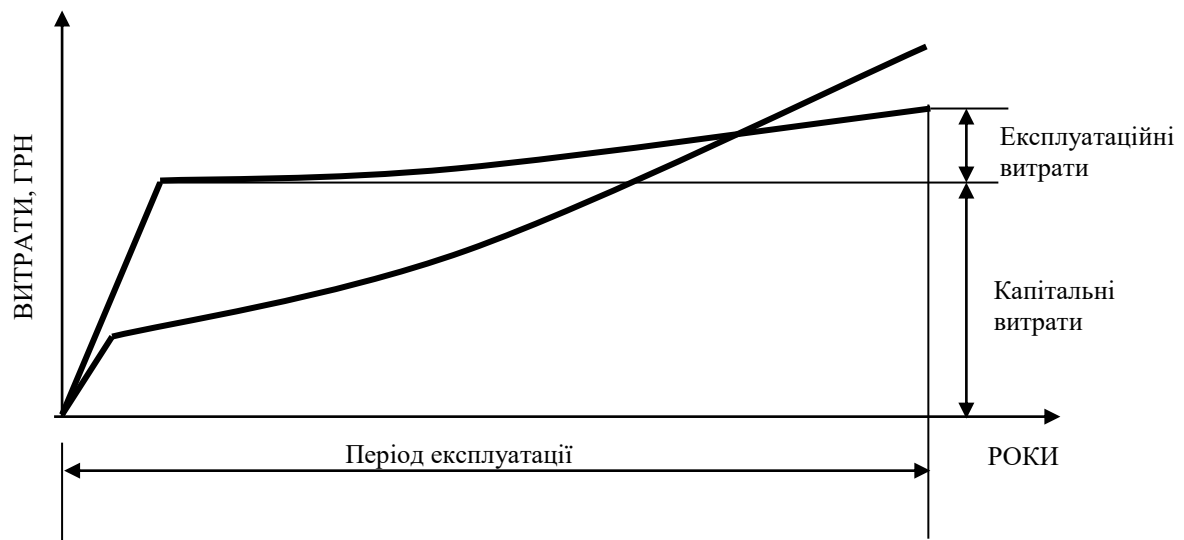


Лекція 4. Наукові принципи розрахунку і нормування теплозахисних властивостей теплоізоляційної оболонки будівлі

Архітектурно-будівельна теплотехніка займається питанням оптимізації теплоізоляційної оболонки будівель.

Значення архітектурно-будівельної теплотехніки в останні роки значно зросло. Це пов'язано з підвищенням вимог до енергозбереження будівель. Раніше особливу увагу приділяли зниженню капітальних витрат на будівництво об'єктів, а вимоги до експлуатаційних витрат мали другорядне значення. Тому огорожувальні конструкції будинків мали незначні теплоізоляційні властивості, що призводило до того, що значна кількість енергії на опалення у зимовий період витрачалась, фактично марно – на підігрів зовнішнього повітря. Зараз, коли людство усвідомило вичерпаність традиційних джерел енергії, при проектуванні будинків стали приділяти значну увагу підвищенню теплозахисних якостей зовнішньої оболонки будівель, її оптимізації.

За критерій оптимізації зазвичай приймається мінімізація капітальних та експлуатаційних витрат на підтримку комфортного мікроклімату у приміщеннях будинку за розрахунковий період його експлуатації.



Це неймовірно складна задача, яка не може мати абсолютного рішення, хоча б із-за того, що неможливо передбачити на 50-100 років наперед функцію зростання вартості енергетичних ресурсів. Тому ця задача розчленовується на окремі задачі:

- оптимізація форми будівлі,
- поелементне проектування огорожувальних конструкцій (розрахунок опору теплопередачі, вологісного стану, теплостійкості, повітропроникності),

приведення енергоспоживання будинку на опалення до нормативних вимог.

Нормативна база. Теплоізоляційна оболонка будинків.

[1] ДБН В.2-31:2016. Теплова ізоляція будівель.

Оптимізація форми будівлі.

Розрахунковий показник компактності будинку, $\Lambda_{к\text{ буд}}$, визначається за формулою

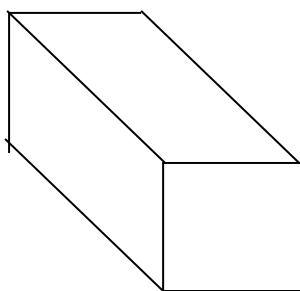
$$\Lambda_{к\text{ буд}} = F_{\Sigma} / V_h \quad (1)$$

де F_{Σ} – загальна площа внутрішніх поверхонь зовнішніх огорожувальних конструкцій, включаючи покриття (перекриття) верхнього поверху і переkritтя (підлоги) нижнього опалювального приміщення, м^2 ;

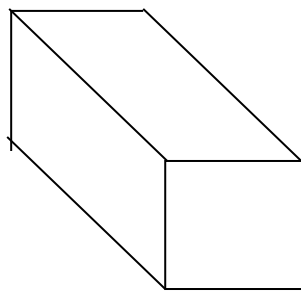
V_h – опалюваний об'єм будівлі, рівний об'єму, обмеженому внутрішніми поверхнями зовнішніх огорожувальних конструкцій будинків, м^3 .

Щ.2 При проектуванні житлових будинків треба виконувати наступні нормативні вимоги щодо показника компактності $\Lambda_{к\text{ буд}}$ не більше:

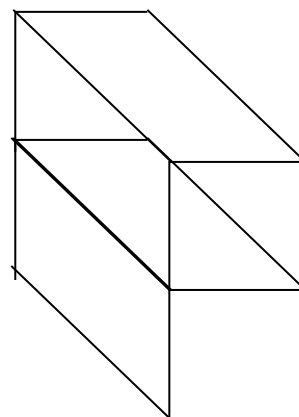
- 0,25-для 16-поверхових будівель і вище;
- 0,29-для будівель від 10 до 15 поверхів включно;
- 0,32-для будівель від 6 до 9 поверхів включно;
- 0,36-для 5-поверхових будівель;
- 0,43-для 4-поверхових будівель;
- 0,54-для 3-поверхових будівель;
- 0,61; 0,54; 0,46-для дво-, три- і чотирьохповерхових блокувальних і секційних будівель відповідно;
- 0,9-для дво – і одноповерхових будівель з мансардою;
- 1,1-для одноповерхових будівель.



Λ_1



Λ_1



$\Lambda_2 < \Lambda_1 + \Lambda_1$

Види передачі тепла

Теплопровідність

Коефіцієнт теплопровідності показує яка кількість теплоти Q , Дж, проходить крізь 1 м^2 поверхні матеріалу товщиною 1 м за 1 с при різниці температури обох поверхонь 1 К .

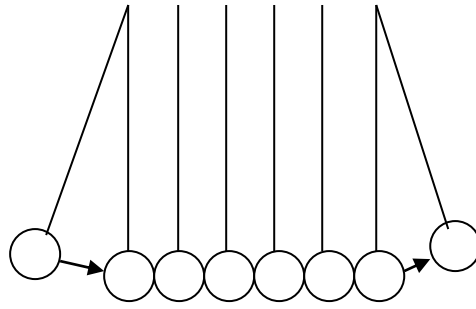
Коефіцієнт теплопровідності залежить від багатьох факторів, основним з яких є **густина матеріалу** ρ , кг/м^3 . Чим менша густина матеріалу, тим меншу теплопровідність він має і тим нижче його коефіцієнт теплопровідності й навпаки. Наприклад, залізобетон ($\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$) має коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 1,92 \div 2,04 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; кладка з глиняної звичайної цегли на цементно-піщаному розчині ($\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$) – $\lambda = 0,7 \div 0,81 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; фанера клеєна ($\rho = 600 \text{ кг/м}^3$) – $\lambda = 0,15 \div 0,18 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; вата мінеральна ($\rho = 150 \text{ кг/м}^3$) – $\lambda = 0,064 \div 0,07 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

На коефіцієнт теплопровідності значний вплив оказує розмір, форма, а також характер **розташування пор та пустот у матеріалі**. Дрібні замкнені пори, що заповнені повітрям дуже погано проводять тепло. Зі збільшенням розмірів пор та пустот коефіцієнт теплопровідності різко зростає. Наприклад, туф густиною $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$, в якому безліч маленьких пустот, має коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,43 \div 0,52 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, а силікатна чотирнадцятипустотна кладка на цементно-піщаному розчині такої ж густини, має вже коефіцієнт теплопровідності лише $\lambda = 0,64 \div 0,76 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Один і той же матеріал може мати різну теплопровідність в залежності від того, як він буде покладений у конструкцію. Наприклад, сосна ($\rho = 500 \text{ кг/м}^3$), при розміщенні її волокон поперек теплового потоку має $\lambda = 0,14 \div 0,18 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, а якщо волокна розташовані вздовж теплового потоку, то $\lambda = 0,29 \div 0,35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Великий коефіцієнт теплопровідності має вода: $\lambda = 0,58 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, ще більший лід: $\lambda = 2,33 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Тому **зволоження матеріалів**, а тим більше замерзання їх у зволоженому стані різко зменшують опір теплопередачі огороження. Саме від ступеня зволоження залежить значення розрахункового коефіцієнту теплопровідності матеріалів, з яких складається конструкція. Ступень же зволоження конструкції залежить від вологості району будівництва та вологісного режиму приміщення, яке вона огорожує. Тому перш ніж починати розрахунок опору теплопередачі слід визначити умови експлуатації огорожувальної конструкції (“А” чи “Б”) та значення розрахункових коефіцієнтів теплопровідності, що приймаються за відповідною таблицею.

Цей вид теплопередачі характерний для матеріалів, що мають структуру. При теплопровідності перенесення тепла триває без перенесення самого матеріалу – від молекули до молекули.



Конвекція

Випромінювання.

У повітряних прошарках теплопередача триває, в основному, не за рахунок теплопровідності, а завдяки конвекції та випромінюванню.

Опір теплопередачі.

Опір теплопередачі огорожувальної конструкції характеризує її теплоізоляційну здатність, тобто можливість зменшення кількості тепла, що проходить крізь неї. Опір теплопередачі залежить від теплофізичних властивостей матеріалів з яких складається конструкція, а також від порядку їх розташування по товщині огороження.

Якщо непрозора огорожувальна конструкція чи непрозора частина огорожувальної конструкції є багат шаровою конструкцією, що складена з однорідних (за теплофізичними характеристиками) шарів, то така конструкція називається *термічно однорідною*. Її опір теплопередачі R_{Σ} , $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, визначається за формулою

$$R_{\Sigma} = R_{\text{в}} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_3 ,$$

де $R_{\text{в}}$ – опір теплосприйняттю внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

R_1, R_2, \dots, R_n – термічні опори окремих однорідних шарів огороження, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

R_3 – опір тепловіддачі зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Опір теплосприйняттю внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції $R_{\text{в}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, та опір тепловіддачі її зовнішньої поверхні R_3 , $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, визначаються за схожими формулами

$$R_{\text{в}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} ; \quad R_3 = \frac{1}{\alpha_3} ,$$

де $\alpha_{\text{в}}$, α_3 – коефіцієнти тепловіддачі внутрішньої і зовнішньої поверхонь огороження, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Коефіцієнт $\alpha_{\text{в}}$ залежать від типу та гладкості поверхні. Наприклад, коефіцієнт теплосприйняття внутрішніх поверхонь

стін, гладких стель та підлог дорівнює 8,7 Вт/(м²·К). Коефіцієнт α_3 залежить від типу та розташування поверхні по відношенню до зовнішнього повітря. Наприклад, коефіцієнт тепловіддачі зовнішніх поверхонь стін, покриттів та перекриттів над проїздами дорівнює 23 Вт/(м²·К). Ці коефіцієнти визначаються за відповідною таблицею.

Термічний опір окремого однорідного i -го шару огорожувальної конструкції (крім повітряних прошарків), R_i , м²·К/Вт, визначається за формулою

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i},$$

де δ_i – товщина шару, м;

λ_i – коефіцієнт теплопровідності матеріалу шару, Вт/(м·К).

Якщо непрозора огорожувальна конструкція *термічно неоднорідна*, то визначається її приведений опір теплопередачі $R_{\Sigma \text{ пр}}$, м²·К/Вт, за формулою

$$R_{\Sigma \text{ пр}} = \frac{F_{\Sigma}}{\sum_{j=1}^m \frac{F_j}{\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + R_j + \frac{1}{\alpha_3}}}$$

де $\alpha_{\text{в}}$, α_3 – коефіцієнти тепловіддачі внутрішньої і зовнішньої поверхонь

R_j – термічний опір j -ї термічно однорідної зони, що визначається експериментально або розрахунком двовимірного (тривимірного) температурного поля, м²·К/Вт;

F_j – площа j -ї термічно однорідної зони, м²;

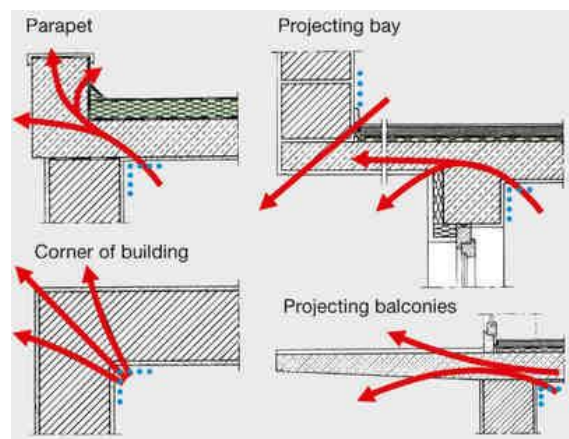
F_{Σ} – площа огорожувальної конструкції, м²;

m – кількість однорідних зон у конструкції.

Програми:

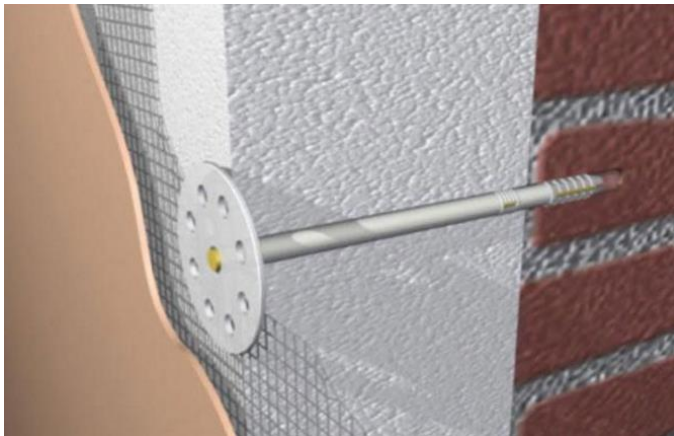
Term, Design Space, NormCad та ін.

Лінійні теплопровідні включення:



Лінійний коефіцієнт теплопередачі теплопровідного включення k показує яка кількість теплоти Q , Дж, проходить крізь 1 м довжини теплопровідного включення за 1 с при різниці температури обох поверхонь 1К. Він розраховується на підставі моделювання двовимірних температурних полів чи визначається експериментальним шляхом. У [13] наводяться значення k для деяких найбільш типових вузлів сполучення огорожувальних конструкцій. Вимірюється у Вт/(м·К).

Точкові теплопровідні включення:



Точковий коефіцієнт теплопередачі χ показує яка кількість теплоти Q , Дж, передається через теплопровідне включення за 1 с при різниці температур по обидві сторони конструкції в 1 К. Він розраховується на підставі моделювання тривимірних температурних полів чи визначається експериментальним шляхом. Вимірюється у Вт/К.

Якщо відомі значення лінійних та точкових коефіцієнтів теплопередачі теплопровідних включень, то розрахувати приведений опір термічно неоднорідної конструкції можна визначити за формулою

$$R_{\Sigma \text{пр}} = \frac{F_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^I \frac{F_i}{R_{\Sigma i}} + \sum_{j=1}^J k_j L_j + \sum_{m=1}^M \psi_m N_m} ,$$

де F_{Σ} – теж саме, що у формулі (11.8);

F_j – площа i -го термічно однорідного масиву огорожувальної конструкції без врахування теплопровідних включень, м²;

$R_{\Sigma i}$ – опір теплопередачі j -го однорідного масиву, м²·К/Вт;

k_j – лінійний коефіцієнт теплопередачі j -го теплопровідного включення, Вт/(м·К);

ψ_m – точковий коефіцієнт m -го теплопередачі включення, Вт/К

L_j – лінійний розмір j -го теплопровідного включення за внутрішньою

поверхнею огорожувальною конструкцією, м;

N – кількість m -их точкових теплопровідних включень, шт.

[2] ДСТУ Б В.2.6-189:2013 Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель

[3] Свод правил расчёта приведенного сопротивления теплопередачи (Россия)

Опір теплопередачі R_{Σ} , чи приведений опір теплопередачі $R_{\Sigma пр}$ повинен бути не менше ніж мінімально допустимий опір теплопередачі огорожувальної конструкції $R_{q \min}$:

$$R_{\Sigma пр} \geq R_{q \min}.$$

Значення $R_{q \min}$ залежить від кліматичних умов району будівництва, типу огорожувальної конструкції та мікроклімату приміщення, що проектується. Для України значення мінімально допустимих опорів теплопередачі огорожувальних конструкцій наведені у табл. 3 та 4 [1].

Для житлових і громадських приміщень – визначається в залежності ВІД ВИДУ КОНСТРУКЦІЇ і ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗОНИ.

Проектування повітряних прошарків

Термічний опір повітряних прошарків визначають іншим шляхом. Для вертикальних та горизонтальних замкнених повітряних прошарків (прошарків, що не мають сполучення з зовнішнім або внутрішнім повітрям) термічний опір визначається за таблицями додатку В [2] в залежності від їх товщини, температури, наявності відбивної ізоляції, а для горизонтальних прошарків – ще і від напрямку потоку тепла (знизу вгору чи зверху вниз). Наприклад, при товщині повітряного прошарку $\delta_{п.пр} = 0,01$ м його термічний опір $R_{п.пр} = 0,13 \div 0,15$ м²·К/Вт, а при $\delta_{п.пр} = 0,1$ м – $R_{п.пр} = 0,15 \div 0,23$ м²·К/Вт. Тобто збільшення товщини прошарку у 10 разів дає збільшення його термічного опору лише на 15-35 %!

При проектуванні зовнішніх огорожувальних конструкцій з повітряними прошарками необхідно мати на увазі наступне:

1. Ефективними, з теплотехнічної точки зору, є тільки прошарки, що мають невелику товщину, тому необхідно уникати товстих прошарків, якщо це не виправдовується конструктивними міркуваннями.
2. Товсті прошарки вигідно наповнювати малотеплопровідними матеріалами;
3. Більш раціонально робити в огорожувальній конструкції декілька прошарків малої товщини, ніж один великої товщини.
4. Повітряні прошарки бажано розміщувати ближче до зовнішнього

боку огороження, оскільки у цьому випадку зменшується кількість тепла, що передається випромінюванням.

5. Повітряні прошарки повинні бути замкнутими, якщо це не суперечить іншим міркуванням (наприклад, забезпечення більшої теплостійкості огорожень в умовах жаркого клімату).
6. Вертикальні прошарки в зовнішніх стінах необхідно перегороджувати горизонтальними діафрагмами на рівні перекриттів, оскільки це зменшує конвекційний рух повітря у прошарку.
7. Одну з поверхонь прошарку бажано покривати алюмінієвою фольгою, оскільки при цьому приблизно удвічі зменшується кількість тепла, що передається випромінюванням. Покриття ж фольгою ще і другої поверхні практично не збільшує термічний опір прошарку. Найбільш ефективно встановлювати у прошарку відбивної ізоляції зі спіненим шаром

Санітарно-гігієнічні вимоги до огорожувальних конструкцій

Зовнішні огорожувальні конструкції треба проектувати таким чином, щоб крім вимоги

$$R_{\Sigma \text{ пр}} \geq R_{q \text{ min}}$$

виконувались умови

$$\Delta t_{\text{пр}} \leq \Delta t_{\text{сг}},$$

$$\tau_{\text{в min}} \geq \tau_{\text{min}},$$

де $\Delta t_{\text{пр}}$, $\Delta t_{\text{сг}}$ – розрахунковий і допустимий за санітарно-гігієнічними вимогами температурний перепад між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, °С;

$\tau_{\text{в min}}$ – мінімальне значення температури внутрішньої поверхні в зонах теплопровідних включень в огорожувальній конструкції, °С;

τ_{min} – мінімально допустиме значення температури внутрішньої поверхні, °С.

Температурний перепад $\Delta t_{\text{пр}}$ для огорожувальних конструкцій розраховується в залежності від їх коефіцієнта скління за формулою

$$\Delta t_{\text{пр}} = t_{\text{в}} - \tau_{\text{в пр}},$$

$$\tau_{в пр} = \frac{\sum_i^n \tau_{в i} \cdot F_i}{F_{\Sigma}}$$

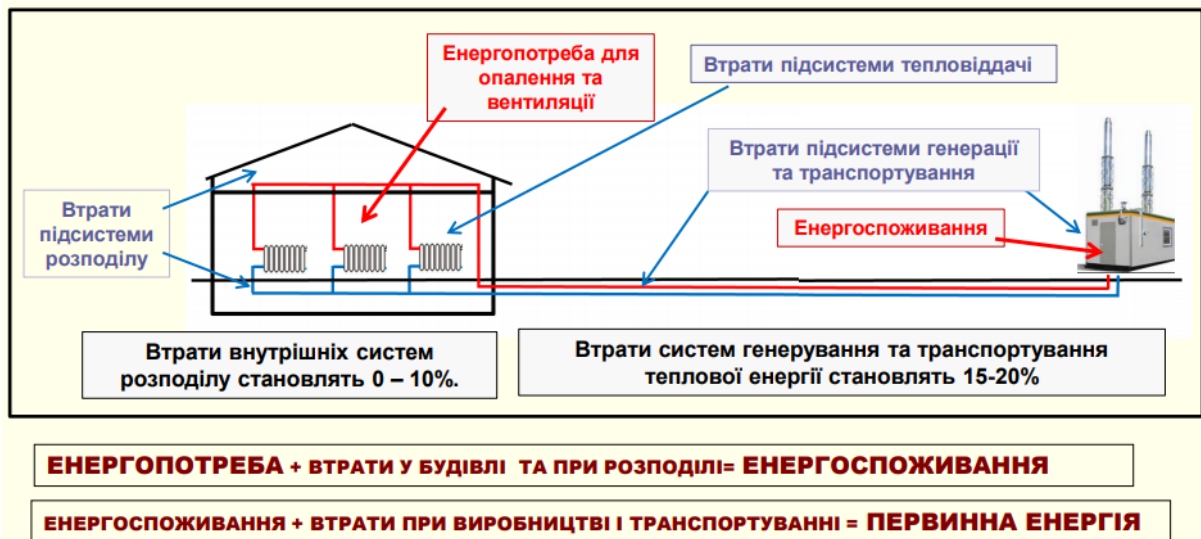
Значення Δt_{cr} наведені у табл. 5 [1]. Наприклад для стін житлових будинків $\Delta t_{cr} = 4^{\circ}\text{C}$

Температура внутрішньої поверхні $\tau_{в min}$ термічно неоднорідної огорожувальної конструкції у зонах теплопровідних включень, у кутах, укосах віконних і дверних прорізів; у зонах стулки, коробки, імпостів, дистанційних рамок світлопрозорих огорожувальних конструкцій визначається на підставі розрахунків двовимірних або тривимірних температурних полів.

Мінімально допустима температура внутрішньої поверхні t_{min} непрозорих огорожувальних конструкцій повинна бути не менше ніж температура точки роси τ_p . Для світлопрозорих конструкції житлових і громадських будинків $\tau_{min} = 6^{\circ}\text{C}$, для виробничих приміщень $\tau_{min} = 0^{\circ}\text{C}$.

ВИМОГИ ДО ПОКАЗНИКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Енергопотреба, Енергоспоживання, Первинна енергія:



Загальний розрахунковий показник енергоефективності (Енергопотреби) EP визначається розрахунком за формулами:

- для житлових будинків

$$EP = (Q_{H,nd} + Q_{C,nd} + Q_{DHW,nd})/A_f,$$

для громадських будівель

$$EP = (Q_{H,nd} + Q_{C,nd} + Q_{DHW,nd})/V_f,$$

де $Q_{H,nd}$, $Q_{C,nd}$, $Q_{DHW,nd}$ – енергопотреба будівлі для опалення, охолодження та гаряча водопостачання, кВт·год, що визначається згідно з

[4] **ДСТУ-Н Б А.2.2-12. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні;**

A_f , V_f – кондиціонована площа для житлової, м², та об'єм для громадської будівлі (або її частини), м³.

Фактичний показник енергоефективності визначається згідно

[5] **ДСТУ Б В.2.2-39:2016. Методи та етапи проведення енергетичного аудиту будівель.**

Загальний показник енергоефективності будівлі EP повинен визначатися за умовою:

$$EP \leq EP_{\max},$$

де EP_{\max} – максимально допустиме значення питомої річної енергопотреби будівлі, кВт·год/м² або кВт·год/м³, що встановлюють згідно з таблицею 1 [1], залежно від призначення будівлі, її поверховості та температурної зони експлуатації. Наприклад, для житлових 1-3 поверхових будинків в I температурній зоні $EP_{\max} = 120$ кВт·год/м².

Встановлюється клас енергетичної ефективності будівлі:

Таблиця 2 – Класифікація будинків за енергетичною ефективністю

Класи енергетичної ефективності будинку за питомою енергопотребою	Різниця в % розрахункового або фактичного значення питомої енергопотреби EP від максимально допустимого значення EP_{\max} , $[(EP - EP_{\max})/EP_{\max}] \cdot 100\%$
A	Мінус 50 та менше
B	Від мінус 49 до мінус 10
C	Від мінус 9 до 0
D	Від 1 до 25
E	Від 26 до 50
F	Від 51 до 75
G	76 та більше