

УДК 536.24 : 697.134

Вплив архітектурних особливостей будівель на теплові втрати з їхніх фасадів

Б. І. Басок¹, Б. В. Давиденко², В. Г. Новіков³, М. П. Новіцька⁴¹ д.т.н., проф., член-кор. НАН України, зав. відділу, Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна, basok@itf.kiev.ua, ORCID:0000-0002-8935-4248² д.т.н., ст. наук. співробітник, гол. наук. співробітник. Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна, bdavydenko@ukr.net, ORCID:0000-0001-8738-7612³ к.т.н., ст. наук. співробітник. Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна, nvg52@i.ua, ORCID:0000-0003-1062-7336⁴ к.т.н., ст. наук. співробітник. Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна, mmarina@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2867-101X

Анотація. У роботі наведено результати чисельного дослідження тепловіддачі з зовнішніх поверхонь окремо розташованих споруд у приземному шарі атмосфери. Схемні моделі споруди мають однакову площу поверхні тепловіддачі, але різні висоту й довжину. CFD-моделювання тепловіддачі споруд у вітровому потоці в тривимірній постановці дозволило встановити деякі особливості тепловіддачі огорожувальних конструкцій залежно від висоти будівлі та характеристик вітрового потоку. Зокрема показано, що середні вздовж поверхні значення густини теплового потоку збільшуються з ростом висоти будівлі. Результати розрахунку середньої густини теплового потоку на поверхні будівель свідчать про її залежність від висоти цієї будівлі. Ця залежність спостерігається лише для будинків заввишки до 30 м. Для більш високих будинків ця залежність незначна. Отримані в результаті моделювання локальні значення коефіцієнтів тепловіддачі на навітряному й завітряному фасадах будівлі свідчать про некоректність застосування в практиці будівництва значення коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_c = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для зовнішніх поверхонь огорожувальних конструкцій. Для навітряних фасадів більш підходить поліноміальна модель для коефіцієнта тепловіддачі, а для завітряних – формула Франка.

Ключові слова: будівля, вітровий потік, коефіцієнт тепловіддачі.

Вступ. Відомо, що основними джерелами тепловтрат є кінцеві споживачі енергії – житлові, громадські та виробничі будівлі. Оцінка ефективності використання теплоти в зазначених об'єктах та їхніх інженерних системах незалежно від їхньої складності ґрунтується на застосуванні теплового балансу, що відображає кількісну сторону теплових процесів.

У тепловому балансі будівель основні тепловтрати відбуваються через огорожувальні конструкції. У деяких випадках тепловтрати, які залежать від конвективної тепловіддачі з поверхонь фасадів будівель, складають до 60% від загальних тепловтрат споруди. Значення конвективної складової теплових потоків на поверхнях фасадів будівель оцінюються на основі різниці температури ΔT , К, між поверхнею будівлі і повітрям, а також за зовнішніми коефіцієнтами тепловіддачі α_c , Вт/(м²·К).

Останні дослідження та публікації. Визначення коефіцієнтів тепловіддачі на зовнішніх фасадах будівель не є простою процедурою. Вони залежать від широкого переліку параметрів [1], серед яких:

- швидкості вітру в приземному шарі атмосфери;
- напрямку вітру відносно орієнтації фасадів (кут атаки вітрового потоку);
- орієнтації поверхонь відносно вітру (наві-

тряна або підвітряна поверхня);

- кута нахилу поверхні відносно площини землі (у крайніх випадках – горизонтальний і вертикальний);
- типу місцевості;
- впливу поруч розташованих будівель;
- текстури поверхні;
- різниці температури поверхні та повітря (ΔT);
- розміру поверхні;
- співвідношення сторін.

У роботах [1, 2] проаналізовано різні емпіричних співвідношення, які належним чином описують залежність конвективного теплового потоку від зазначених факторів. Більшість цих співвідношень входить до складу програмних пакетів моделювання енергетичних характеристик будівель і споруд.

Однак, як показано в [3], наявні формули для зовнішніх коефіцієнтів тепловіддачі огорожувальних конструкцій будівель або не повністю, або взагалі не враховують вплив геометрії будівель. Тому в роботах [3, 4] за допомогою CFD моделювання отримано функції залежності зовнішнього коефіцієнта тепловіддачі від висоти H , м, і довжина будівлі W , м (рис. 1).

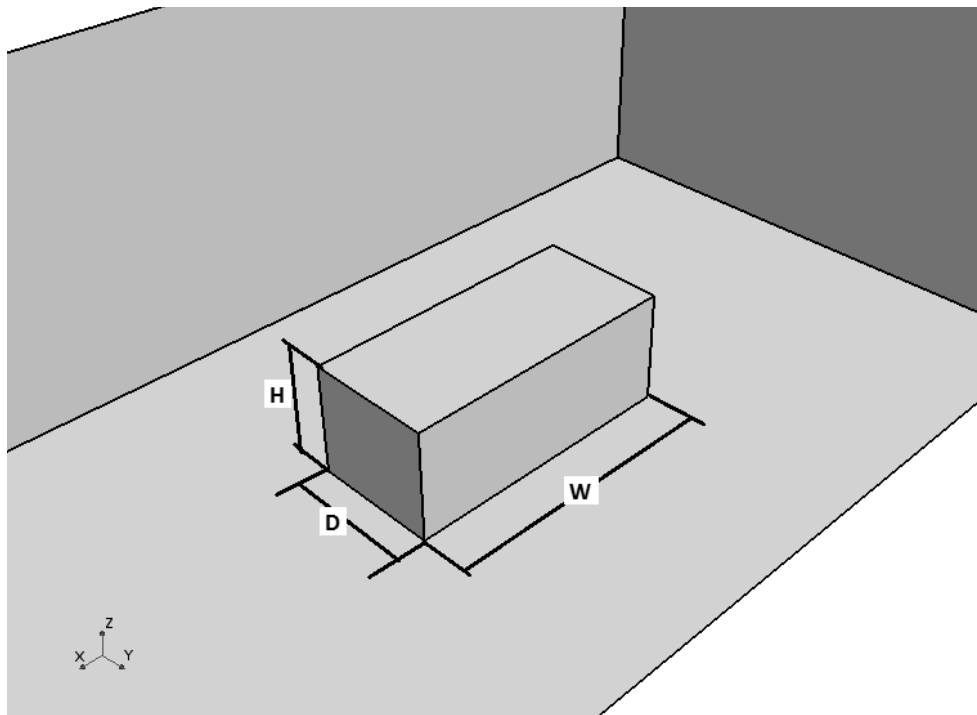


Рис. 1. Геометрична модель будівлі

Останнім часом CFD-моделювання все частіше використовується для прогнозування конвективної теплопередачі на зовнішніх поверхнях будівель [5, 6]. Серед основних переваг CFD-моделювання взаємодії будівлі з вітровим потоком можна виділити його можливості одержання результатів для конкретної будівлі будь-якої конфігурації та отримання даних з високою просторовою роздільною здатністю. Крім того, у зовнішніх атмосферних умовах може бути розглянуто будь-яку швидкість і напрямок вітрового потоку.

У результаті моделювання стає доступною детальна інформація про польові функції вітрового потоку, зокрема

- швидкість, м/с;
- температура, К або °С;
- теплові потоки, Вт, їхня густина Вт/м²;
- тиск, Па
- турбулентні характеристики.

Тому в сучасних умовах при проектуванні нових та реконструкції старих будівель доцільно використовувати CFD-моделювання.

Чисельна модель. У даному дослідженні розглядаються прямокутні будівлі заввишки $H = 10; 16,55; 30$ м, відповідно, завдовжки $W = 60; 40; 20$ м (рис. 1). Всі будівлі мають однакову площу фасадів разом з дахами $S = 2640$ м². Будівлі моделюються тільки контуром (тобто лише оболонкою), який не враховує інші теплофізичні характеристики споруд.

На вході до розрахункової області CFD моделі встановлюються розподіл уздовж вертикальної координати середньої горизонтальної

швидкості вітру U , м/с, (згідно з логарифмічним законом), турбулентної кінетичної енергії k , м²/с², та швидкості турбулентного розсіювання ε , м²/с³, згідно з Річардсом та Хоксі [7].

$$U(z) = \frac{u}{\kappa} \ln \left(\frac{z+z_0}{z_0} \right), \text{ м/с,}$$

$$k(z) = u^2 / \sqrt{C_\mu}, \text{ м}^2/\text{с}^2,$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u^3}{\kappa(z+z_0)},$$

де u – швидкість тертя, м/с; $\kappa = 0,4187$ – постійна Кармана; z – висота над землею, м; z_0 – довжина аеродинамічної шорсткості, м.

Наведені вище формули характеризують нейтральний атмосферний граничний шар, у якому турбулентність не залежить від термічної стратифікації навколишнього повітря. Швидкість тертя пов'язана з характерною швидкістю вітру $U(10)$, м/с, на висоті флюгера $z = 10$ м. У даному випадку вважається, що $U(10) = 5$ м/с. Параметр $z_0 = 1$ м, що відповідає земній поверхні в середині сучасного міста без хмарочосів [8].

Вітер спрямовано перпендикулярно до навітряної поверхні будівель. Температура вітрового потоку на вході до розрахункової області становить мінус 10 °С, тобто використовуються середні температурні умови січня-місяця для клімату м. Києва. На зовнішніх поверхнях будівель задається температура +5 °С, що відповід-

ає граничним умовам першого роду.

Взаємодія окремо розташованої будівлі з турбулентним вітровим потоком у приземному шарі атмосфери в стаціонарній постановці описується усередненою за Рейнольдсом системою рівнянь Нав'є-Стокса, яка замикається рівняннями для кінетичної енергії турбулентності та дисипації кінетичної енергії турбулентності згідно з k - ϵ моделлю турбулентності. Крім того, до загальної системи рівнянь входять рівняння нерозривності, енергії та стану ідеального газу. Чисельне рішення загальної системи рівнянь було виконано за допомогою CFD пакетів StarCCM та ANSYSFluent.

Досліджувалася лише конвективна складова тепловіддачі, а радіаційний теплообмін не брався до уваги. Розрахункові сітки прийнято прямокутні та багатогранні з кількістю елементів від 1600 до 4500 тисяч. Збіжність розв'язку оцінювалася шляхом моніторингу середньої вздовж поверхні густини теплового потоку на поверхні будівлі.

Результати моделювання. У результаті чисельного розв'язання описаної вище задачі отримано всі необхідні польові функції, що використовувалися для оцінки теплових потоків з фасадів будівель. При обробленні результатів було проведено аналіз чутливості, при якому розрахункова сітка зменшувалась у два рази. Цей аналіз показав, що чисельні значення польових функцій відрізняються між собою не більше ніж на 2 %.

Побудовано графіки усередненої за зовнішніми поверхнями будівель густини теплових потоків (рис. 2), Вт/м² в CFD пакетах StarCCM та ANSYSFluent. Розбіжність результатів (2...6 %) можна пояснити різними схемами чисельної апроксимації, кількістю розрахункових елементів, способом розв'язання системи дискретних рівнянь тощо.

Дані рис. 2 свідчать про те, що для будинків заввишки $z < 25...30$ м втрати теплоти з їхніх поверхонь зростають зі збільшенням висоти будинку. Для будинків заввишки понад $z = 25...30$ м втрати теплоти крізь огорожувальні конструкції за рахунок конвективної складової теплового потоку припиняють зростати зі збільшенням їхньої висоти.

Слід зазначити, що наведені результати тільки якісно описують залежність тепловтрат з поверхні будівлі від її висоти, тому що на поверхні будівлі задані довільні постійні значення температури. Більш точні значення цих величин можуть бути одержані при спряженій постановці задачі, коли температурні умови задаються всередині будівлі і при розв'язанні задачі враховується перенесення теплоти через

її огорожувальні конструкції.

Водночас, навіть при розглянутій спрощеній постановці задачі, при якій постійне значення температури задається на зовнішній поверхні огорож, одержані розподіли коефіцієнтів тепловіддачі будуть близькими к дійсним. Мабуть внаслідок цього значна кількість досліджень, зокрема ті, що представлені в роботах [3-6], мають на меті оцінити значення саме коефіцієнтів тепловіддачі на зовнішній поверхні. Тому отримані в даній роботі результати по визначенню коефіцієнтів тепловіддачі доцільно порівняти з результатами інших авторів.

Як свідчать результати на рис. 3, залежність локальних значень коефіцієнта тепловіддачі від висоти будівель для навітряних фасадів мають подібний характер. Інтервал зміни чисельних значень теж майже однаковий: від $\alpha_k = 3...5$ Вт/(м²·К) (біля поверхні ґрунту) до $\alpha_k = 63...64$ Вт/(м²·К) (в області відриву потоку у верхній кромці фасаду). Теж саме стосується й коефіцієнтів тепловіддачі і на завітряних фасадах.

Для порівняння значення коефіцієнта тепловіддачі також розраховано за відомими емпіричними залежностями від швидкості вітру на висоті флюгера $U(10)$, м/с, яка у даному випадку становить 5 м/с. До речі, формула Франка [9] дає значення $\alpha_k = 21,1$ Вт/(м²·К), яке лише на 8 % відрізняється від рекомендованих в [10] значень коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_k = 23$ Вт/(м²·К) для зовнішніх поверхонь огорожувальних конструкцій для будівель та споруд. Жодна з формул не забезпечує універсального опису тепловіддачі розглянутої споруди при різних геометричних розмірах. Однак для більшості випадків для навітряних фасадів кращий аналітичний опис забезпечує поліноміальна модель, а для завітряних – формула Франка.

Висновки. Результати розрахунку середньої густини теплового потоку на поверхні будівель свідчать про її залежність від висоти будівлі, тобто від її архітектурних особливостей. Ця залежність спостерігається лише для будинків заввишки до 25...30 м. Для більшої висоти ця залежність стає незначною. Отримані локальні значення коефіцієнта тепловіддачі на навітряному та завітряному фасадах будівлі свідчать про некоректність застосування в практиці будівництва значення $\alpha_k = 23$ Вт/(м²·К) для зовнішніх поверхонь огорожувальних конструкцій. Зокрема для навітряних фасадів більш підходить поліноміальна модель коефіцієнта тепловіддачі, а для завітряних – формула Франка.

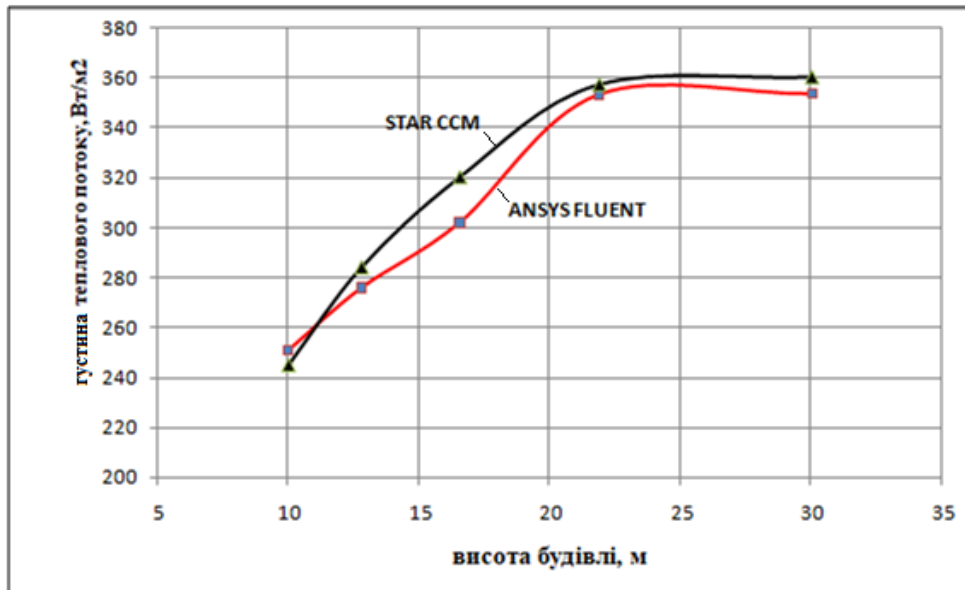


Рис. 2. Значення середньої густини теплових потоків на поверхні огорожувальних конструкцій в залежності від висоти будівлі

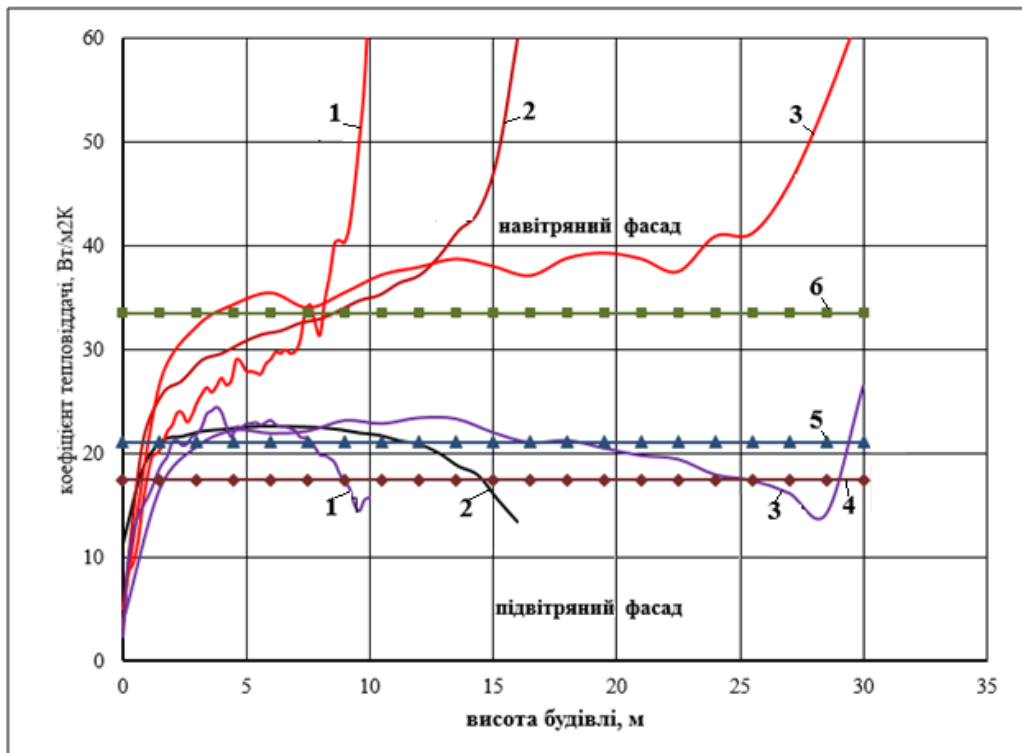


Рис. 3. Локальні значення коефіцієнтів тепловіддачі по середнім лініям фасадів: 1 – висота будівлі $H = 10$ м; 2 – $H = 16$ м; 3 – $H = 30$ м; 4 – дані [4]; 5 – формула Франка [9]; 6 – поліноміальна модель [1]

Література

1. Mirsadeghi M. Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: implementation and uncertainty / M. Mirsadeghi, D. Cóstola, B. Blocken, J.L.M. Hensen // Applied Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 56. – Iss. 1–2. – P. 134-151. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.03.003G>
2. Palyvos J.A. A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems modeling / J.A. Palyvos // Applied Thermal Engineering. – 2008. – Vol. 28. – Iss. 8–9. – P. 801-808. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.005>
3. Iousef S. Impact of exterior convective heat transfer coefficient models on the energy demand prediction of buildings with different geometry / S. Iousef, H. Montazeri, B. Blocken, P. Wesemael // Building Simulation. – 2019. – Vol. 12. – P. 797–816. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0531-7>
4. Montazeri H. CFD analysis of forced convective heat transfer coefficients at windward building facades:

Influence of building geometry / H. Montazeri, B. Blocken, D. Derome, J. Carmeliet, J.L.M. Hensen // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2015. – Vol. 146. – P. 102-116. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.07.007>

5. Emmel M.G. New external convective heat transfer coefficient correlations for isolated low-rise buildings / M.G. Emmel, M.O. Abadie, N. Mendes // *Energy and Buildings*. – 2007. – Vol. 39. – Iss. 3. – P. 335-342. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.08.001>

6. Defraeye T. CFD analysis of convective heat transfer at the surfaces of a cube immersed in a turbulent boundary layer / T. Defraeye, B. Blocken, J. Carmeliet // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2010. – Vol. 53. – Iss. 1-3. – P. 297-308. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.029>

7. Richards P.J. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-ε turbulence model / P.J. Richards, R.P. Hoxey // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 1993. – Vol. 46-47. – P. 145-153. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(93\)90124-7](https://doi.org/10.1016/0167-6105(93)90124-7)

8. Wieringa J. Updating the Davenport roughness classification / J. Wieringa // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 1992. – Vol. 41. – Iss. 1-3. – P. 357-368. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90434-C](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90434-C)

9. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин. – Москва «АВОК-ПРЕСС», 2006. – 252 с.

10. ДБН В.2.6-31:2016. Теплоизоляция будівель. – Чинні від 01.04.2017. – Київ: Укрархбудінформ, 2017. – 37 с.

References

1. Mirsadeghi M., Cóstola D., Blocken B., Hensen J.L.M. «Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: implementation and uncertainty». *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 56. Iss. 1–2. P. 134-151. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.03.003G>

2. Palyvos J.A., «A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling». *Applied Thermal Engineering*. 2008. Vol. 28. Iss. 8–9. P. 801-808. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.005>

3. Iousef S., Montazeri H., Blocken B., Wesemael P. «Impact of exterior convective heat transfer coefficient models on the energy demand prediction of buildings with different geometry». *Building Simulation*. 2019. Vol. 12. P. 797–816. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0531-7>

4. Montazeri H., Blocken B., Derome D., Carmeliet J., Hensen J.L.M. «CFD analysis of forced convective heat transfer coefficients at windward building facades: Influence of building geometry». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2015. Vol. 146. P. 102-116. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.07.007>

5. Emmel M.G., Abadie M.O., Mendes N. «New external convective heat transfer coefficient correlations for isolated low-rise buildings». *Energy and Buildings*. 2007. Vol. 39. Iss. 3. P. 335-342. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.08.001>

6. Defraeye T., Blocken B., Carmeliet J. «CFD analysis of convective heat transfer at the surfaces of a cube immersed in a turbulent boundary layer». *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. Vol. 53. Iss. 1-3. P. 297-308. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.029>

7. Richards P.J., Hoxey R.P. «Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-ε turbulence model». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1993. Vol. 46-47. P. 145-153. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(93\)90124-7](https://doi.org/10.1016/0167-6105(93)90124-7)

8. Wieringa J. «Updating the Davenport roughness classification». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1992. Vol. 41. Iss. 1-3. P. 357-368. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90434-C](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90434-C)

9. Фокин К. Ф. *Строительная теплотехника ограждающих частей зданий*. «АВОК-ПРЕСС» 2006.

10. *Теплоизоляция будівель*. ДБН В.2.6-31:2016, Укрархбудінформ, 2017.

УДК 536.24 : 697.134

Влияние архитектурных особенностей зданий на тепловые потери с их фасадов

Б.И. Басок¹, Б. В. Давыденко², В. Г. Новиков³, М. П. Новицкая⁴

¹ д.т.н., проф., член-кор. НАН Украины, зав. отделом, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина, basok@ittf.kiev.ua, ORCID:0000-0002-8935-4248

² д.т.н., ст. наук. сотрудник, гл. науч. сотрудник, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина, bdavydenko@ukr.net, ORCID:0000-0001-8738-7612

³ к.т.н., ст. наук. сотрудник, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина, nvg52@i.ua, ORCID:0000-0003-1062-7336

⁴ к.т.н., ст. наук. сотрудник, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина mmarina@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2867-101X

Аннотация. В работе представлены результаты численного исследования теплоотдачи с наружных поверхностей отдельно стоящих сооружений в приземном слое атмосферы. Схемные модели сооружения имеют одинаковую площадь поверхности теплоотдачи, но разные высоты и длины. CFD-моделирование теплоотдачи сооружений в ветровом потоке в трёхмерной постановке позволило установить некоторые особенности теплоотдачи ограждающих конструкций в зависимости от высоты строения и характеристик ветрового потока. В частности, показано, что среднее по поверхности значение плотности теплового потока увеличивается с ростом высоты здания. Результаты расчёта средней плотности теплового потока на поверхности зданий свидетельствуют о ее зависимости от высоты этого здания. Эта зависимость наблюдается только для зданий с высотой менее 30 м. Для более высоких зданий эта зависимость незначительна. Полученные в результате моделирования локальные значения коэффициентов теплоотдачи на наветренном и подветренном фасадах строения свидетельствуют о некорректности применения в практике строительства значения коэффициента теплоотдачи $\alpha_k = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для наружных поверхностей ограждающих конструкций. Для наветренных фасадов более подходит полиномиальная модель для коэффициента теплоотдачи, а для подветренных – формула Франко для α_k .

Ключевые слова: здание, ветровой поток, коэффициент теплоотдачи .

UDC 536.24 : 697.134

Influence of architectural features of buildings on heat losses from their facades

B. Basok¹, B. Davydenko², V. Novikov³, M. Novitska⁴

¹ Sc.D, professor, Corresponding member NAS of Ukraine, Head of Department, Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, basok@ittf.kiev.ua, ORCID:0000-0002-8935-4248

² Sc.D, Senior Researcher, Chief Researcher, Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, bdavydenko@ukr.net, ORCID:0000-0001-8738-7612

³ PhD, Senior Researcher, Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, nvg52@i.ua, ORCID: 0000- 0003-1062-7336

⁴ PhD, Senior Researcher, Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, mmarina@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2867-101X

Abstract. In the heat balance of buildings, the main heat loss occurs through enclosing structures. Determining the heat transfer coefficients on the exterior facades of buildings is not an easy procedure, as they depend on a wide range of parameters: wind speed in the surface atmosphere, wind direction relative to the orientation of facades, surface orientation relative to wind, surface angle relative to the ground plane, type terrain, the impact of adjacent buildings, surface texture, surface and air temperature differences, surface size and aspect ratio, etc. The paper presents the results of a numerical study of heat transfer from the outer surfaces of separately located structures in the surface layer of the atmosphere. Schematic models of the building have the same heat transfer surface area, but different heights and lengths. CFD-modeling of heat transfer of buildings in the wind flow in a three-dimensional setting allowed to establish some features of heat transfer of enclosing structures depending on the height of the building and the characteristics of the wind flow. In particular, it is shown that the average surface values of heat flux density increase with increasing building height. The results of the calculation of the average heat flux density on the surface of buildings indicate its dependence on the height of this building. This dependence is observed only for houses with a height of less than 30 m. For taller houses, this dependence is insignificant. The local values of heat transfer coefficients on the windward and leeward facades of the building obtained as a result of modeling indicate incorrect application of heat transfer coefficient values $\alpha_k = 23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ for construction practice for external surfaces of enclosing structures. For windward facades, a polynomial model for the heat transfer coefficient is more suitable, and for leeward ones, the Frank formula for α_k .

Keywords: building, wind flow, heat transfer coefficient.

Надійшла до редакції / Received 05.04.2021