

МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ОЦІНКИ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСУ АРХІТЕКТУРНИХ ОБ'ЄКТІВ

Київський національний університет будівництва і архітектури

Анотація. Виконано комплексний аналіз програмних засобів розрахунку теплового балансу будівель та раціональних способів графічного моделювання. На основі розгляду наявних методик та програмних засобів проектування енергоефективних будівель, розрахунку показників їх енергоефективності, визначено функціональні можливості даних інструментів та відзначено їх обмеженість у певних можливостях.

Виконано критичний огляд таких методик та програмних засобів:

1. «Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції». Дозволяє виконати розрахунок загальних тепловтрат будинку через огорожувальну оболонку; розрахунок теплонадходжень протягом опалювального періоду; розрахунок значення питомих тепловитрат на опалення будинку за опалювальний період; присвоєння будівлі класу енергетичної ефективності від А до G.

2. РНРР - розрахунок потреб енергії на опалення та максимальне опалювальне навантаження; розрахунок потреба енергії на охолодження; розрахунок пасивного охолодження, частоту перегріву при ньому; розрахунок попиту на відновлювану первинну енергію та попиту на первинну енергію всіх енергетичних послуг вцілому по будівлі; оцінка річного приросту відновлюваної енергії.

3. *ArchiPHYSIK* - розрахунок потреб енергії на опалення та охолодження; розрахунок екологічного індексу ОІЗ; розрахунок звукоізоляційних даних.

4. *Hottgenroth* - моделювання теплової поведінки будівель, зон; визначення теплового навантаження приміщень; розрахунок нагрівальних елементів; проектування систем питної води; планування та проектування систем вентиляції будинку; енергетична реконструкція будівель; розрахунок навантаження на охолодження; моделювання систем гарячого водопостачання та сонячного опалення; проектування фотоелектричних систем; планування літньої теплоізоляції; проектування когенераційних установок, систем теплового насоса; можливість продивлятися 3D-зображення на будь-якому етапі моделювання; детальна підготовка документів для затвердження.

5. *Optima* - розрахунок втрат тепла для кожної зони; розрахунок потреб енергії на опалення та охолодження впродовж року; прогнозування температурних показників у кожній зоні впродовж року.

6. «Розрахунок тепловтрат приміщень і теплових навантажень на систему опалення житлових та громадських будівель» - розрахунок трансмісійних тепловтрат окремих приміщень та будівлі вцілому; розрахунок енергетичних потреб на нагрівання зовнішнього повітря, що надходить через систему вентиляції; розрахунок необхідних теплових навантажень на систему опалення.

7. «Програма з експрес-оцінки ефективності енергозберігаючих рішень» - оцінка внеску конкретного енергозберігаючого рішення у зниження теплоспоживання конкретного будинку в порівнянні з базовим за рахунок застосування енергозберігаючого обладнання та технологій.

З проаналізованих методів оцінки теплового балансу будівлі можливість моделювання внутрішньої геометрії об'єкту навіть при наявності графічного супроводу майже в усіх методах відсутня або дуже

обмежена. Лише програми Hottgenroth (зокрема, софт ETU-Planer) та GRAPHISOFT EcoDesigner STAR мають таку можливість. У програмі Hottgenroth внутрішня геометрія враховується при розрахунках, проте не вирішується обернена задача проектування, графічні можливості обмежені. У GRAPHISOFT EcoDesigner STAR внутрішня геометрія враховується при розрахунках, проте не можливо задати різні температурні показники для різних приміщень як вихідні дані, також не вирішується обернена задача проектування та графічні можливості обмежені.

Ключові слова: енергоефективність; проектування енергоефективних будівель; тепловий баланс; оцінка теплового балансу.

Постановка проблеми. При проектуванні енергоефективного об'єкту для оцінки якості прийнятого проектного рішення вкрай важливим є дослідження балансу енергонадходжень та енерговтрат. Таке дослідження у зворотньому порядку може вплинути на об'ємно-планувальне та конструктивне рішення. Важливо також мати можливість точно оцінювати величини енерговитрат, що відбуватимуться в огорожувальних конструкція та інженерних системах майбутнього будинку, з метою їх мінімізації ще на етапі виконання проектних робіт. Для вирішення цієї задачі необхідно мати гнучкий та наочний апарат моделювання процесів теплообміну та відповідну математичну інструментальну базу. Це дозволить враховувати вплив режимів роботи усіх інженерних систем протягом року, та даватиме змогу легко змінювати початкові та крайові умови розрахунків: конфігурації зовнішніх і внутрішніх стін, перекриттів та покриттів, кількість та місця розміщення світлопрозорих конструкцій, а також можливі дефекти та нещільності в огороженнях, в результаті яких виникатимуть інфільтраційні процеси, що

впливатимуть на кратність повітрообміну приміщень та тепловтрати будівлі у цілому [1].

Аналіз останніх досліджень. На даний час у різних країнах постійно ведуться розробки засобів розрахунку теплового балансу архітектурних об'єктів, багато програм та розрахункових методик вже активно використовуються.

Основна частина.

В Україні у 2007 році затверджено «**Настанову з розроблення та складання енергетичного паспорту будинків при новому будівництві та реконструкції**». Даний стандарт встановлює метод проведення енергетичної оцінки та енергетичної сертифікації будівель. У даному розрахунку архітектурний об'єкт розглядається як єдина тепла оболонка. Розраховуються загальні тепловтрати будинку через огороження, теплонадходження протягом опалювального періоду (побутові та теплові надходження через вікна від сонячної радіації), розраховується значення питомих тепловитрат на опалення будинку за опалювальний період. В результаті будівлі присвоюється клас енергетичної ефективності (від А до G) [2].

Згідно даній настанові, розрахункові витрати теплової енергії на опалення будинку протягом опалювального періоду $Q_{\text{рік}}$, кВт·год, визначаються за формулою:

$$Q_{\text{рік}} = [Q_k - (Q_{\text{вн п}} + Q_s) \cdot \nu \cdot \zeta] \cdot \beta_h, \quad (1)$$

де Q_k – загальні тепловтрати будинку через огорожувальну оболонку, кВт·год; $Q_{\text{вн п}}$ – побутові теплонадходження протягом опалювального періоду, кВт·год; Q_s – теплові надходження через вікна від сонячної радіації протягом опалювального періоду, кВт·год; ν – коефіцієнт, що враховує здатність огорожувальних конструкцій будинків акумулювати або віддавати тепло під час періодичного теплового режиму; ζ – коефіцієнт авторегулювання подачі тепла в системах опалення; β_h –

коефіцієнт, що враховує додаткове теплоспоживання системи опалення, пов'язане з дискретністю номінального теплового потоку номенклатурного ряду опалювальних приладів додатковими тепловтратами через радіаторні ділянки огорожень, тепловтратами трубопроводів, що проходять через неопалювані приміщення [2].

У даному розрахунку не враховано геометрію внутрішньої структури об'єкту, конвективний вид теплообміну, що відбувається за рахунок переносу теплової енергії потоками повітря, що переміщуються із одних ділянок приміщень до інших. Розраховуються витрати теплової енергії загалом на будинок, не враховуючи процеси теплообміну всередині будинку.

PHPP (пакет проектування пасивного будинку) використовується при розробці пасивних будинків і служить для підтвердження стандарту пасивного будинку. Розроблений у 1998 році, постійно вдосконалюється, із кожною новою версією до програми додаються нові фактори впливу на енергетичний баланс будинку. Додаються нові методи розрахунку. PHPP включає в себе розрахунок енергобалансів, проектування комфортної системи вентиляції, розрахунок опалювального навантаження або навантаження на систему охолодження, а також багато інших інструментів.

При підрахунках максимально враховані всі види факторів, що впливають на енергетичний баланс будинку – кліматологічні дані, фізичні дані об'єкту (площі будівельних елементів, їх орієнтація, коефіцієнти теплопередачі), затінення від сусідніх об'єктів, враховуються всі можливі втрати тепла (трансмісійні, містки холоду, втрати тепла через вентиляцію, тепловтрати через прилеглі до ґрунту конструкції і навіть розраховуються втрати тепла системою опалення та гарячого водопостачання), враховується пасивне надходження тепла (сонячне надходження тепла) та можливість введення даних для пасивного охолодження, враховується

використання відновлювальної енергії, враховуються різні види вентиляції (окрім класичної, наприклад, механічна нічна вентиляція в літній період через вікна). Розрахунки можна проводити як для холодної пори року для розрахунку енергетичних потреб на опалення, так і для теплої пори року для розрахунку потреб на охолодження.

В результаті, РНРР забезпечує розрахунки таких параметрів:

- Потреба енергії на опалення на рік [кВт / год·м²] та максимальне опалювальне навантаження [Вт / м²];
- Потреба енергії на охолодження на рік [кВт / год·м²] та максимальне охолоджувальне навантаження [Вт / м²] (у разі активного охолодження);
- Літній комфорт при пасивному охолодженні: частота перегріву [%];
- Попит на відновлювану первинну енергію на рік та попит на первинну енергію всіх енергетичних послуг в цілому по будівлі [кВт / год·м²];
- Оцінка річного приросту відновлюваної енергії [кВт / год·м²].

Результати для різних варіантів проекту виводяться у графіках у вигляді стовпців і обчислюються паралельно, так що вплив цих змінних параметрів можна легко порівняти. Також, різні етапи реконструкції також можуть бути введені в єдиний файл РНРР. Також, у останній версії програми можливе порівняння економічної доцільності між вибраними варіантами планування.

В якості додатку, Інститутом пасивного будинку розроблено плагін для програми ScetchUp – Design RH, інструмент для введення у РНРР геометрії об'єкту. Даний інструмент дозволяє користувачам моделювати проекти пасивних будинків у 3D форматі, він спрощує процес введення даних у РНРР - геометричні дані вводяться у РНРР автоматично після того, як користувач експортує 3D модель свого проекту з програми ScetchUp

через плагін Design PH (у якому налаштовується регіональний клімат, освітлення об'єкту) у PHPP.

Інструмент PHPP спільно з плагіном Design PH можна вважати ефективним програмним забезпеченням для розрахунку теплового балансу будівлі, проте тут не враховується вплив внутрішніх структурних елементів один на одного в повній мірі, при розрахунках не враховується процеси переміщення мас повітря всередині будівлі, а об'єкт сприймається програмою як єдина оболонка. Немає також можливості задати різні параметри внутрішнього клімату в різних зонах об'єкту.

В Австрії енергетичні розрахунки проводять у програмі **ArchiPHYSIK**. Програма подібна до PHPP, яка після розрахунків виводить енергетичний сертифікат, що затверджений законодавством даної країни. ArchiPHYSIK містить спрощені та детальні розрахунки для одиночних та багатозонних енергетичних сертифікатів. У цій програмі (так само, як і у PHPP) вводяться дані щодо конструктивних рішень та матеріалів об'єкту, а виводяться розраховані дані по даному об'єкту. Так само, як і PHPP, дана програма розглядає об'єкт як єдину теплову оболонку.

Геометричні та географічні дані є невід'ємною частиною будівельних фізичних розрахунків, тому два спеціальних додатка до ArchiPHYSIK забезпечують легку обробку даних CAD. Для перепланування та реконструкції можливий доступ до даних ArchiCAD. Також є можливість для роботи зі SketchUp. Окрім розрахунку теплового балансу в будівлі, дана програма розраховує екологічний індекс OI3 для житлових субсидій в Австрії та видає матеріал для екологічної сертифікації ÖGNI. Також у даній програмі розраховуються та виводяться результати звукоізоляції будівлі.

Простий у використанні та наочний інструмент для енергетичного моделювання будівель – польська програма **Optima**. Програма створена для енергетичного моделювання на ранній стадії етапу проектування

будівель, вона зручна і дозволяє реалізувати енергетичну та економічну оцінки будівлі ще на етапі концепції проектного рішення.

Точність результатів у даній програмі має другорядне значення, а акцент робиться на швидкість, інтуїтивність і простоту у використанні, що досягається за допомогою робочої моделі, яка полягає у заданні конфігурації оболонки будівлі із запропонованих збірних елементів з певними показниками. Програма виконує розрахунок енергетичних показників (розраховує трансмісійні втрати тепла, втрати через вентиляцію, прогнозує витрати енергії на опалення та гаряче водопостачання) та оптимізує рішення, що впливають на енергетичну якість будівлі, що в кінцевому підсумку вказує на оптимальні рішення. Програма також аналізує економічну рентабельність використання відновлювальних джерел енергії та вибрану систему опалення. В ОРТИМА можна оцінити енергетичну, екологічну та економічну ефективність окремих будівельних елементів, що впливають на споживання енергії, а також визначити вартість їх використання та можливе збільшення інвестиційних витрат.

Найбільш інформаційний інструмент енергетичного моделювання будівель з усіх на сьогодні наявних - німецька збірка програм **Hottgenroth**, висновки якої офіційно визнаються урядом Німеччини. Це декілька програм, які співпрацюють одна з одною та кожна відповідає за свою частину розрахунку.

У програмах можна змоделювати у 3D форматі систему опалення, охолодження, вентиляції, водопостачання, протипожежний захист, спроектувати роботу фотоелектричних систем, спроектувати тепловий насос та режим його роботи для об'єкту, графічно змоделювати та розрахувати нагрівальні трубні мережі для опалення, скласти погодинний графік теплового балансу будівлі, скласти сертифікат споживання енергії для будинку та багато іншого.

Інструментом для моделювання теплового балансу будівлі в цій збірці програм є софт ETU-Planer – універсальне рішення, що дозволяє проводити велику кількість розрахунків в одному програмному середовищі. Програма дає можливість продивлятися 3D-зображення на будь-якому етапі моделювання, можливість виділення зон (окремих приміщень) з різними температурними режимами, визначення теплового навантаження приміщень, виконувати розрахунок радіаторів, нагрівальних елементів на підлозі або на стіні, виходячи з навантаження на опалення та багато супутніх розрахунків. Графічне представлення навантажень і результатів виконується у вигляді діаграм.

Як інструмент оцінки теплового балансу будівлі слід розглядати також GRAPHISOFT EcoDesigner STAR – розширення ARCHICAD, що дозволяє використовувати всі переваги BIM проектування в процесі Енергетичного Моделювання Будівель (BEM).

Нюансом програми є те, що температурні показники кожної зони будівлі, що проектується, не можна задати з самого початку, вони є похідними від вибраної системи опалення або охолодження (і підраховуються програмою автоматично), тобто обернену задачу можна вирішувати тільки методом підбору варіантів систем опалення та охолодження. Ще однією особливістю програми є те, що взаємний тепловий вплив зон враховано тільки трансмісійним та інфільтраційним видом теплообміну, а способів врахування променевого та конвективного виду теплообміну не передбачено. Проте програма зручна у використанні за рахунок того, що дозволяє проектувати у програмі GRAPHISOFT ARCHICAD та паралельно переносити дані у EcoDesigner STAR для швидкого складання енергобалансу, змінювати об'ємно-планувальні рішення, якщо результати не задовольняють, порівнювати їх та вибирати найкращий варіант проекту.

Графічно тепловий баланс будівлі надається у вигляді двох стовбчастих графіків один над одним – надходження тепла у кВт у графіку з додатніми стовпчиками та втрати тепла у графіку з від’ємними стовпчиками. Графіки можуть бути створені для кожної зони або для об’єкту вцілому. Також підраховуються пікові навантаження на системи опалення та охолодження.

У РФ некомерційне об’єднання «АВОК» пропонує проектувальникам програми по оцінці тепловтрат та теплонадходжень у будівлю при проектуванні. Це «Розрахунок тепловтрат приміщень і теплових навантажень на систему опалення житлових та громадських будівель» та «Програма з експрес-оцінки ефективності енергозберігаючих рішень».

1. «Розрахунок тепловтрат приміщень і теплових навантажень на систему опалення житлових та громадських будівель». Програма призначена для визначення розрахункових тепловтрат опалювальних приміщень, тепловіддачі опалювальних приладів і розрахунку навантаження на систему опалення при проектуванні нових, при реконструкції, капітальному ремонті та модернізації житлових і громадських будівель [3].

Дана програма дозволяє визначити:

а) розрахункові тепловтрати окремих приміщень та будівлі вцілому; б) трансмісійні тепловтрати приміщень та будівлі вцілому; в) енергетичні потреби на нагрівання зовнішнього повітря, що надходить через систему вентиляції; г) розрахунок необхідних теплових навантажень на систему опалення; д) розрахункові параметри теплоносія, що циркулює в системі опалення, і їх зміни в залежності від температури зовнішнього повітря і з урахуванням запасу поверхні нагрівання опалювальних приладів.

Серед вихідних даних: зовнішня температура повітря, швидкість вітру, параметри огорожуючих конструкцій (коефіцієнт теплопередачі,

коефіцієнт положення, приведений опір повітропроникності), загальні параметри будівлі (висота, розміри). У результатах підрахунків тепловтрати по приміщеннях сумуються у загальні тепловтрати будівлі, проте зовсім не враховується взаємне розташування приміщень відносно один одного, вплив одного приміщення на інше. Недоліком програми є те, що враховується лише трансмісійний вид теплопередачі, і зовсім не враховані конвективна та радіаційна теплопередачі та процес теплообміну за рахунок переміщення потоків повітря.

2. «Програма з експрес-оцінки ефективності енергозберігаючих рішень» дозволяє оцінити внесок конкретного енергозберігаючого рішення в зниження теплоспоживання конкретного будинку в порівнянні з базовим за рахунок застосування енергозберігаючого обладнання, технологій або заходів, таких як:

- регулювання витрат на споживання теплової енергії на ввіді в будинок або квартиру (пристрій ІТП, автоматизований вузол управління і т.д.);

- регулювання тепловіддачі опалювальних приладів (пофасадне регулювання, переривчастий режим опалення, пристрій термостатів);

- зниження трансмісійних тепловтрат через зовнішні світлонепроникні огорожувальні конструкції (зменшення впливу містків холоду, підвищення теплотехнічної однорідності огорожуючих конструкцій);

- зниження трансмісійних та інфільтраційних тепловтрат через зовнішні світлопроникні огорожуючі конструкції (застосування нічних штор);

- регулювання вентиляційного повітрообміну в залежності від потреби (пристрій припливних регульованих пристроїв, центральних і місцевих вентиляційних установок, персональної вентиляції).

- використання утилізаторів теплоти витяжного вентиляційного повітря для нагріву / охолодження припливного повітря (застосування пластинчастих теплообмінників, теплообмінників з обертовою теплообмінною насадкою (роторних рекуператорів), теплообмінників з проміжним теплоносієм (теплообмінники рідина-повітря)).

Спроби створити математичну модель для управління тепловим балансом будівлі, що накладена на геометричну схему об'єкту у вигляді графу можна прослідкувати у роботі [4]. В роботі висвітлюються концептуальні положення побудови графо-аналітичних моделей будівель як об'єкту теплообміну. При цьому робота не містить конкретних практичних вказівок щодо комплексних системних розрахунків теплового балансу будівлі.

Отже, не зважаючи на наявність досить ергономічних інформативних програм розрахунку, не існує жодної, яка б вирішувала обернену задачу проектування: автоматичне генерування варіантів можливих змін у об'ємно-планувальному або конструктивному рішенні на підставі корегування значень у показниках теплового балансу.

Також, практично всі програмні засоби розглядають об'єкт в цілому як єдину теплову оболонку, не враховуючи в повній мірі вплив одного елементу внутрішньої структури на інший. Такий розгляд робить неможливим задання різних мікрокліматичних умов в різних приміщеннях (наприклад, в дитячій кімнаті потрібно задати +25^oC, а в іншому приміщенні – спортзалі чи санвузлі +19^oC) та детально проаналізувати вплив приміщень з різним мікрокліматом на загальний тепловий баланс будинку. Тому для оптимізації процесу проектування важливою є розробка наочної геометричної моделі внутрішньої структури об'єкту (та моделі її взаємодії з зовнішнім середовищем), на яку можна «накласти» математичний розрахунковий апарат, який буде давати можливість

управляти та оптимізувати геометрію об'єкту (об'ємно-планувальне рішення) в залежності від сумарної оцінки енергоефективності моделі.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Розглянувши наявні методики та програмні засоби проектування енергоефективних будівель, визначено функціональні можливості даних інструментів та виявлено їх обмеженість у можливостях вирішення обернених задач проектування, недостатньо гнучкому визначенні вихідних даних, неефективному та функціонально обмеженому використанні засобів графічного моделювання. Перспективною є реалізація гнучкої наочної методики проектування енергоефективних будівель з можливістю варіювання параметрами моделі та результуючими обсягами енергоспоживання й енерговитрат різними компонентами будівлі.

Література

1. Болгарова Н.М. Моделювання процесів теплообміну при проектуванні енергоефективних будинків // Енергоінтеграція-2018: матеріали восьмої Міжнародної науково-практичної конференції, 25–27 квітня 2018 р. Київ: КНУБА, 2018. С. 56.

2. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції: ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007. [Чинний від 01.07.2008]. К.: Мінрегіонбуд України, 2008. 44 с. (Державний стандарт України).

3. Расчет тепловпотерь помещений и тепловых нагрузок на систему отопления жилых и общественных зданий. URL: <https://soft.abok.ru/programms/teplopoteri> Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М. : АВОК-ПРЕСС, 2002. 194 с.

METHODS AND SOFTWARE OF HEAT BALANCE ASSESSMENT OF ARCHITECTURAL OBJECTS

Natalia Bolharova

Summary. The complex analysis of the software for calculating the thermal balance of buildings and rational methods of graphical modeling have been performed. On the basis of consideration of available methods and software tools for designing energy efficient buildings, calculation of their energy efficiency indicators, the functional capabilities of these tools were determined and their limitations in certain possibilities were noted.

A critical review of the following techniques and software has been completed:

1. "Instruction for the development and drawing up of an energy passport of houses for new construction and reconstruction". Allows to calculate the total heat losses of the house through the enclosure; calculation of heat receipts during the heating period; calculation of the value of the specific heat consumption for heating the house during the heating period; assigning an A to G. energy efficiency class building

2. PHPP - calculation of energy requirements for heating and maximum heating load; calculation of energy requirement for cooling; calculation of passive cooling, frequency of overload at it; calculation of the demand for renewable primary energy and the demand for primary energy of all energy services as a whole for the building; an estimate of the annual increase in renewable energy.

3. ArchiPHYSIK - calculation of energy requirements for heating and cooling; calculation of environmental index OI3; calculation of sound insulation data.

4. Hottgenroth - modeling of thermal behavior of buildings, zones; determination of heat load of premises; calculation of heating elements; design of drinking water systems; planning and design of home ventilation systems; energy reconstruction of buildings; calculation of load on cooling; modeling of systems of

hot water supply and solar heating; design of photovoltaic systems; planning of summer thermal insulation; design of cogeneration units, heat pump systems; the ability to view 3D images at any stage of modeling; detailed preparation of documents for approval.

5. *Optima - calculation of heat losses for each zone; calculation of energy requirements for heating and cooling during the year; forecasting temperature in each zone throughout the year.*

6. *"Calculation of heat losses of premises and thermal loads on the heating system of residential and public buildings" - calculation of transmission heat losses of individual rooms and buildings as a whole; calculation of energy requirements for the heating of ambient air supplied through the ventilation system; calculation of the required thermal loads on the heating system.*

7. *"Program for express evaluation of the efficiency of energy-saving solutions" - an assessment of the contribution of a specific energy-saving solution in reducing the heat consumption of a particular home compared to the basic one due to the use of energy-saving equipment and technologies.*

The methods of estimating the thermal balance of a building have analyzed the possibility of modeling the internal geometry of an object, even in the presence of graphical support, in almost all methods is absent or very limited. Only Hottgenroth applications (including ETU-Planer software) and GRAPHISOFT EcoDesigner STAR have this capability. In Hottgenroth the internal geometry is taken into account in the calculations, but the inverse design problem is not solved, the graphical possibilities are limited. In GRAPHISOFT EcoDesigner STAR, the internal geometry is taken into account in the calculations, but it is not possible to set different temperature indices for different rooms as output, nor is the inverse design problem solved and the graphical possibilities are limited.

Keywords: *energy efficiency; design of energy efficient buildings; thermal balance; thermal balance assessment.*