

УДК 536.24 : 536.33 : 697.27

АНАЛІЗ ОПАЛЮВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ВІКОН З ЕЛЕКТРОПІДІГРІВОМ

Круковський П.Г., доктор технічних наук, Смольченко Д.А., Круковський Г.П., Дейнеко А.І.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст., 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2021.7>

Наведені результати моделювання опалювальної здатності вікон з електропідігрівом для вибраного приміщення в залежності від відносної площі скління до загальної площі зовнішньої огорожувальної конструкції та температури навколишнього середовища за умови не перевищення максимального тепловиділення (450 Вт/м^2) і температури (60°C) на внутрішньому склі двокамерного склопакету.

Приведены результаты моделирования отопительной способности окна с электроподогревом для выбранного помещения в зависимости от относительной площади остекления к общей площади внешней ограждающей конструкции и температуры внешней среды с условием не превышения максимального тепловыделения (450 Вт/м^2) и температуры (60°C) на внутреннем стекле двухкамерного стеклопакета.

The results of modeling the heating ability of the window with electrically heated for the selected room, depending on the relative area of the glazing to the total area of the outer enclosure and ambient temperature provided that the maximum heat dissipation (450 Wt/m^2) and temperature (60°C) on the inner glass of the double-glazed window is not exceeded.

Бібл. 8, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: опалення приміщень, вікно з електропідігрівом, опалювальна здатність, теплообмін з приміщенням, моделювання.

E – радіаційний тепловий потік, Вт/м^2 ;
 P – питомий тепловиділення на склі вікна, Вт/м^2 ;
 N – площа скління, м^2 ;
 M – площа огорожувальної конструкції, м^2 ;
 t – температура, $^\circ\text{C}$;
 α – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$;
 ε – коефіцієнт емісії.

Нижні індекси:

прим – приміщення;
 нс – навколишнє середовище;
 мп – міжскляний простір;
 1...6 – номер поверхні скла.

Для зменшення тепловтрат через віконні конструкції приміщень шляхом теплопровідності зазвичай збільшують кількість камер, що дає незначний ефект, так як основними тепловтратами через віконні конструкції є втрати шляхом випромінювання. Зменшення цих тепловтрат досягається шляхом нанесення на скло тонкої низькоемісійної плівки оксиду металу, яка забезпечує безперешкодне проходження в приміщення короткохвильового сонячного випромінювання і перешкоджає виходу довгохвильового теплового випромінювання назовні. Такі вікна з низькоемісійною плівкою використовуються, однак найкращі з них не вирішують проблеми зниження тепловтрат через віконні конструкції та отримання зони комфорту біля вікна. У зв'язку з цим розроблені склопакети з електропідігрівом у вигляді нанесеної на скло електропровідної плівки, яка нагрівається при пропусканні через неї електричного струму. Дослідження таких склопакетів поча-

лося з роботи [1], де автори надали поняття ККД таких вікон та оцінили їх термічний опір, а у роботі [2] вони прийшли до висновку що ефективність вікон з електропідігрівачем залежить від їх термічного опору. В роботі [3] були досліджені експериментальна та розрахункова моделі при питомому тепловиділенні плівки на склі $P = 240 \text{ Вт/м}^2$ та при незмінній площі скління. В роботі [4] і їй подібних досліджувались вікна з електропідігрівом тільки як додаткова система опалення при тепловиділенні $P = 200...300 \text{ Вт/м}^2$ і не розглядалися як єдина система опалення типових житлових приміщень.

1. Скло з електропідігрівом та аналіз його характеристик

Структура однокамерного склопакета з електропідігрівом представлена на рис. 1. В якості нагрівача скла з електропідігрівом виступає прозоре електропровідне покриття, нанесене на скло, яке в свою

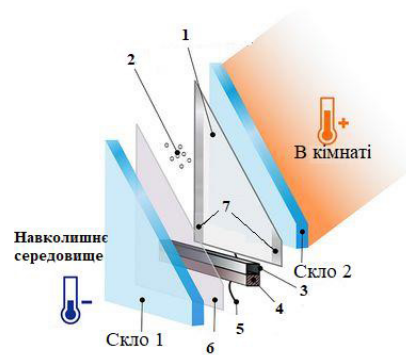


Рис. 1. Структура однокамерного склопакету з електронідегрівом:
1 – нагрівальне низькоемісійне покриття; 2 – наповнювач у міжскляному просторі (повітря, аргон, ксенон тощо); 3 – спейсер (визначає відстань між склом); 4 – герметик; 5 – кабель для підводу електроенергії; 6 – низькоемісійне покриття; 7 – електроди

чергу є сіткою провідних електродів, що наноситься за допомогою методу шовкографії з використанням срібної пасти.

В останні роки з'явилися плівки на основі $\text{In}_2\text{O}_3(\text{Sn})$, які дозволяють підняти рівень тепловиділення R на склі до 450 Вт/м^2 [5], якість та енергозабезпечення таких вікон практично не знижують коефіцієнт світлопрозорості скла [6]. Завдяки цьому з'явилась можливість використовувати вікна з електронідегрівом як єдиної системи опалення типових житлових приміщень, дослідження якої є актуальною задачею.

Для аналізу цієї задачі фактично треба досліджувати опалювальну здатність вікон з електронідегрівом як єдиної системи опалення, що і є метою цієї роботи.

Для цього сформулюємо визначення опалювальної здатності вікон з електронідегрівом, як спроможності такої системи опалення підтримувати комфортну температуру в приміщенні 20°C в діапазоні температур навколишнього середовища від -25°C до 10°C за умови не перевищення температури на внутрішній поверхні вікна 60°C .

Результати дослідження опалювальної здатності дозволять проектувати як нові будівлі з системою опалювання лише такими склопакетами, так і заміну старих вікон і склопакетів на опалювальні.

Методикою розрахунку здатності опалення вікнами з електронідегрівом було обране комп'ютерне моделювання через його переваги, а саме:

- можливості легкої зміни необхідних геометричних та теплофізичних параметрів приміщень і матеріалів;

- наглядного аналізу розподілу температур і теплових потоків;

- відсутності необхідності затратного фізичного експерименту для варіантних досліджень, який може бути проведений лише для верифікації моделі.

2. Розробка моделі

Модель розраховує енергетичний баланс, температури і теплові потоки на кожній поверхні як скління, так і поверхні кімнати. На рис. 2 наведено розрахункову схему приміщення з вікном, повітрям в приміщенні і стінами.

Фізична модель теплового стану приміщення з вікном наступна. Теплота виділяється в низькоемісійному покритті на поверхні 2. Поверхня 3 середнього скла теж покрита низькоемісійним покриттям, але без ідегріву. В бік приміщення теплота від поверхні 2 передається шляхом теплопровідності через скло на поверхню 1 і далі – вільною конвекцією в повітря і випромінюванням на стіни приміщення. Випромінювання в зворотному напрямку від приміщення назовні відбивається на 84% назад до приміщення низькоемісійним покриттям на поверхні 2.

Так само і в бік вулиці – теплота, яка виділяється на поверхні 2, відбивається від низькоемісійного покриття на поверхні 3, і прямує до кімнати. Втрати в сторону зовнішнього середовища відбуваються за рахунок теплопровідності через два скла і два простори між ними від теплої поверхні 2 до поверхні 6 і далі конвекцією і випромінюванням в навколишнє середовище. Ці втрати є незначними, оскільки у міжскляному просторі товщиною 10...15 мм конвекція відсутня, а

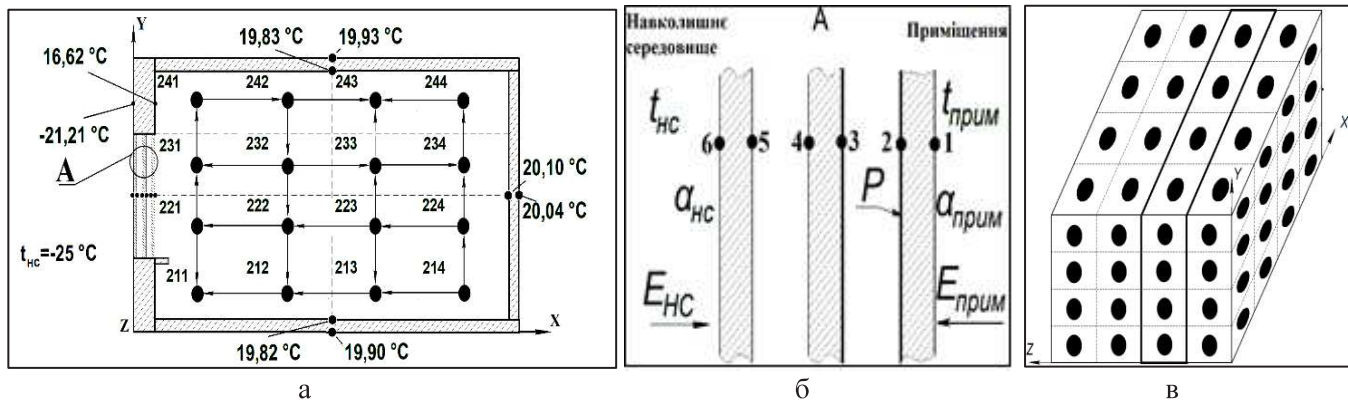


Рис. 2. Розрахункова схема приміщення з вікном, повітрям і стінами (а), вікна з двокамерним склопакетом з електронідогрівом (б) і об'ємом повітря в кімнаті (в). Точками вказані розрахункові вузли з відповідними номерами, цифрами – значення температур на стінах приміщення температури оточуючого середовища -25°C

теплопровідність повітря, аргону або ксенону є досить малими: для повітря 0,0243, аргону 0,0177, а ксенону 0,0057 Вт/м·К.

Геометричні розміри приміщення: висота 2,5 м, ширина 4 м, довжина 4 м, товщина зовнішньої огорожувальної конструкції 0,5 м, товщина внутрішньої охолоджуючої конструкції 0,2 м. Матеріалом огорожувальних конструкцій обрана цегла з теплопровідністю 1 Вт/м², зовнішня конструкція завдяки утепленню має ефективну теплопровідність 0,15 Вт/(м К), що відповідає сучасній нормі термічного опору 3,3 (м² К)/Вт для зони І. Також враховується, що кімната у будівлі не є крайньою, тобто з навколишнім середовищем контактує лише стіна з вікном. Температура у кімнатах, які контактують зі стінами досліджуваного приміщення, була прийнята рівною 20°C . Вентиляція у приміщенні налагоджена таким чином, щоб за годину третина об'єму приміщення (40 м³) повітря поновлювалось. Вплив сонячного випромінювання не враховувався.

Модель була реалізована в середовищі програми Flownex SE. (Flownex Simulation Environment) [7], – програмне забезпечення, якого використовує чисельне моделювання за методами зосереджених параметрів для аналізу, проектування та оптимізації гідравлічних та теплообмінних систем.

Розрахункова модель реалізована як у 2D так і у 3D стаціонарних постановках. У форматі 2D реалізована віконна конструкція по товщині зі зв'язком склопакету з приміщенням, саме ж приміщення реалізоване у 3D форматі. 3D формат приміщення представлений за допомогою 64 вузлів, розбитих на 4 шари по висоті (рис. 2,в). Кожна стіна у кімнаті контактує з 16-тю

об'ємами повітря, окрім віконної конструкції яка контактує з 12-тю, тому що 4 середніх вузла контактують з електрообігрівуючим склом. Кожен вузол являє собою певний об'єм повітря у приміщенні, який контактує з поверхнями стін в кімнаті елементом конвекції, в кожному з яких розраховується нелінійний коефіцієнт тепловіддачі за формулою Богословського [8] (1).

$$\alpha_k = C \cdot (t_4 - t_{прим})^{0,3}, \quad (1)$$

де $C = 1,66$ для вертикальних поверхонь, $C = 1,16$ для підлоги і $C = 2,26$ для стелі приміщення.

Також враховується випромінювання як від вікна до кожної поверхні у кімнаті, так і випромінювання між поверхнями кімнати.

Математична модель складається з балансних рівнянь для кожного з вузлів вікна, поверхонь і повітря приміщення, які враховують фізичні процеси кондуктивного, конвективного і променевого теплообміну окремо чи в сукупності між собою та масообмін повітря між вузлами в об'ємі приміщення.

Змінними факторами у моделі є t_{nc} та P . В нашому випадку в залежності від значення t_{nc} модель знаходила таке значення P , щоб температура у приміщенні дорівнювала у 20°C .

На рис. 2,б представлені пробні результати моделювання у вигляді температур на стінах кімнати та на огорожувальних конструкціях при тепловиділенні на склі 175 Вт/м² на площі 5 м² і зовнішньої температури -25°C . Температури на поверхнях склопакету на рис. 1,а з номерами від 1 до 6 представлені також в таблиці 1.

Таблиця 1. Температури на поверхнях склопакету (рис. 2,б)

Номер поверхні	1	2	3	4	5	6
Температура, °C	31,9	33,05	15,47	14,90	0,85	-23,80

3. Верифікація моделі

Верифікація моделі проводилася шляхом порівняння експериментальних даних, отриманих при випробуванні однокамерного склопакету в кліматичній камері і представлених в [3], з даними, отриманими на моделі.

Результати порівняння представлені в табл. 1. Тепловиділення на склі дорівнює $P = 245 \text{ Вт/м}^2$, температура в приміщенні 25 °C . Було обрано 4 значення температури навколишнього середовища, наведених в табл. 2 [3]. В ній для цих значень температури навколишнього середовища представлені значення розрахункових і експериментальних температур в точці 1 (рис. 2,б, зовнішнє скло з точками 5 і 6 відсутнє), для для $t_{nc} = 5, t_4 = 44,3$; для $t_{nc} = -5, t_4 = 42$; для $t_{nc} = -15, t_4 = 40$; для $t_{nc} = -25, t_4 = 37$;

Табл. 2. Порівняння результатів моделі з експериментом

Параметр	Моделі	Експеримент [3]
t_{nc}	5	5
t_4	44,8	44,3
t_{nc}	-5	-5
t_4	42	42
t_{nc}	-15	-15
t_4	39,5	40
t_{nc}	-25	-25
t_4	36,5	37

З таблиці видно що найбільша різниця складає 1 °C , що показує достатню адекватність моделі і дозволяє використовувати її у подальших дослідженнях.

4. Результати дослідження

Щоб оцінити опалювальну здатність таких вікон були досліджені 4 площі скління від 2 до 5 м^2 , які входять в загальну площу зовнішньої огорожувальної конструкції 10 м^2 для приміщення, в якості якого була обрана кімната типової квартири висотою у 2,5 м і шириною та довжиною 4 м.

Була отримана залежність тепловиділення P (Вт/м^2) від температури навколишнього середовища за умови, що температура в приміщенні складатиме 20 °C (рис.3).

Саме така залежність відповідає на питання чи достатньо певної віконної конструкції з електропідігрівом для опалення певного приміщення при максимальному тепловиділенні на такому склі не більше 450 Вт/м^2 для різних співвідношень площі вікна N до площі непрозорої зовнішньої огорожувальної конструкції M (рис. 3).

Як видно з рис. 3, опалювальної здатності вікна з підігрівом достатньо для підтримання комфортних умов 20°C для всіх відношень площі вікна N до площі огорожувальної конструкції M при тепловиділеннях, які не перевищують максимальне значення 450 Вт/м^2 .

Також необхідно дослідити, яку температуру буде мати скло зі сторони приміщення при різних тепловиділеннях і чи не перевищує значення 60 °C .

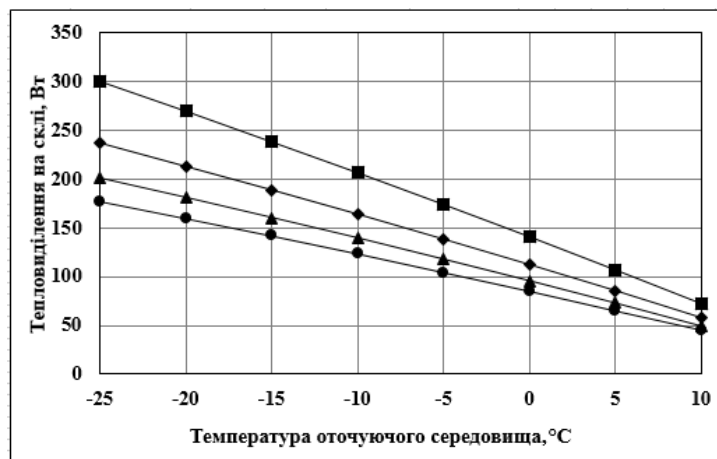


Рис. 3. Залежність тепловиділення P (кВт/м^2) від зміни температури навколишнього середовища t ($^{\circ}\text{C}$) при підтриманні температури у кімнаті на рівні 20 °C

■ – $N/M=2/8$; ♦ – $N/M=3/7$; ▲ – $N/M=4/6$; ● – $N/M=5/5$

На рис. 4 також показана залежність температури на поверхні скла від температури оточуючого середовища для різних відносин площі вікна N до площі непрозорої зовнішньої огорожувальної конструкції M . Результати показують, що для всіх відношень площ i при всіх тепловиділеннях максимальне значення $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ не перевищується, що також підтверджує достатню опалювальну здатність вікон з підігрівом.

5. Висновки

При дослідженні шляхом моделювання опалювальної здатності вікон з електропідігрівом була розроблена модель, яка дозволила розраховувати опалювальну здатність таких вікон для будь яких приміщень для довільних змін геометричних та теплофізичних параметрів приміщення, а також здатності до оптимізації експлуатаційних характеристик. Модель була верифікована шляхом порівняння з результатами фізичного експерименту.

Робота показала, що опалювальної здатності вікна з підігрівом достатньо для підтримання комфортних умов $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ при зовнішніх температурах до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ для всіх відношень площі вікна N до площі зовнішньої огорожувальної конструкції M при тепловиділеннях, що не перевищують максимальне значення 450 Вт/м^2 та температури на склі $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такий позитивний висновок одержано для сучасних приміщень з термічним опором зовнішньої огорожувальної конструкції на рівні $2\dots 3,3\text{ (м}^2\text{ К)/Вт}$ і може бути негативним для будівель з меншими термічними опорами зовнішньої огорожувальної конструкції.

Такі вікна, незважаючи на більшу вартість в порівнянні зі звичайними вікнами, є перспективним рішенням для опалення приміщення за ряд його переваг,

а саме: відсутності старих контурів системи опалення, які займали місце у приміщеннях, появи зони комфорту біля вікна, відсутності запотівання та обледеніння вікон, рівномірності температури у приміщенні.

ЛІТЕРАТУРА

1. *J Kurnitski*. Efficiency of electrically heated windows. International Conference: Indoor Air Quality and Climate. Held in Monterey. California. June 30-July 5. 2002.

2. *Jarek Kurnitski, Juha Jokisalo, Jari Palonen, Kai Jokiranta, Olli Seppänen*. Efficiency of electrically heated windows. Energy and Buildings. 2004. Vol. 36, №. 10. P.1003-1010

3. *Alain Moreau, Simon Sansregret, Michael Fournier*. Modeling and Study of the Impacts of Electrically Heated Windows on the Energy Needs of Buildings. Conference: WSEAS International Conference on heat transfer, thermal engineering and environment. At Rhodes. Greece. August 2008.

4. *Alain Moreau, Manuelle Coullin, Guillaume Delamarre, François Laurencelle*. Simulation et validation expérimentale d'un modèle de fenêtre chauffante. Conference: Colloque International Francophone d'Énergétique et Mécanique. At Comores. May. 2014.

5. *Electrically Heated glass*. Finnglass: веб-сайт URL: <https://www.finnglass.com/products/electrically-heated-glass> (дата звернення: 09.01.2020).

6. *Хомченко А.В.* Исследование свойств электрообогреваемых стеклопакетов. Вестник Белорусско-Российского университета. 2016. №3. С. 152-157.

7. *Flownex simulation environment*: веб-сайт URL: <https://www.flownex.com/> (дата звернення: 13.01.2020).

8. *Богословский В.Н.* Теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Строительная теплофизика. 1982. №2.

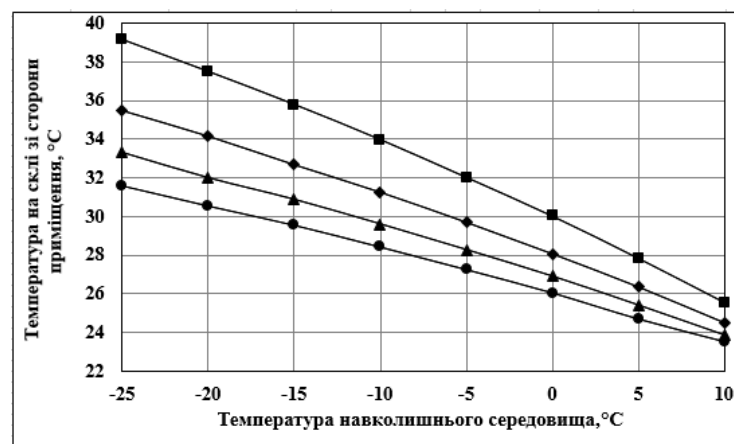


Рис. 4. Температура на поверхні вікна 1 від зміни температури оточуючого середовища та площі скління при досягненні у кімнаті температури: ■ – $N/M=2/8$; ◆ – $N/M=3/7$; ▲ – $N/M=4/6$; ● – $N/M=5/5$

ANALYSIS OF THE HEATING CAPACITY OF
ELECTRICALLY HEATED WINDOWSKrukovskiy P.G., Smolchenko D.A., Krukovskiy G.P.,
Deineko A.I.*Institute of Engineering Thermophysics of the National
Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str.,
Kyiv, 036057, Ukraine*<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.7>

Electric window heating has been used for some time in Europe and the Americas, but in Ukraine it only enters the market as an independent heating device and raises the question of its heating capacity in winter and the benefits of using them. There are several works in this field that determine the efficiency and contribution to the energy needs of an electric-heated window house, but it is necessary to answer more specifically the question of the heating capacity of such windows as a single heating system, for example rooms of certain sizes. In the work present the design, thermophysical processes occurring in such windows and, by computer simulation of the thermal state of the window with the selected typical room, the results of the study of the heating capacity of the windows, depending on the relative glazing area to the total area of the outer enclosure and the ambient temperature conditions not exceeding the maximum heat emission 450 Wt/m^2 and temperature $45 \text{ }^\circ\text{C}$ on the inner glass of the double-glazed window. the presented thermal model of the window with the room is implemented as a computer program with the possibility of a detailed analysis of the heating capacity of the window, depending on the parameters of the room and the outside temperature, as well as optimization of operational parameters to maintain comfortable conditions.

References 9, tables 3, figures 4.

Keywords: electrically heated window, heating capacity, energy efficiency, room heat exchange, modeling, low emission flooring, room heating.

1. *J Kurnitski*. Efficiency of electrically heated windows. International Conference: Indoor Air Quality and Climate. Held in Monterey. California. June 30-July 5. 2002.

2. *Jarek Kurnitski, Juha Jokisalo, Jari Palonen, Kai Jokiranta, Olli Seppänen*. Efficiency of electrically heated windows. Energy and Buildings. 2004. Vol. 36, №. 10. P.1003-1010

3. *Alain Moreau, Simon Sansregret, Michael Fournier*. Modeling and Study of the Impacts of Electrically Heated Windows on the Energy Needs of Buildings. Conference: WSEAS International Conference on heat transfer, thermal engineering and environment. At Rhodes. Greece. August 2008.

4. *Alain Moreau, Manuelle Coullin, Guillaume Delamarre, François Laurencelle*. Simulation et validation expérimentale d'un modèle de fenêtre chauffante. Conference: Colloque International Francophone d'Énergétique et Mécanique. At Comores. May. 2014.

5. *Electrically Heated glass*. Finnglass: web site URL: <https://www.finnglass.com/products/electrically-heated-glass> (date of appeal: 09.01.2020).

6. *Xomchenko A.V.* Issledovanie svojstv elektroobogrevaemyh steklopaketov [The study of the properties of electric double-glazed windows]. Vestnik Belrusko-Rosijskogo universiteta [Bulletin of the Belarusian-Russian University]. 2016. №3. С. 152-157. (Rus.)

7. *Flownex simulation* environment: web site URL: <https://www.flownex.com/> (date of appeal: 13.01.2020).

8. *Bohoslovskiy V.N.* Teplofizicheskie osnovy otopleniya, ventilyacii i kondicionirovaniâ vozduha [Thermophysical basics of heating, ventilation and air conditioning]. Stroitel'naya teplofizika [Building Thermophysics]. 1982. №2. (Rus.).

Отримано 31.08.2021

Received 31.08.2021