

# ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

УДК 697.1

В.І. Дешко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8218-3933  
Н.А. Буяк, к.т.н., асистент, ORCID 0000-0003-0597-6945  
І.Ю. Білоус, асистент, ORCID 0000-0002-6640-103X  
М.В. Гурєєв, магістр  
О.О. Голубенко, магістр  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗАМІНИ ВІКОН НА ЕНЕРГОПОТРЕБУ ТА УМОВИ КОМФОРТУ В БУДІВЛІ НА ОСНОВІ ДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

*Відповідно до настанови з виконання термомодернізації будівель, перший її етап є заміна світлопрозорих елементів конструкцій. У роботі проаналізовано вплив встановлення різних типів вікон на теплоенергетичний стан будівлі масової забудови для різних коефіцієнтів засклення з використанням динамічних сіткових моделей, створених на базі програмного продукту EnergyPlus. Для Пн та Пд орієнтацій визначено та проаналізовано енергопотребу в опаленні будівлі з енергозберігаючими вікнами з селективним напilenням та/або заповненням камер інертним газом, характеристики пропускання сонячних теплонадходжень яких відповідають та розширюють межі діючих стандартів в Україні.*

*Досліджено вплив зміни параметрів довкілля протягом опалювального періоду на показники теплового комфорту та на середню радіаційну температуру для різних варіантів засклення вікон. Оцінено діапазон зміни PMV, середньої радіаційної температури та температури повітря у приміщенні для опалювального періоду. Наведені рекомендації щодо регулювання зміни температури повітря у приміщенні для забезпечення відповідної категорії будівлі щодо комфортних умов.*

**Ключові слова:** енергопотреба, енергозберігаючі вікна, тепловий комфорт, прогнозована середня оцінка тепловідчуттів людини, середня радіаційна температура, операційна температура.

### Вступ

Більшість будівель в Україні відносяться до будівель масової забудови 80-тих років, при будівництві яких акцент робився на вартості будівництва, тобто мінімізувалися капітальні затрати і майже не враховувалися експлуатаційні витрати, тому 80% будівель не відповідають сучасним вимогам енергоефективності [1, 2]. Період, починаючи з 90-х років і до сьогодні, характеризується постійним ростом цін на енергоносії, що є спізненою відповіддю на аналогічні тенденції у світі. У зв'язку з газовою кризою в Україні починаючи з 2014 року, яка особливо гостро постала взимку 2017-2018 року, питання енергоефективності є одним з основних напрямків розвитку країни. Зниження витрати енергоносіїв на опалення будівель може досягатися різними шляхами. В Україні один з найбільш поширених – це використання сучасних теплоізоляційних матеріалів та технологій. Основним орієнтиром при реалізації комплексу енергозберігаючих заходів є зменшення енергоспоживання при дотриманні нормативної внутрішньої температури повітря. Враховуючи світові тенденції при оптимізації енергопотреби та забезпечення комфортних умов праці, розрахунок питомої енергопотреби повинен визначатися на базі операційної температури повітря, або при дотриманні показника комфортності PMV=0. Дані умови оптимізації енергоефективності є наступним преспективним кроком для використання в Україні.

Тепловий комфорт задано низкою стандартів, в Україні [3,4]. Якість теплового комфорту визначається на основі показників PMV (прогнозовані середні тепловідчуття людини) та PPD (прогнозований процент незадоволених тепловим середовищем). Розрахунок яких детально представлений у відповідних державних та міжнародних стандартах [3]. Ґрунтуючись на PMV визначається категорія будівлі щодо забезпечення комфортних умов [4]. У основі даних стандартів лежить

модель теплового комфорту людини, що будована на основі енергетичного балансу між поверхнею людського тіла та оточуючими предметами, розроблена Фангером [5]. Включення моделі людини у складну систему «джерело теплоти – огорожувальні констукції будівлі [6] є вагомим кроком в напрямку зниження енергоспоживання будівель і забезпечення належного рівня теплового комфорту. Оцінка показників теплового комфорту за умови динамічної зміни параметрів довкілля покаже можливості регулювання системи опалення з ціллю забезпечення належного рівня теплового комфорту та можливого зниження енергоспоживання.

Адекватність оцінки рівня енергоефективності будівель, деталізація показників енергетичного стану у значній мірі залежать від використання математичних моделей будівлі, складність яких визначається задачами, що вирішуються. Тенденції розвитку математичних моделей для визначення енергетичного стану будівлі спрямовані на зменшення часових інтервалів та в напрямку визначення локалізації характеристик системи і впливових факторів [7-9]. Сучасні комп'ютерні методи і засоби енергетичного моделювання будівлі на основі ВЕМ-моделей (BuildingEnergyModeling) - це універсальний, багатопільовий інструмент, що дозволяє проводити керування енергоспоживання в умовах реального часу. ВЕМ використовується в ґрунтовному аналізі енергоефективності будівлі та розробці стратегій (політики енергоефективності). Основним аспектом ВЕМ-моделювання є визначення енергопотреби з врахуванням внутрішньоекологічних показників (термічний і візуальний комфорт, якість повітря в приміщенні і т.д.) [10-12]. В моделях враховуються погодинні погодні дані місцевості, геометрія та теплофізичні властивості будівлі, внутрішні тепловиділення від освітлення, людей, обладнання, технічні характеристики системи тепlopостачання, вентиляції та охолодження, графіки експлуатації та інше. Серед найбільш потужних програмних продуктів реалізованих на принципах ВЕМ моделювання є BLAST, DOE-2, ESP-r, HVACSIM+, TRNSYS, EnergyPlus та інші [13–19].

ВЕМ моделювання дозволяє розглядати будівлю як енергетичну систему, що алогічно стандартам Європи, які активно впроваджуються в нас. Тому будівля як складна енергетична система розглядається як сукупність зовнішнього клімату, інженерних систем, оболонки, людини, як індикатор умов комфортності, та енергетичних процесів в приміщеннях будівлі.

Методологія системного підходу при детальному аналізі динамічних енергетичних характеристик будівлі дозволяє розглядати не будівлю, а проводити аналіз для окремих зон та отримати загальну картину енергетичних характеристик для об'єкту в цілому [20–24].

На енергетичні характеристики будівлі впливає ряд параметрів: теплофізичні властивості огорожень, геометричні розміри, додаткові внутрішні та сонячні теплонадходження, повітрообмін, режими експлуатації та інше. Динамічне моделювання будівель дозволяє проводити сумісні оцінку зміни та рівня впливових параметрів (заміна вікон, утеплення огорожень, зміна сонячних теплонадходжень, коефіцієнт заклення, зміна зовнішньої температури та інше), при аналізі енергомодернізації переходити з температури внутрішнього повітря до узагальнених параметрів комфортності.

#### **Мета та завдання**

Метою роботи є аналіз застосування динамічного ВЕМ моделювання при визначенні енергетичних характеристик заміни вікон для різного коефіцієнту заклення при забезпеченні комфортних умов.

Відповідно до поставленої мети мають бути вирішені такі завдання:

1. створення динамічних моделей кімнати в програмному середовищі EnergyPlus з найбільш поширеними теплофізичними та геометричними характеристиками для умов України,
2. аналіз часової зміни енергетичних характеристик будівлі при варіантах заміни вікон для типових теплофізичних та геометричних характеристик оболонки будівлі;
3. аналіз зміни параметрів та показників теплового комфорту протягом опалювального періоду за умови заміни вікон.

#### **Матеріал та результати досліджень**

**Вихідні дані та опис моделі.** Для дослідження енергетичних характеристик будівлі було розглянуто кімнату для теплофізичних властивостей огорожень типу "хрущівка". Розміри кімнати 5,5х6,1 м, висота приміщення 3,2 м. Кімната має одну зовнішню стіну (5,5 м) з вікном. Вікно - двокамерний склопакет з заповненням: 1) повітрям; 2) аргонном. Конструкція вікна розглянута з: 1) звичайним листовим склом; 2) селективним покриттям на внутрішньому склі; 3) селективне покриття на зовнішньому склі; 4) селективне покриття на внутрішньому та на зовнішньому склі. Несуча частина зовнішньої стіни виконана на основі кладки в одну цеглу. Несуча частина внутрішніх стін виконана з кладки в пів цегли. Перекриття над опалювальними приміщеннями залізобетонні – 20 см. Вентиляція природна з кратністю повітрообміну 1 год<sup>-1</sup>. Постійна температура повітря підтримувалась ідеальним термостатом.

Для оцінювання показників теплового комфорту суб'єктивні параметри мікроклімату приймаються наступними: термічний опір одягу людини  $I_{clo}=0,155 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ; активність людини (метаболізм)  $M=70 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

Погодинний розрахунок проведений на основі імітаційної динамічної моделі кімнати створеної в програмному продукті EnergyPlus, яка дозволяє отримувати взаємозв'язок розподілу температури в зоні

кімнати, рівня опалення та режимів роботи, інерційних особливості огорожень. Геометрія репрезентативних приміщень створювалась в графічному редакторі GoogleSketchup, що синхронізується через OpenStudio. Крок дискретизації розрахунку обраний 1 год. В роботі дослідження проведені для кліматичних умов м. Києва з міжнародного кліматичного файлу IWEC [25]. Для перерахунку сонячної радіації на умови кімнати використана деталізована методика "Full interior and exterior with reflection".

В підпрограмі розрахунку Window [26], що синхронізована з EnergyPlus [14], створено та досліджено різні типи двокамерних склопакетів з селективним покриттям та заповнення інертним газом. В роботі коефіцієнт засклення варіювався від 20 до 60%. Розглянуто заповнення камер вікна повітрям та аргоном.

Для оцінки рівня теплового комфорту застосовується метод, представлений у стандарті ISO Standard 7730, що ґрунтується на рівняннях теплового балансу для людського тіла [5]:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-2,1 \cdot M} + 0,028) \cdot [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}];$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)}, \quad (1)$$

де  $M$  – ступінь метаболізму, Вт/м<sup>2</sup>;  $W$  – ефективна механічна робота, Вт/м<sup>2</sup>;  $H$  – втрати теплоти випромінюванням (sensitive heat losses), Вт/м<sup>2</sup>;  $E_c$  – теплообмін шляхом випаровування зі шкіри, Вт/м<sup>2</sup>;  $C_{res}$  – теплообмін конвекцією під час дихання, Вт/м<sup>2</sup>;  $E_{res}$  – теплообмін випаровуванням під час дихання, Вт/м<sup>2</sup>;

$$H = 3,96 \cdot 10^8 \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_{cl} \cdot (t_{cl} - t_a), \quad (2)$$

$$E_c = 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15], \quad (3)$$

$$C_{res} = 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a), \quad (4)$$

$$E_{res} = 1,7 \cdot 10^5 \cdot M \cdot (5867 - p_a), \quad (5)$$

де  $f_{cl}$  – фактор, що враховує площу поверхні одягу;  $t_a$  – температура повітря, °C;  $t_r$  – середня радіаційна температура, °C;  $t_{cl}$  – температура поверхні одягу, °C;  $p_a$  – парціальний тиск пари у повітрі, Па;  $I_{cl}$  – термічний опір одягу, м<sup>2</sup>·°C/Вт;  $h_{cl}$  – коефіцієнт конвективного теплообміну, Вт/м<sup>2</sup>·К. Дані щодо значення метаболізму, залежно від виду діяльності людини та термічного опору одягу детально описані у [5].

#### Аналіз енергетичних характеристик будівлі

Умовні позначення:

wmw – стіна без утеплення;

air – вікно з повітряним заповненням;

arg – вікно з аргоновим заповненням;

os – селективне покриття на внутрішній поверхні зовнішнього скла;

is – селективне покриття на зовнішній поверхні внутрішнього скла;

ois – селективне покриття на внутрішньому та на зовнішньому склі;

ws – без селективного покриття;

S – південь;

N – північ.

На рис.1 наведено річну енергопотребу приміщень для різних за коефіцієнтом засклення та теплофізичних характеристик світлопрозорих елементів для Пд орієнтації. В роботі розглянуті найбільш поширені коефіцієнти засклення. Вплив коефіцієнта засклення відмінний для приміщень орієнтованих на Пд (S) та Пн (N). Наведені результати можуть бути використані при оптимізації енергоспоживання при реалізації енергозберігаючих заходів для розглянутих геометричних та теплофізичних властивостей огорожень.

Для розглянутих енергозберігаючих двокамерних склопакетів для Пд максимальна економія може бути досягнута при використанні вікон з аргоновим заповненням, з селективним покриттям на внутрішньому склі та коефіцієнтом засклення 0.6, а мінімальна енергопотреба – з повітряним заповненням з селективним покриттям на внутрішньому та на зовнішньому склі та коефіцієнтом засклення 0.2. В такому випадку енергопотреба зміниться на 27%.

Для Пн найбільш ефективним варіантом серед розглянутих є використання вікон з аргоновим наповнювачем, з селективним покриттям з обох сторін і коефіцієнтом засклення 0.6, гірший - з повітряним заповненням без селективного покриття та коефіцієнтом засклення 0.2. Річна різниця між найкращим та найгіршим варіантом - близько 13%.

Для вже існуючих будівель коефіцієнт засклення при термомодернізації є часто не змінним параметром, тому в результаті аналізу отримано, що аргонове заповнення покращує енергетичні показники склопакету в порівнянні з повітряним заповненням на 3–4%. Двокамерний склопакет з аргоновим заповненням з селективним покриттям на зовнішньому та внутрішньому склі дозволяє зменшити

енергопотребу приміщень будівлі, для Пн та Пд орієнтації в середньому, на 8–10%, наплення на зовнішньому склі – на 5%, на внутрішньому – 8% в порівнянні з аргоновим двокамерним склопакетом без селективних покриттів для коефіцієнта застляння 40%. При збільшені коефіцієнта застляння від 40% до 60% енергопотреба приміщень будівлі в середньому збільшиться на 5%.

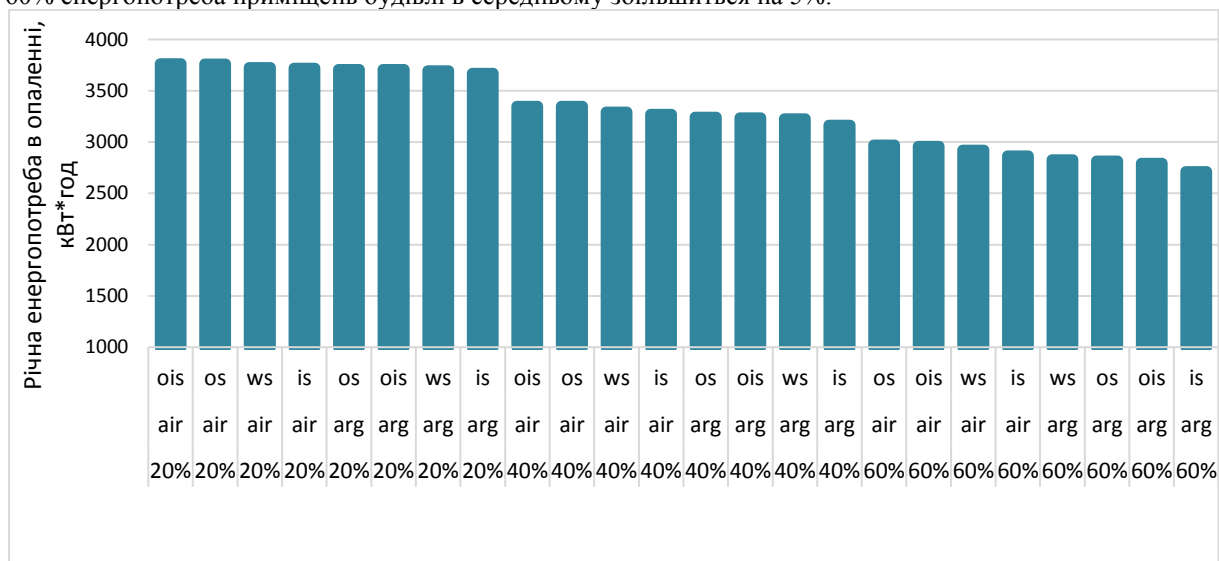


Рисунок 1 – Річна енергопотреба в опаленні в залежності від площі застляння, %, заповнення інертним газом камер і наявності та типу селективного покриття для приміщень орієнтованих на Пд

Потрібно відмітити, що змодельовані склопакети в EnergyPlus та Window, коефіцієнти теплопередачі відмінні від наведених в стандарті України [27]. На рис.2 наведено значення коефіцієнтів теплопередачі  $K$  та відносного пропускання сонячної радіації  $\zeta$  різних типів двокамерних склопакетів розрахованих в EnergyPlus та Window [14] у порівнянні з даними, наведеними в стандарті ДБН В.2.6-31 [27].

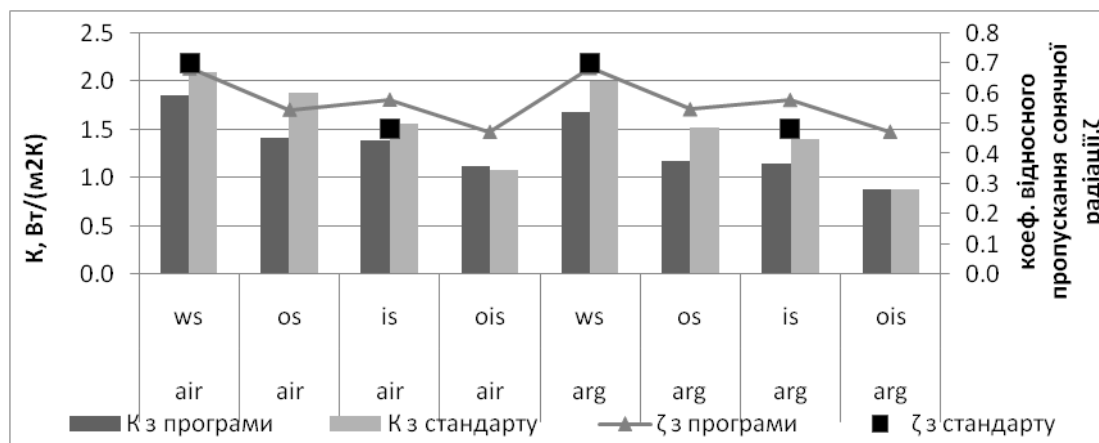


Рисунок – 2 Коефіцієнт теплопередачі та відносного пропускання сонячних теплонадходжень для різних типів вікон

Коефіцієнти теплопередачі з EnergyPlus [14] дещо менші (5-15%) від значень наведених в стандарті [27], що вносить відмінність у результати визначення енергопотреби будівлі. Відмінність найменша (2-5 %) для вікон з селективним покриттям на внутрішньому та на зовнішньому склі.

Потрібно відмітити, що коефіцієнти пропускання сонячної радіації світлопрозорими елементами конструкцій в стандарті [27] наведені не для всіх типів вікон. Для вікон без селективного покриття коефіцієнти співпадають, для вікон з селективним покриттям на внутрішньому склі відмінні на 20%. в стандарті не наведено коефіцієнти пропускання для вікон з селективним покриттям на зовнішньому склі.

Аналіз помісячних даних енергетичної потреби на опалення дозволяє врахувати вплив періодів міжсезоння. Враховуючи, що сонячні теплонадходження в зону кімнати надходять через світлопрозорі елементи конструкції, даний елемент конструкції по різному може впливати на енергетичні характеристики будівлі. Наприклад, для Пд орієнтації приміщень в період міжсезоння з великою площею

засклення може працювати як пасивна система опалення. Для приміщень з вікнами орієнтованими на Пн ефект селективного покриття менш помітний для холодного періоду року.

Для приміщень орієнтованих на Пд спостерігається, що при коефіцієнті засклення 0,6 в квітні опалення може бути вимкнене, в зимові місяці сонячна складова менша (для січня, грудня). Кліматичні дані погодного файлу IWEC для лютого характеризується найнижчою температурою зовнішнього повітря та найвищою для зимових місяців сонячною активністю, що пояснює поступ для Пд орієнтації (рис. 3б). Пн орієнтація приміщення не так чутлива до коливань сонячної радіації (рис.3а). Коефіцієнт засклення мало впливає на енергопотребу для Пн, тому в аналізі прийнято зовнішню стінку з низьким термічним опором ( $1 \text{ м}^2\text{К/Вт}$  - характерний для масової забудови) та енергоефективне вікно з термічним опором  $0,7 \text{ м}^2\text{К/Вт}$  (рис.2).

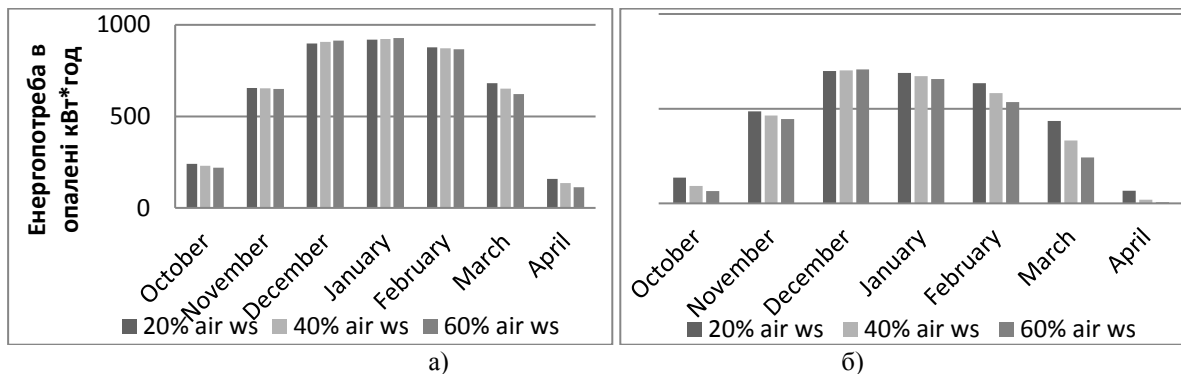


Рисунок – 3 Помісячна енергопотреба в опаленні для приміщення орієнтовано на Пн (а) та Пд (б) для різної площі засклення металопластиковими двокамерними склопакетами з повітряним заповненням

Аналогічні розрахунки проведені для двокамерних склопакетів з різними комбінаціями нанесення селективного покриття, а також заповнення інертним газом. Для Пд орієнтації енергопотреба дещо менша для періоду міжсезоння порівняно з аналогічними приміщеннями, де встановлені вікна без напилення, що пояснюється пропусканням сонячної радіації.

Проведено погодинний аналіз зміни навантаження на систему опалення для різних коефіцієнтів засклення та типів світлопрозорих конструкцій. На рис.4 наведено погодинне навантаження на систему опалення для Пн (1) та Пд (2) орієнтації для будівлі з коефіцієнтом засклення 0,4. Для інших варіантів засклення тенденція зміни навантаження аналогічна.

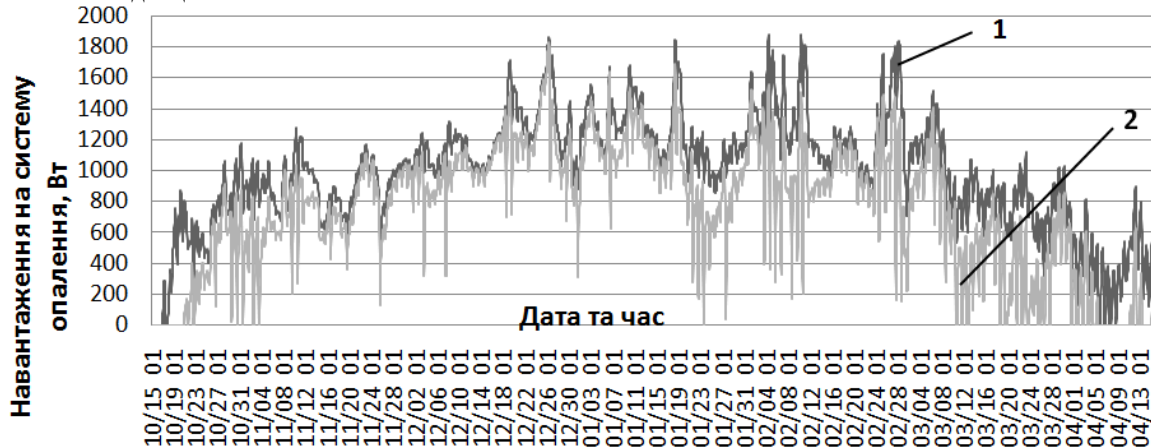


Рисунок 4 – Навантаження на систему опалення кімнати орієнтованої на Пн (1) та Пд (2) для різних графіків температури в приміщенні

Діапазон добових коливань при регулюванні навантаження на систему опалення дещо більший для Пд орієнтації ніж для Пн, що пов'язано з сонячними теплонадходженнями в зону кімнати. Для періоду міжсезоння при погодинному розрахунку спостерігається відключення опалення в періоди пікової сонячної активності. На рис.5 наведено навантаження на систему опалення для 9 діб початку опалювального сезону (15-24 жовтня). За умови збільшення коефіцієнту засклення на Пд орієнтації в період міжсезоння опалення вмикається ще пізніше.

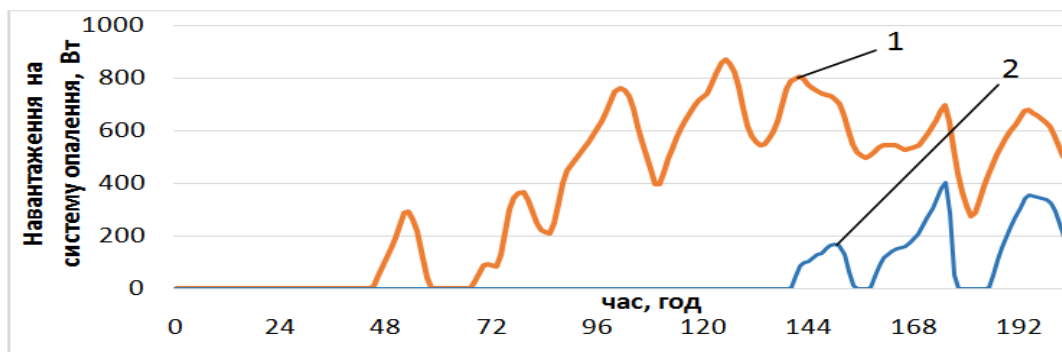


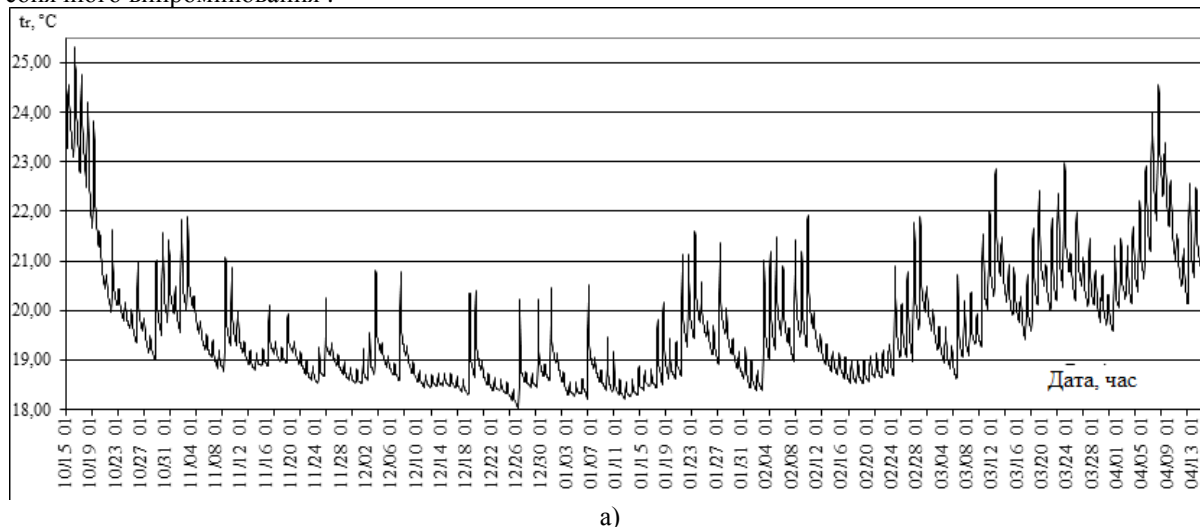
Рисунок 5 – Навантаження на систему опалення кімнати орієнтованої на Пн (1) та Пд (2)

Вищенаведений аналіз проведений за умови регулювання опалення при сталій температурі внутрішнього повітря в кімнаті. Потреба в опаленні може визначитися з врахуванням умов комфортності, тобто також на основі середньої радіаційної (або операційної) температури, що зменшить навантаження на систему опалення в години сонячної активності.

#### *Аналіз зміни параметрів та показників теплового комфорту протягом опалювального періоду*

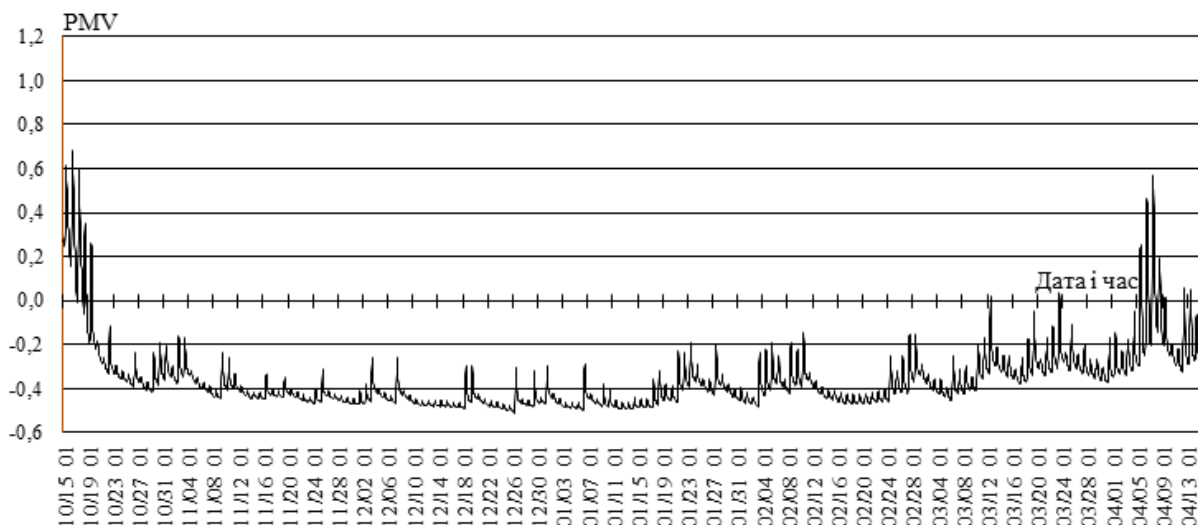
Оскільки у дослідженнях приймається, що суб'єктивні параметри теплового комфорту, а саме активність людини та тип одягу, є сталими, то зміна PMV (основний параметр теплового комфорту) обумовлена зміною середньої радіаційної температури повітря  $t_r$  при сталій температурі внутрішнього повітря в кімнаті. Зміна  $t_r$  обумовлена зміною температури огорожень, температури зовнішнього повітря та надходженням сонячного випромінювання. Значення  $t_r$  в EnergyPlus [14] розраховуються, як середньозважені по площах огорожень приміщення, враховуючи що людина знаходиться в центрі кімнати. На рис. 6 представлено зміну  $t_r$  (а) та PMV протягом опалювального періоду для коефіцієнту скління 0,4 для зовнішньої стіни Пд орієнтації. Встановлено загальний діапазон зміни  $t_r$  в межах 18–25°C, а PMV, як основного показника теплового комфорту від -0,5 до 0,7. Підвищення середньої радіаційної температури приміщення обумовлене врахуванням надходження сонячного випромінювання, а коливання - зміною температури зовнішнього повітря.

Для більш детального аналізу впливу коефіцієнту засклення на  $t_r$  та PMV на рис. 7 представлено зміну даних величин для системи із коефіцієнтом засклення рівним 0,4, 0,5 та 0,6 протягом 202 спостережень з початку опалювального періоду. Встановлено, що для даних спостережень різниця середньої радіаційної температури в приміщенні може сягати 3°C, PMV при цьому змінюється від 0,5 до 1,1. Що вказує на суттєвий вплив коефіцієнту засклення на показники теплового комфорту. На рис. 7 для різних коефіцієнтів засклення відображено зміну температури повітря у приміщенні. На початку опалювального періоду температура повітря у приміщенні може сягати 24°C (для коефіцієнту засклення 0,4) та 27 °C (для коефіцієнту засклення 0,6), що обумовлено надходженням сонячного випромінювання та відсутністю системи кондиціонування. При подальшому зниженні температури довілля після 92 години температура повітря у приміщенні для всіх варіантів засклення за допомогою термостату підтримується на рівні 20 °C, але мають місце денні підвищення під впливом теплонадходжень від сонячного випромінювання.



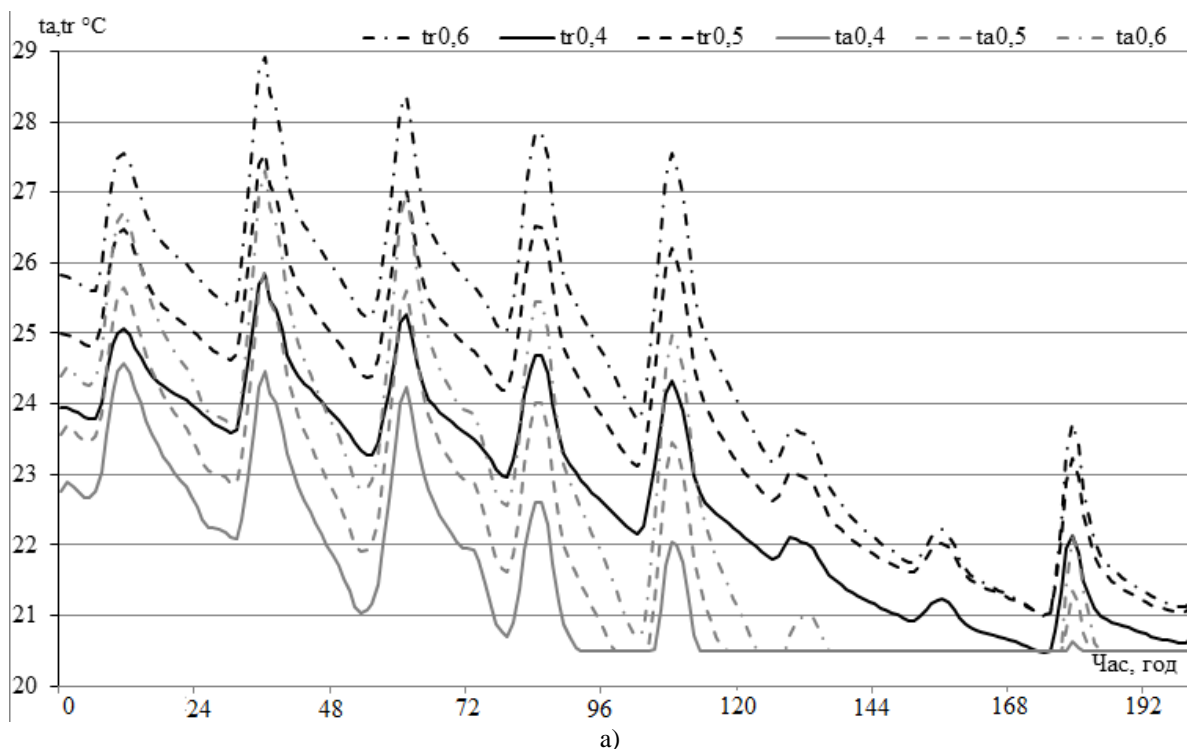
а)

Рисунок 6 – Зміна середньої радіаційної температури (а) та PMV (б) для опалювального періоду



б)

Рисунок 6 – Зміна середньої радіаційної температури (а) та PMV (б) для опалювального періоду



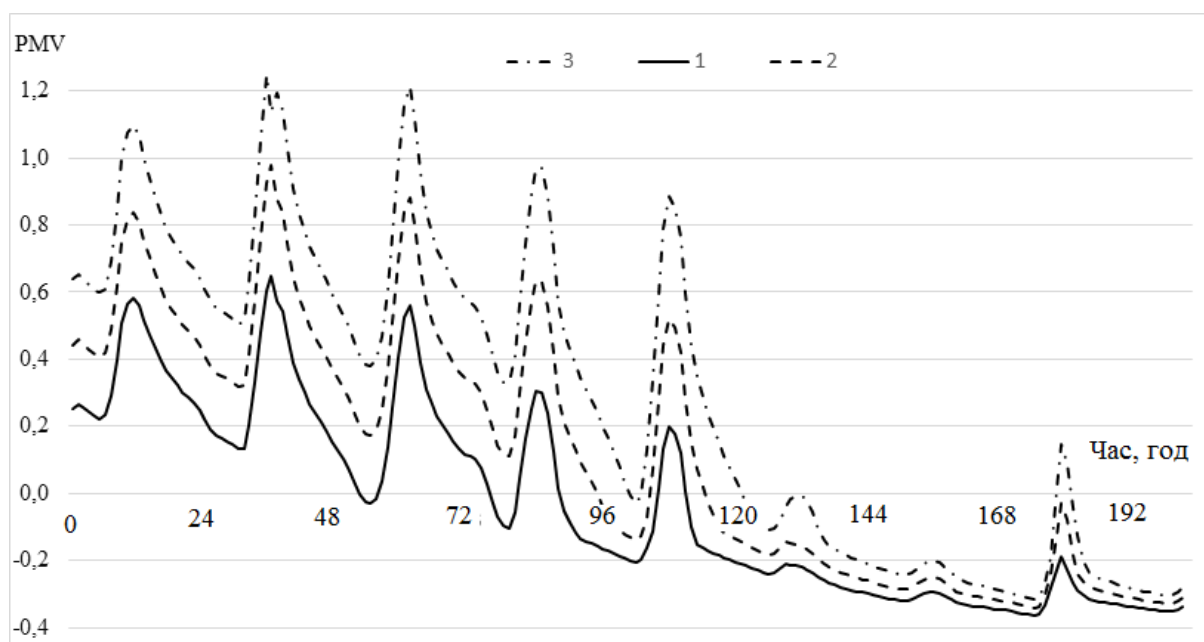
а)

Рисунок 7 – Найвищі та найнижчі значення  $t_r$  (а) та PMV (б) на протязі 9 діб опалювального періоду: 1 – коефіцієнт скління 0,4; 2 – 0,5; 3 – 0,6

Відповідно до стандарту [4] виділяють чотири рекомендованих категорії будівель, залежно від значення PMV для проектування будівель із механічним опаленням та охолодженням. Перша категорія для чутливих та хворих людей де  $-0,2 < PMV < +0,2$ , друга, відповідає нормальному рівню очікувань, має використовуватися для нових будівель та реновацій і  $-0,5 < PMV < +0,5$ . Отже аналізуючи рис.7, для різних варіантів коефіцієнту засклення можна знижувати температуру повітря у приміщенні для забезпечення



PMV=-0,5, що у свою чергу дозволить знизити енергоспоживання і забезпечити належний рівень очікувань щодо теплового комфорту.



б)

Рисунок 7 – Найвищі та найнижчі значення  $t_r$  (а) та PMV (б) на протязі 9 діб опалювального періоду: 1 – коефіцієнт скління 0,4; 2 – 0,5; 3 – 0,6

Забезпечення належного рівня теплового комфорту є важливою та актуальною задачею, зміна умов комфортності за умови динамічної зміни параметрів оточуючого середовища, а отже і об'єктивних параметрів теплового комфорту показує широкий діапазон та можливості щодо зниження енергоспоживання за рахунок зниження температури повітря у приміщенні у період високих значень середньої радіаційної температури.

### Висновки

У роботі проведено за допомогою динамічного моделювання дослідження енергетичних характеристик будівлі при встановленні енергозберігаючих склопакетів. Встановлено, що двокамерний склопакет з аргоновим заповненням з селективним покриттям на зовнішньому та внутрішньому склі дозволяє зменшити енергопотребу всередньому для будівлі на 8-10% в порівнянні з двокамерним склопакетом без селективного покриття та заповнення камер повітрям. Навантаження на систему опалення суттєво відмінне для Пн та Пд орієнтацій. За умови збільшення коефіцієнту засклення на Пд орієнтації в період міжсезоння (осінь/весна) опалення працює менше (вмикається/вимикається пізніше).

Потрібно відмітити, в стандарті ДБН В.2.6-31 [27] коефіцієнти теплопередачі на 5-15% більші від значень отриманих в EnergyPlus, підпрограмі Window. Найменша різниця (2-5 %) для вікон з селективним покриттям на внутрішньому та на зовнішньому склі. Також, коефіцієнти пропускання сонячної радіації світлопрозорими елементами в стандарті [27] наведені не для всіх типів вікон.

Проведено аналіз зміни середньої радіаційної температури та PMV (показника теплової комфортності) для динамічної зміни параметрів доквілля та різних варіантів засклення будівлі. Встановлено діапазон зміни  $t_r$  на протязі року для різних варіантів огорожень знаходиться в межах 18–25 °С, а PMV, як основного показника теплового комфорту -0,5–0,7. Даний аналіз показує широкий діапазон зміни об'єктивних параметрів та показників теплового комфорту, та можливості щодо зниження енергоспоживання за рахунок зниження температури повітря у приміщенні у період високих значень середньої радіаційної температури.

Також проаналізовано вплив огорожень на зміну PMV, встановлено, що за рахунок зміни параметрів огорожень можна змінити PMV практично вдвічі, що вказує на необхідність комплексного підходу до оцінки теплового комфорту. А саме на важливість врахування динамічної зміни параметрів доквілля та можливої термомодернізації.

В подальшому заплановано використання динамічних моделей енергетичного стану для аналізу впливу на енергопотребу та умови комфорту утеплення та регулювання опалення будівель.



Список використаної літератури

1. Лавінська З., Саницька О. Соціально-екологічні аспекти енергозбереження в житлово-комунальному секторі. "GEODESY, ARCHITECTURE & CONSTRUCTION 2009" (GAC-2009), 14-16 MAY 2009, LVIV, UKRAINE. P.75-77.
2. Долінський А.А., Басок Б.І. та ін. Комунальна теплоенергетика України: стан, проблеми, шляхи модернізації. К.:ІТТТФ, 2007. - 828 с.
3. ДСТУ Б EN ISO 7730: 2011. Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту. [Чинний від 2013-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2012. 74 с.
4. ДСТУ Б EN 15251: 2011. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики будівель. [Чинний від 2013-07-01]. Київ: Мінрегіон України, 2012. 71 с.
5. Fanger, P. (1973). Assessment of man's thermal comfort in practice. *British Journal of Industrial Medicine*, 30, 313–324.
6. Buyak N.A., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Buildings energy use and human thermal comfort according to energy and exergy approach. *Energy and buildings*, 2017. Vol. 146. P. 172–181.
7. German Association of Engineers, Calculation of transient thermal response of rooms and buildings – modelling of rooms. 91.140.10 (VDI 6007-1), Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf, 2012.
8. Ding Y., Zhang Q., Yuan T., Yang K. Model input selection for building heating load prediction: A case study for an office building in Tianjin. *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 59. P. 254-270.
9. ДСТУ Б EN ISO 13790:2011. Енергоефективність будівель. Розрахунок енергоспоживання при опаленні та охолодженні (EN ISO 13790:2008, IDT). [На заміну ГОСТ 26629.85; чинний з 01.01.2013]. К. : НДІБК, 2011. 229 с.
10. Reeves T., Olbina S., Raja R. A. Issa Guidelines for Using Building Information Modeling for Energy Analysis of Buildings. *Buildings*. 2015. Vol. 5 P. 1361-1388.
11. Jalaei F., Jrade A. INTEGRATING BUILDING INFORMATION MODELING (BIM) AND ENERGY ANALYSIS TOOLS WITH GREEN BUILDING CERTIFICATION SYSTEM TO CONCEPTUALLY DESIGN SUSTAINABLE BUILDINGS. *Journal of Information Technology in Construction*. 2014. Vol. 19. P. 494-519.
12. Harish V.S.K.V., Kumar A. A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 56. P.1272–1292.
13. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі будівель для оцінки енергоспоживання. *Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць*. 2014. № 80. С. 68–72.
14. Офіційний сайт Energy Plus Energy Simulation Software. <https://energyplus.net/>
15. Офіційний сайт TRNSYS Energy Simulation Software <http://www.trnsys.com>
16. Crawley D.B., Winkelmann F.C., Lawrie L.K., Pedersen C.O. EnergyPlus: new capabilities in a whole-building energy simulation program. Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, 2001. P. 51-58
17. Martin M., Afshari A., Armstrong P. R., Norford L. K. Estimation of urban temperature and humidity using a lumped parameter model coupled with an Energy Plus model. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 96. P. 221–235.
18. Shabunko V., Lim C.M., Mathew S. Energy Plus models for the benchmarking of residential buildings in Brunei Darussalam. *Energy and Buildings*. 2016. P. 1-10.
19. Yu S., Cui Y., Xu X., Feng G. Impact of Civil Envelope on Energy Consumption Based on Energy Plus. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 121. P. 1528–1534.
20. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий: монография. М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. 194 с.
21. Попырин Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. М.: Энергия, 1978.
22. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М., Шилкин Н.В. Энергоефективные здания: монография. М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. - 200 с.
23. Sayadi S., Tsatsaronis G., Morosuk T. A New Approach for Applying Dynamic Exergy Analysis and Exergoeconomics to a Building Envelope: Proceedings of Ecos 2016, The 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation And Environmental Impact of Energy Systems June 19-23, 2016, Portorož, Slovenia.
24. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. М.: Стройиздат, 1979. 248 с.
25. *International Weather for Energy Calculations*: [https://energyplus.net/weather-location/europe\\_wmo\\_region\\_6/UKR](https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR).

26. Winkelmann F.C. MODELING WINDOWS IN ENERGYPLUS. Seventh International IBPSA Conference Riode Janeiro, Brazil August 13-15, 2001. *Building Simulation*. 2001. P. 457 – 464.

27. ДБН В.2.6\_31:2006. Конструкції будинків та споруд. Теплова ізоляція будівель. [На заміну СНиП II\_3\_79 ; чинний від 2007.04.01 зі Зміною №1 від 1 липня 2013 року]. К.: Мінбуд України, 2006. 70 с.

V. Deshko, ORCID 0000-0002-8218-3933

N. Buyak, ORCID 0000-0003-0597-6945

I. Bilous, ORCID 0000-0002-6640-103X

M. Gureev

O. Holubenko

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF VACUUM REPLACEMENT ON ENERGY CONSUMPTION AND CONDITIONS OF COMFORT IN BUILDING ON THE BASIS OF DYNAMIC MODELING

*Taking into account the instruction on the implementation of thermo-modernization of buildings, the first stage is replacement of translucent structural elements. The paper analyses the influence of different variants of windows replacement on the heat energy state of a typical mass building for various glazing coefficients in dynamic grid models created on the basis of the Energy Plus software product. For N and S orientations, energy-saving windows with selective coating and / or filled up with inert gas cells have a different effect, which is explained by the coefficients of solar heat transmission, which was obtained on the basis of the simulation model. In addition, current standards in Ukraine do not provide all variants of the coefficients of optical transmittance characteristics of solar heat gains. In this work, a dynamic hourly simulation of the building energy demand in heated space for representative rooms N and S oriented for different glazing coefficients and window types has been carried out.*

*The influence of an environment parameters change during heating period on thermal comfort parameters and the average radiant temperature for different glazing was investigated. Range of PMV change, average radiating temperature and air temperature in the room for the heating period were estimated. The recommendations for adjusting indoor room air temperature change to provide the appropriate category of the building to ensure comfortable conditions were given. The influence of glazing on the change of PMV was also analysed. It was established that changing windows glazing can affect the PMV to change almost two times, which indicates the need for an integrated approach to the assessment of thermal comfort. Namely, the importance of taking into account the dynamic changes in the environment parameters and possible thermo-modernization were detected.*

**Keywords:** energy demand, energy saving windows, thermal comfort, PMV, average radiation temperature, operating temperature.

### References

1. Lavinska Z., Sanytska O. (2009) *Cotsialno-ekolohichni aspekty enerhozberezhennia v zhytlovo-komunalnomu sektori. GEODESY, ARCHITECTURE & CONSTRUCTION 2009 (GAC-2009), 14-16 MAY 2009, LVIV, UKRAINE. P.75-77.*

2. Dolinskyi A.A., Basok B.I. ta in. (2007) *Komunalna teploenerhetyka Ukrainy: stan, problemy, shliakhy modernizatsii. Kyiv:ITTTF.*

3. DSTU B EN ISO 7730: 2011. *Erhonomika teplovoho seredovyscha. Analitychne vyznachennia ta interpretatsiia teplovoho komfortu na osnovi rozrakhunkiv pokaznykiv PMV i PPD i kryteriiv lokalnoho teplovoho komfortu. [Chynnyi vid 2013-01-01]. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2012. 74 s.*

4. DSTU B EN 15251: 2011. *Rozrakhunkovi parametry mikroklimatu prymishchen dlia proektuvannia ta otsinky enerhetychnykh kharakterystyk budivel po vidnoshenniu do yakosti povitria, teplovoho komfortu, osviltennia ta akustyky budivel. [Chynnyi vid 2013-07-01]. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2012. 71 s.*

5. Fanger, P. (1973). *Assessment of man's thermal comfort in practice. British Journal of Industrial Medicine, 30, 313–324.*

6. Buyak N.A., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Buildings energy use and human thermal comfort according to energy and exergy approach. *Energy and Buildings*, 2017. Vol. 146. P. 172–181.
7. German Association of Engineers, Calculation of transient thermal response of rooms and buildings – modelling of rooms. 91.140.10 (VDI 6007-1), Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf, 2012.
8. Ding Y., Zhang Q., Yuan T., Yang K. Model input selection for building heating load prediction: A case study for an office building in Tianjin. *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 59. P. 254-270.
9. EN 13790:2008. Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling. — CEN. European Committee for Standardization, 2008. — 53 p.
10. Reeves T., Olbina S., Raja R. A. Issa Guidelines for Using Building Information Modeling for Energy Analysis of Buildings. *Buildings*. 2015. Vol. 5 P. 1361-1388.
11. Jalaei F., Jrade A. INTEGRATING BUILDING INFORMATION MODELING (BIM) AND ENERGY ANALYSIS TOOLS WITH GREEN BUILDING CERTIFICATION SYSTEM TO CONCEPTUALLY DESIGN SUSTAINABLE BUILDINGS. *Journal of Information Technology in Construction*. 2014. Vol. 19. P. 494-519.
12. Harish V.S.K.V., Kumar A. A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 56. P.1272–1292.
13. Deshko V.I., Bilous I.Iu. Matematychni modeli budivel dlia otsinky enerhospozhyvannia. Budivelni konstruktzii: Mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk naukovykh prats. 2014. № 80. S. 68–72.
14. EnergyPlus Energy Simulation Software. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>.
15. TRNSYS Energy Simulation Software <http://www.trnsys.com>
16. Crawley D.B., Winkelmann F.C., Lawrie L.K., Pedersen C.O. EnergyPlus: new capabilities in a whole-building energy simulation program. Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, 2001. P. 51-58
17. Martin M., Afshari A., Armstrong P. R., Norford L. K. Estimation of urban temperature and humidity using a lumped parameter model coupled with an EnergyPlus model. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 96. P. 221–235.
18. Shabunko V., Lim C.M., Mathew S. Energy Plus models for the benchmarking of residential buildings in Brunei Darussalam. *Energy and Buildings*. 2016. P. 1-10.
19. Yu S., Cui Y., Xu X., Feng G. Impact of Civil Envelope on Energy Consumption Based on Energy Plus. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 121. P. 1528–1534.
20. Tabunshchikov Yu. A., Brodach M. M. Matematycheskye modelirovaniye y optymyzatsiya teplovoi effektivnosti zdaniy: monografiya. M.: AVOK-PRESS, 2002. 194 s.
21. Popyirin L. S. Matematicheskoe modelirovaniye i optimizatsiya teploenergeticheskikh ustanovok. M.: Energiya, 1978.
22. Tabunshchikov Yu. A., Brodach M. M., Shilkin N.V. Energoefektivnyye zdaniya: monografiya. M.: AVOK-PRESS, 2003. - 200 s.
23. Sayadi S., Tsatsaronis G., Morosuk T. A New Approach for Applying Dynamic Exergy Analysis and Exergoeconomics to a Building Envelope: Proceedings of Ecos 2016, The 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation And Environmental Impact of Energy Systems June 19-23, 2016, Portorož, Slovenia.
24. Bogoslovskiy V.N. Teplovoy rezhim zdaniya. M.: Stroyizdat, 1979. 248 s.
25. *International Weather for Energy Calculations*: [https://energyplus.net/weather-location/europe\\_wmo\\_region\\_6/UKR](https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR).
26. Winkelmann F.C. MODELING WINDOWS IN ENERGYPLUS. Seventh International IBPSA Conference Rio de Janeiro, Brazil August 13-15, 2001. *Building Simulation*. 2001. P. 457 – 464.
27. DBN V.2.6\_31:2006. Konstruktzii budynkiv ta sporud. Teplova izoliatsiia budivel. [Na zaminu SNyP II\_3\_79 ; chynnyi vid 2007.04.01 zi Zminoiu №1 vid 1 lypnia 2013 roku]. K.: Minbud Ukrainy, 2006. 70 s.

Надійшла 15.11.2018

Received 15.11.2018