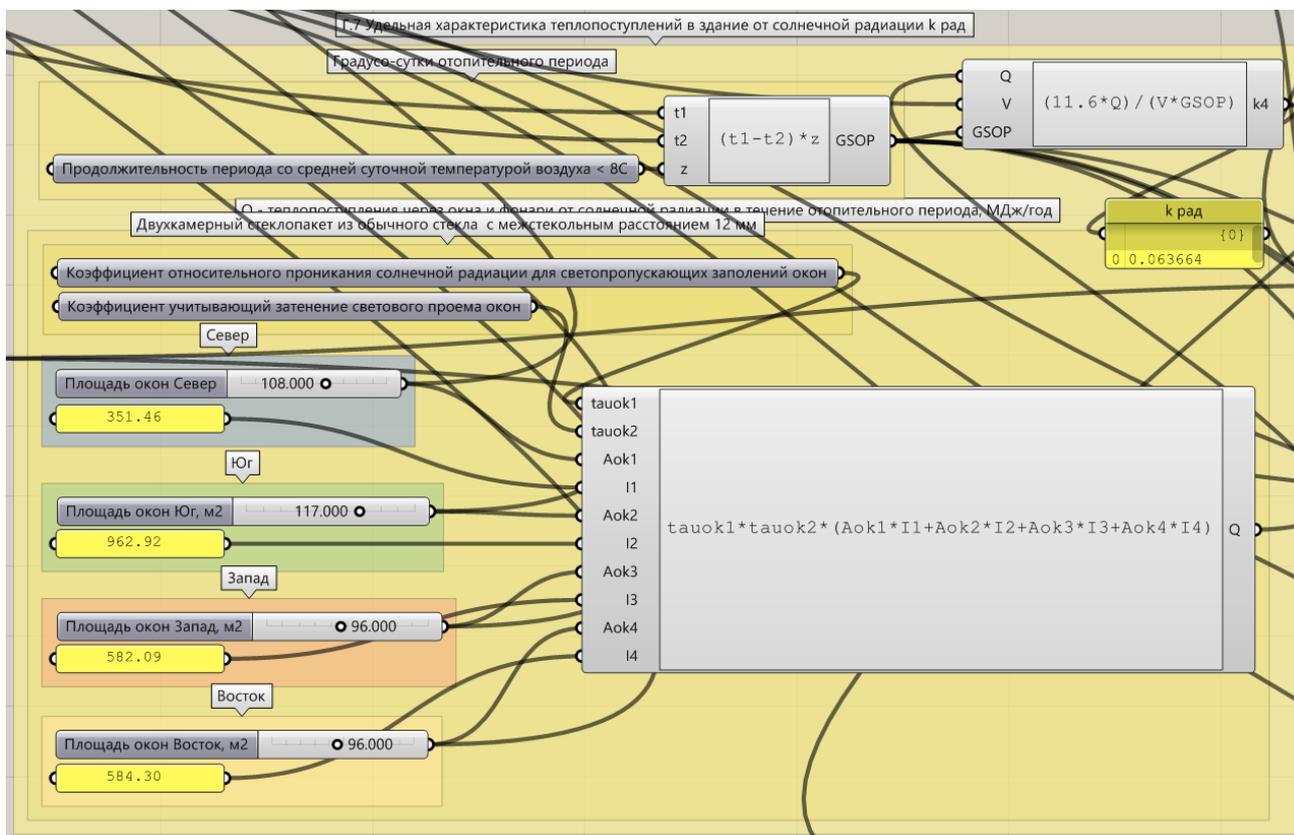


Рис. 3. Параметризованный показатель удельной характеристики теплопоступлений в здание от солнечной радиации. Автор: Д.И. Арзиманов

Fig 3. Parameterized index of specific characteristic of heat inputs into a building from solar radiation. Author: D.I. Arzimanov

Для первой итерации площади окон были приняты соответственно 108 м² для севера, 117 м² для юга, 96 м² для запада и 96 м² для востока. Таким образом $Q_{рад}^{zод} = 155664.98$;

Все ноды завязаны на промежуточную формулу – расчетную удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляции. Для текущих параметров она равна:

$$q_{от}^p = k_{об} + k_{вент} - \beta_{КПП} (k_{быт} + k_{рад}) = 0.213 + 0.444 - 0.305 \cdot (0.218 + 0.063) = 0.57, Bm / (m^3 \cdot ^\circ C) \quad (9)$$

Конечным выражением является расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания за отопительный период, определенный по формуле:

$$Q_{om}^{zod} = 0.024 GCOPIV_{om} q_{om}^p = 0.024 \cdot 4473.2 \cdot 6340.66 \cdot 0.57 = 388811.7, \text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{год} \quad (10)$$

ОПТИМИЗАЦИЯ В GALAPAGOS

Геномы Galapagos – это 4 слайдера, управляющие площадями остекления каждого фасада. Функция приспособленности будет стремиться достичь локального минимума значения Q_{om}^{zod} из поколения в поколение приближаясь к цели.

Первое приближение рассчитано на 30 генераций. Расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию составил 358560.8 кВт·ч/год. Площади окон соответственно 52.19 м² для севера, 50 м² для юга, 52.045 м² для запада и 89.39 м² для востока (рис.4).

Второе приближение также рассчитано на 30 поколений. Расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию составил 351181.3кВт·ч/год. Площади окон соответственно 57.92 м² для севера, 51.91 м² для юга, 50 м² для запада и 51.77 м² для востока (рис. 5).

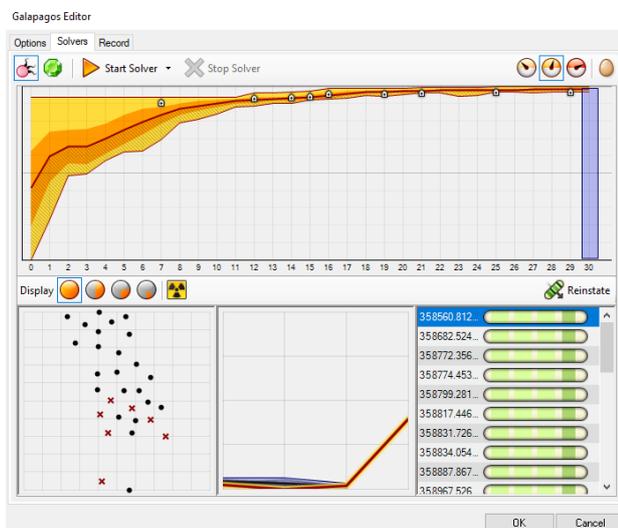


Рис. 4. Результаты первого приближения.

Автор: Д.И. Арзиманов

Fig. 4. First approach result. Author: D.I. Arzimanov

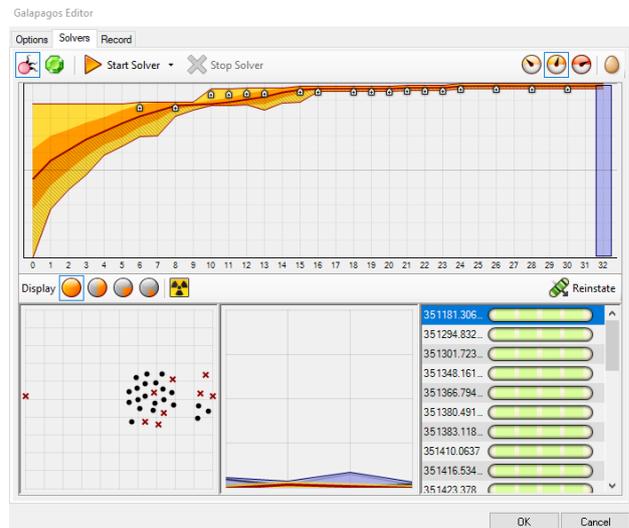


Рис. 5. Результаты второго приближения.

Автор: Д.И. Арзиманов

Fig. 5. Second approach result. Author: D.I. Arzimanov

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения исследования были решены следующие задачи:

1. Согласно изученным нормативным документам, было установлено, что, при расчете расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, константами могут являться следующие объемно-планировочные величины: отапливаемый объем здания, площадь крыши, площадь наружных стен, суммарная площадь окон, площадь наружных дверей, площадь жилых помещений и высота здания. Переменными в задаче являются пофасадные площади остекления.

2. По методикам, изложенным в нормативных документах, был выполнен расчет удельных характеристик теплопоступлений $k_{быт}$, $k_{рад}$, удельной теплозащитной характеристики $k_{об}$, удельной вентиляционной характеристик $k_{вент}$, коэффициента полезного использования теплопоступлений $\beta_{кпи}$. При площадях окон 108 м² для севера, 117 м² для юга, 96 м² для запада и 96 м² для востока расход энергии составил 388811.7 кВт·ч/год.

3. Исследованы возможности Grasshopper для параметризации расхода энергии на отопление и вентиляцию. Программа позволяет задавать переменные в виде слайдеров-ползунков, а также константы с помощью узлов вещественных чисел. Есть возможность прописывать математические формулы и создавать зависимости, соединяя узлы между собой.

4. Проведена параметризация математических зависимостей и выражений, данных из нормативной документации с помощью Grasshopper. Построенная цепочка узлов позволяет моментально отслеживать изменения в удельных характеристиках энергии и показателях расхода энергии на отопление и вентиляцию здания.

5. С помощью встроенного генетического алгоритма Galapagos проведена оптимизация расхода энергии. Оптимизация проводилась в 2 этапа. Первая итерация заняла 30 поколений и сократила расход энергии на 30250.9 кВт·ч/год. Вторая итерация также заняла 30 поколений и сократила расход энергии еще на 7379.5 кВт·ч/год.

6. Проведен сравнительный анализ результатов оптимизации с первоначальным расчетом. Разница в расходе энергии составила 37630.4 кВт·ч/год. При этом площади окон сократились на 50.08 м² для северного фасада, на 65.09 м² для южного, на 46 м² для западного, на 44.23 м² для восточного. Полученные значения приближенные к минимальным свидетельствуют об обратной зависимости между площадью окон и расходом энергии. Сокращение площадей остекления фасадов в 2 раза привело к сокращению расхода энергии на отопление и вентиляцию за отопительный период на 10%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верижников Е.Ю. Современные методы повышения энергоэффективности зданий в строительстве // Научный журнал молодых ученых. 2023. №3(33). С.21-25. EDN: EGJNUE
2. Bruno R., Bevilacqua P., Cuconati T., Arcuri N. Energy evaluations of an innovative multi-storey wooden near Zero Energy Building designed for Mediterranean areas // Applied Energy. 2019. No.238. Pp. 929-941. DOI:10.1016/j.apenergy.2018.12.035
3. Dadoo A., Gustavson L., Sathre R. Lifecycle carbon implications of conventional and low-energy multi-storey timber building systems // Energy and Buildings. 2014. No.82. Pp. 194-210. DOI:10.1016/j.enbuild.2014.06.034
4. Кормашов А.И., Кормашова Е.П. К вопросу повышения энергоэффективности // Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы. 2023. №1. С.244-245. EDN: JDKXMV
5. Георгиев Н.Г., Шумилов К.А. Применение визуального программирования при моделировании строительных конструкций // Инновации. Наука. Образование. 2021. №34. С.1418-1422. EDN: AAXTTM
6. Голикова Я.А., Киселев С.В., Талипова Л.В. Применение генеративного дизайна при расчете параметров солнечного воздействия // Вестник гражданских инженеров. 2023. №3(98). С.77-87. EDN: YINIUA
7. Østergård T., Jensen R., Maagaard S. Building simulations supporting decision making in early design – A review // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2016. No.61. Pp.187-201. DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.045
8. Yunsong H., Hong Y., Cheng S. Simulation-Based Multiobjective Optimization of Timber-Glass Residential Buildings in Severe Cold Regions // Sustainability. 2017. No.9(12). Pp. 1-18. DOI:10.3390/su9122353
9. Ходяков В.А., Пастушков В.Г. Применение теории эволюции Дарвина в процессе оптимизации конструкций // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2014. №1. С.534-538. EDN: SJJQVB
10. Арзиманов Д.И., Гаевская З.А. Сравнительный анализ энергоэффективности CLT-панелей для жилой многоэтажной застройки Санкт-Петербурга // Инженерные исследования. 2023. №2(12). С.11-18. EDN: HGAQIZ

ОБ АВТОРАХ

Давид Ифтихарович Арзиманов – студент магистратуры. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: arzimanov.david@mail.ru

Злата Анатольевна Гаевская – доцент, к. арх. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: gaezlata@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

David I. Arzimanov – the Master degree student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: arzimanov.david@mail.ru

Zlata A. Gaevskaya – Associate Professor, architecture PhD. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: gaezlata@yandex.ru