

Methodology for Determining Heat Losses through Translucent Construction

Malyarenko V.¹, Alyokhina S.², Orlova N.³

¹O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine

²University of Applied Sciences Technikum Wien, Vienna, Austria,

³Anatoly Pidhorny Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

Abstract. The purpose of this work is to determine the heat transfer coefficient of translucent fences, considering the number of storeys of buildings, climatic factors, such as wind velocity and outdoor temperature. To achieve this goal, the following tasks were solved: analysis of heat transfer in translucent enclosures as a quasi-stationary process; analysis of heat transfer processes in translucent barriers, which are a combination of solid transparent plates and air gaps connected by a frame structure; determination of the heat transfer coefficient on the glass surface depending on climatic factors and the radiant component. The most important result is the empirical dependence of the heat transfer coefficient on the outer surface of the window block on the Reynolds criterion, the dependences for determining the heat transfer coefficient of window blocks are improved, considering climatic parameters. The heat transfer coefficient of the window block as a whole is presented in the form of analytical ratios, considering the location of the building and its height, changes in wind velocity and outdoor temperature. This methodology was tested on the example of a civil administrative building, for which the heat transfer coefficients of window structures of non-standard series were evaluated. The significance of the research results lies in the possibility of using the obtained dependencies to assess the thermal characteristics of window structures of non-standard shapes. The dependences of the heat transfer coefficient on wind speed and outside air temperature given in the paper can be used in the energy audit of buildings.

Keywords: heat losses, heat transfer coefficient, Nusselt number, Grashof number, window, wind, external disturbances.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.08>

UDC: 692.82.

Metodologie de determinare a pierderilor de căldură prin structuri de construcție translucide

Malyarenko V.¹, Alyokhina S.², Orlova N.³

¹ Universitatea Națională de Economie Municipală din Harkov, numită după UN. Beketova, Harkov, Ucraina

² Universitatea de Științe Aplicate Technikum Wien, Viena, Austria

³ Institutul pentru Probleme de Inginerie Mecanică, A. N. Podgorny Academia Națională de Științe a Ucrainei, Harkov, Ucraina

Rezumat. În clădirile moderne, aria structurilor de ferestre de fațadă variază de la 55% la 85% din total, astfel încât sarcina de a îmbunătăți metodologia de determinare a coeficientului de transfer de căldură al structurilor de ferestre este urgentă. Scopul acestei lucrări este de a determina coeficientul de transfer termic al structurilor translucide, având în vedere numărul de etaje ale clădirilor, factorii climatici, precum viteza vântului și temperatura exterioară. Pentru atingerea acestui scop au fost rezolvate următoarele sarcini: analiza transferului de căldură în structurile translucide ca proces cvasi-staționar; analiza proceselor de transfer de căldură în structurile translucide, care sunt o combinație de plăci solide transparente (ochelari) și goluri de aer conectate printr-o structură de cadru; determinarea coeficientului de transfer termic pe suprafața sticlei în funcție de factorii climatici și componenta radiantă. Cel mai important rezultat este dependența empirică a coeficientului de transfer termic pe suprafața exterioară a blocului de ferestre de criteriul Reynolds, dependențele pentru determinarea coeficientului de transfer termic al blocurilor de ferestre sunt îmbunătățite, luând în considerare parametrii climatici. Coeficientul de transfer de căldură al blocului de ferestre în ansamblu este prezentat sub formă de rapoarte analitice, luând în considerare locația clădirii și înălțimea acesteia, modificările vitezei vântului și ale temperaturii exterioare. Semnificația rezultatului cercetării constă în posibilitatea utilizării dependențelor obținute pentru a evalua caracteristicile termice ale structurilor ferestrelor de forme nestandard.

Cuvinte-cheie: pierdere de căldură, coeficient de transfer termic, numărul Nusselt, numărul Grashof, fereastră, vânt, tulburări externe.

Методология определения тепловых потерь через светопрозрачные ограждающие конструкции Маляренко В.¹, Алёхина С.², Орлова Н.³

¹Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, Харьков, Украина

²Университет прикладных наук **Technikum Wien**, Вена, Австрия

³Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина

Аннотация. В современных зданиях площадь фасадных оконных конструкций составляет от 55 % до 85 % от общей, поэтому актуальной является задача усовершенствования методологии по определению коэффициента теплопередачи оконных конструкций. Цель данной работы – определение коэффициентов теплопередачи светопрозрачных ограждений с учетом этажности зданий, климатических факторов, таких как скорость ветра, температура наружного воздуха. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: анализ теплопереноса в светопрозрачных ограждениях как квазистационарного процесса; анализ процессов теплопереноса в светопрозрачных ограждениях, которые представляют собой комбинацию твердых прозрачных пластин (стекло) и воздушных прослоек, соединенных рамной конструкцией; определение коэффициента теплоотдачи на поверхности стекла в зависимости от климатических факторов, и лучистой составляющей. Наиболее важным результатом являются эмпирические зависимости коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности оконного блока от критерия Рейнольдса, усовершенствованы зависимости для определения коэффициента теплопередачи оконных блоков с учетом климатических параметров. Коэффициент теплопередачи оконного блока в целом представлен в виде аналитических соотношений, с учетом расположения здания и его высоты, изменения скорости ветра и температуры наружного воздуха. Данная методология апробирована на примере гражданского административного здания (общая площадь светопрозрачных ограждений составляет 70 % от общей площади здания), для которого оценивались коэффициенты теплопередачи оконных конструкций нестандартных серий. Значимость результата исследований заключается в возможности использования, полученных зависимостей для оценки теплотехнических характеристик оконных конструкций нестандартной формы. Приведенные в работе зависимости коэффициента теплопередачи от скорости ветра и температуры наружного воздуха могут быть использованы при энергоаудите зданий с большим коэффициентом остекления фасадов здания для определения теплотерь и разработки показателей энергосбережения.

Ключевые слова: тепловые потери, коэффициент теплопередачи, число Нуссельта, число Грасгофа, окно, ветер, внешние возмущающие воздействия.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время современная строительная индустрия ориентируется на создание энергоэффективных зданий [1], [2], [3]. Поэтому исследования теплофизических параметров ограждающих конструкций актуальны, поскольку направлены на повышение их теплозащитных качеств [1].

В настоящее время существуют методики определения базового уровня энергопотребления, содержащие процедуру построения многофакторной модели и определяющие ее переменные [4], для которой необходимо уточнение параметров ограждающих конструкций, формирующих основную тепловую нагрузку. Для оценки мероприятий, направленных на снижение энергопотребления первоочередными являются задачи разработки инженерных методов по оценке теплофизических параметров ограждающих конструкций.

В любом здании оконные конструкции являются не только элементом самого здания, а системой обеспечения комфортных

условий. Если при разработке здания основное внимание уделяется его энергоэффективности коэффициент теплопередачи окон должен быть четко определен.

В общей площади стеклопакета на светопропускающие конструкции (стекла) приходится около 70 %, и 30 % на рамную. При этом в общей стоимости 1 м² окна стоимость стеклопакета составляет 70 %, стоимость рамы – 30 %. Таким образом, минимизировать потери разумнее за счет применения конструктивных решений. Для разработки таких энергосберегающих решений необходима методика определения коэффициента теплопередачи с учетом ширины, толщины и высоты стеклопакета, направления ветра, заполнения стеклопакета.

Коэффициенты теплопередачи светопрозрачных конструкций определяются несколькими способами [5]: численным моделированием [6], [7]; определение коэффициентов теплоотдачи по методике, описанной в [8], или по табличным данным [9]. В гражданских зданиях часто

применяются нестандартные оконные конструкции, которые требуют индивидуального подхода для оценки их уровня энергопотребления и проведения мероприятий по энергосбережению.

Окупаемость энергоэффективных стеклопакетов по сравнению с традиционными оценивается в [10].

В ряде работ приводится исследование по разработке окон с повышенной теплозащитой и герметичностью для районов с холодным климатом [11], [12], для которых актуально оценка как климатических параметров, так и индивидуальных параметров.

В работах [13, 14] представлены экспериментальные и теоретические исследования новых оконных конструкций с тепловыделением в воздушных зазорах, с экранами и жалюзи с теплоотражающими покрытиями, с вентиляцией воздушных зазоров.

Однако представленные исследования не позволяют оценить эффективность мероприятий по реконструкции с уточнением коэффициентов теплопередачи в зависимости от климатических факторов.

Для более корректного определения технико-экономических показателей применения оконных систем с высоким уровнем теплозащиты анализируются перспективы совершенствования оценки их теплотехнических параметров [15], [16]. Однако, представленная методика не может быть применена для оценки мероприятий по энергосбережению с учетом метеофакторов.

Основными параметрами при оценке энергоэффективности зданий являются тепловые свойства материалов. Существующие методы определения тепловых свойств современных светопрозрачных конструкций анализируются в работах [17], [18]. Описан комплексный метод определения фактического значения приведенного сопротивления теплопередаче оконных систем, который основан на измерении средней температуры внутренней поверхности конструкции и определении фактического коэффициента теплопередачи. Однако данный подход требует проведения большого количества измерений, чтобы избежать высокой погрешности.

В работе [18] проведен анализ различных способов повышения сопротивления

теплопередаче стеклопакетов. В результате была предложена зависимость сопротивления теплопередаче энергоэффективных оконных систем от различных факторов, таких как оконное заполнение, эмиссионное покрытие. Однако ветровое воздействие не учитывалось, что существенно снижает эффективность методики.

В работе [19] представлена методика уточнения коэффициента теплопередачи светопрозрачных ограждений по числу Рэлея с учетом умеренных климатических факторов.

На основе метода конечных разностей уточняется конвективный теплообмен в вертикальных слоях воздуха, анализируются изотермы и в результате приводятся средние значения числа Нуссельта по вертикали [20]. Однако для зданий, расположенных в умеренно-континентальном климате, важной составляющей являются скорость ветра и температура наружного воздуха.

Таким образом, необходима методика оценки коэффициента теплопередачи оконных конструкций различной конфигурации с учетом высоты зданий, а также климатических факторов.

Целью данной работы является определение коэффициентов теплопередачи светопрозрачных ограждений с учетом этажности зданий, климатических факторов, таких как скорость ветра, температура наружного воздуха.

По известным данным авторов аналогичные исследования не проводились.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время актуальной проблемой является определение потерь тепла через светопрозрачные конструкции для административных зданий, конструкции которых индивидуальны.

Для разработки методики определения коэффициента теплопередачи через светопрозрачные конструкции рассматривалось административное здание, расположенное в г. Харьков, Украина.

Здание имеет форму параллелепипеда. Окна прямоугольные, однокамерные, разной высоты и ширины.

Конструкция одной из оконных систем показана на рис. 1

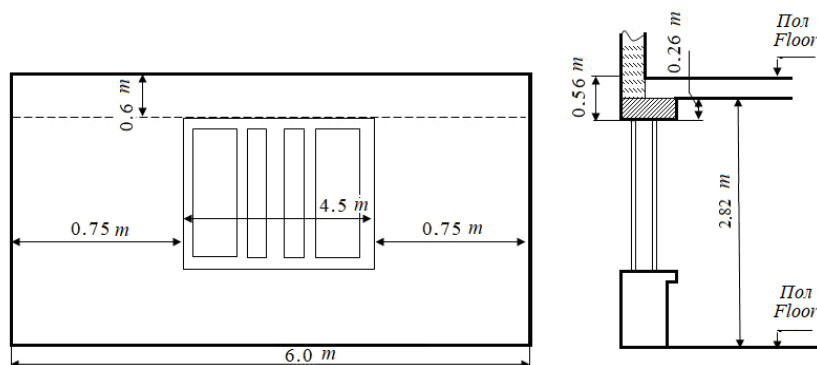


Рис. 1. Схема стены с оконным проемом.
Fig.1. Scheme of a wall with a window opening.

Оконная конструкция рассматриваемого здания представляет собой комбинацию сплошных прозрачных пластин (стеклянных), пространство между которыми заполнено газом и соединенных рамной конструкцией. Теплопередача через оконные конструкции происходит достаточно быстро, поэтому может рассматриваться как квазистационарный процесс. Теплопередача через окно осуществляется теплопроводностью, излучением и конвекцией.

Обтекание зданий воздушным потоком имеет сложный характер, сопровождающийся формированием и взаимодействием областей отрыва с циркуляцией воздуха в них. Наветренной принимается сторона, на которую поток налетает импактно и образовывается область заторможенного потока, в которой скорость движения воздуха близка к нулевой, и градиентного течения; боковой соответственно область образования отрывных зон при обтекании углов здания. Внутри наветренной зоны давление падает в связи с деформацией и разделением ветрового потока, поскольку турбулентные вихри, огибая здание через боковые поверхности, переносят воздушные массы в заветренную вихревую зону аэродинамического следа.

МЕТОДОЛОГИЯ

За счет разности температур, тепло переходит в направлении падения температуры, для анализа коэффициента теплопередачи процессы теплообмена разграничиваются и анализируются отдельно. Коэффициент теплопередачи оконной системы равен

$$K = \frac{1}{R_{in} + \sum_{i=1}^{i-1} R_{gl} + \sum_{i=1}^{i-1} R_{win\ fil} + R_{out}} \quad (1)$$

$$R_{in} = \frac{1}{\alpha_{in}}, \quad R_{gl} = \frac{\delta_{gl}}{\lambda_{gl}}, \quad R_{win\ fil} = \frac{1}{\alpha_{air}},$$

$R_{out} = \frac{1}{\alpha_{out}}$ - термическое сопротивление: на

внутренней поверхности остекления, самого остекления, воздушного зазора и на внешней поверхности остекления соответственно.

Коэффициент теплопроводности оконного стекла можно принять равным $\lambda = 0.74 + 0.001 \cdot t$ W/(m²°C), толщина оконного стекла $\delta = 3; 4; 5$ мм. В диапазоне изменения температуры наружного воздуха $-35 \text{ }^\circ\text{C} < t_{out} \leq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ коэффициент теплопроводности стекла изменяется не более чем $\pm 3.14 \%$.

Для определения коэффициента теплопередачи температура стекла, расположенного внутри помещения считается средней по толщине, т.е. принимается равной t_1 , а для внешнего t_2 . По данным Эккерта [19] для воздуха переход от ламинарного режима течения к турбулентному на вертикальной поверхности происходит при числе Грасгофа $10^8 - 10^9$ и приравнивается $Gr = 10^9$, с учетом $\beta(t)$, g , v , получаем значение координаты перехода к турбулентному режиму течения в пограничном слое, в результате получаем зависимость

$$x_{cr} = (1 + 0.007636 \cdot t)^{2/3} \cdot \left(\frac{\Delta t}{273 + t} \right) \quad (2)$$

Для $t_{in}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_l=10\text{ }^{\circ}\text{C}$, величина x координата, отсчитываемая для поверхности стекла от верхнего края, будет в диапазоне $x_{cr}\sim 0.883\text{ м}$. $H-x_{cr}= 0.467\text{ м}$ будет турбулентным. Среднее значение коэффициента конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности прозрачной части окна можно принять как

$$\alpha_{in} = (\alpha_l \cdot x + \alpha_t \cdot (H - x_{cr})) / H \quad (3)$$

где H - высота светопрозрачного остекления

На рис. 2 показано распределение коэффициента теплопередачи на внутренней стороне стеклопакета в зависимости от температуры.

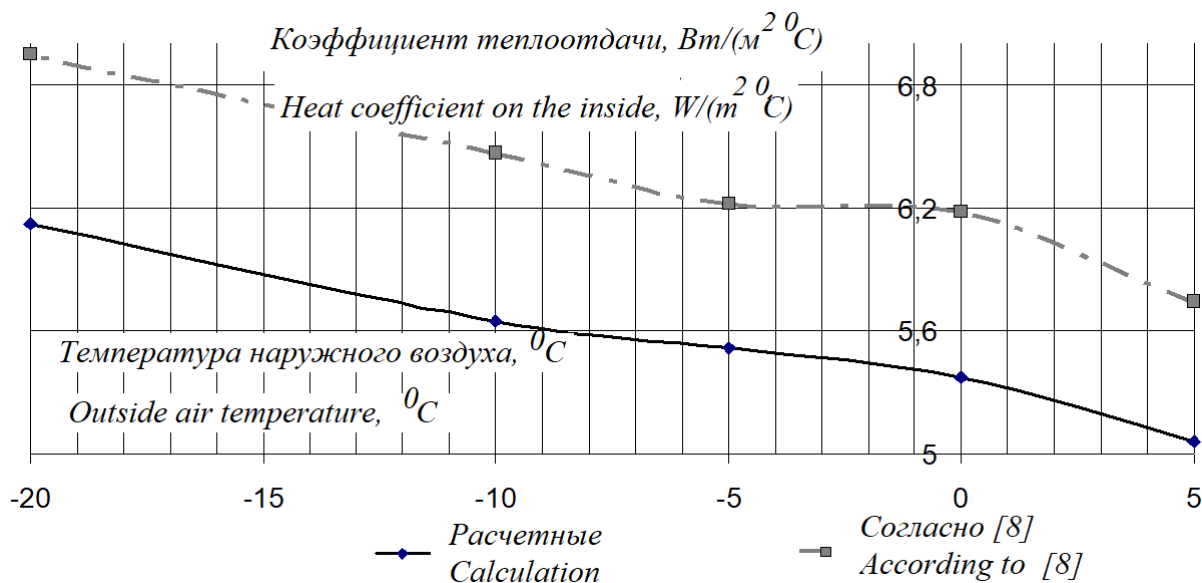


Рис.2. Распределение коэффициента теплоотдачи на внутренней стороне стеклопакета.
Fig.2. Distribution of the heat convection coefficient on the inside of the double-glazed window.

Как видно из графика в диапазоне температур наружного воздуха от $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности остекления варьируется от 5.05 до $6.1\text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$. Следовательно, коэффициент конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности может быть принят как среднее значение в данном диапазоне температур наружного воздуха.

Теплообмен в вертикальном герметичном зазоре (в данном стеклопакета заполнение - воздух) зависит от температур на поверхностях стекол t_1 , t_2 и ширины прослойки b . Общий приведенный коэффициент теплоотдачи равен

$$\alpha_{red} = \alpha_{con} + \alpha_{rad} \quad (4)$$

В оконном проеме в зависимости от его ширины происходит конвективный теплообмен, обусловленный перепадами температур на поверхностях светопрозрачного ограждения (стекла).

Движение воздуха может быть ламинарным или турбулентным. Условия теплообмена также зависят от размещения отопительного прибора в помещении. В воздушной прослойке между стеклами, происходит свободная конвекция.

Вблизи внешнего стекла формируется ламинарный пограничный слой, на внутренней поверхности - турбулентный. Схема конвективного теплообмена внутри оконного проема представлена на рис. 3.

Состояние воздуха в оконной герметичной прослойке характеризуется механическим равновесием и отсутствием теплового равновесия (кондуктивный теплообмен) и теплообмена естественной конвекцией при ламинарном и турбулентном движении воздуха и может быть обобщено числом Грасгофа (5)

$$Gr_{cr} = g \cdot \beta \cdot \frac{t_{av} \cdot b^3}{\nu^2} \quad (5)$$

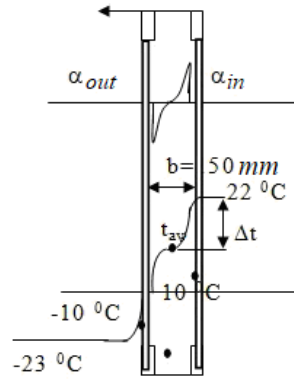


Рис. 3. Схема конвективного теплообмена внутри окна.
 Fig. 3. Scheme of the convective heat transfer inside the window.

Критическое значение числа Грасгофа, соответствующее возникновению конвективных течений в прослойке, составляет $Gr_{cr}=1400$ [21]. Если естественной конвекции в межстекольном пространстве нет, то теплообмен осуществляется теплопроводностью и излучением, температура по ширине прослойки b изменяется линейно. Предельное значение ширины прослойки b^* , при которой конвекция не происходит, в интервале температур $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$b^* \leq 3,00 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 7,64 \cdot 10^{-3} t_{av})^{2/3} \cdot \left(\frac{t_{av} + 273}{t_1 - t_2} \right)^{1/3} \quad (6)$$

Тепловой поток за счет теплопроводности равен

$$\theta = \lambda \cdot (\tau_1 - \tau_2) \cdot \beta \quad (7)$$

где λ – коэффициент теплопроводности воздуха при t_{av} .

Если число Грасгофа больше 1400, в прослойке образуются пограничные слои [19]. Воздушный поток у теплой поверхности поднимается, у холодной поверхности опускается. Восходящий и нисходящий пограничные слои можно условно разделить на пристеночные слои с областью изменения скорости от нуля ($U=0$) на поверхности до ее максимального значения ($U=U_{max}$) и ядром течения, формируемым в центральной части прослойки

Возможны два случая развития пограничных слоев на стенках:

- если ширина прослойки b велика, то свободные естественные конвективные течения (пограничные слои) формируются независимо друг от друга на холодной t_2 и теплой t_1 поверхностях, их взаимодействие не наблюдается. Температура воздуха в центре прослойки (ядре) постоянна по высоте и равна t_{cr} , а сумма толщин пограничных слоев δ_{cold} (холодного) и δ_{hot} (теплого) $\delta_{cold} + \delta_{hot} < h$;
- толщины пограничных слоев δ_{cold} и δ_{hot} взаимодействуют друг с другом, т.е. $\delta_{cold} + \delta_{hot} > h$. При этом в центральной области прослойки возникают циркуляционные вихри, количество которых зависит от перепада температур $t_2 - t_1$.

Анализ экспериментальных работ, представленных в [21], [22], показывает, что в диапазоне изменения числа Грасгофа от $1.4 \cdot 10^3$ до 10^7 в воздушной прослойке наблюдается ламинарный режим течения, а при $Gr > 10^7$ турбулентный. Ширина прослойки, соответствующая переходу от ламинарного к турбулентному режиму течения, равна

$$b^{**} \geq 5.778 \cdot 10^{-2} \cdot (1 + 7.64 \cdot 10^{-3} t_{av})^{2/3} \times \left(\frac{t_{av} + 273}{t_1 - t_2} \right)^{1/3} \quad (8)$$

При расчете теплопотерь через окна приведенный коэффициент теплоотдачи воздушной прослойки определяется как среднее по ее ширине и высоте. На основании экспериментально полученной зависимости для воздушного зазора [23]

$$Nu_x = 0.231 \cdot Gr_x^{0.3} \quad (9)$$

где число Нуссельта $Nu = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda_{air}}$; а число

$$\text{Грасгофа } Gr = g \cdot \beta \cdot \frac{(t-t_2) \cdot x^3}{\nu^2}.$$

Среднее значение числа Нуссельта можно представить в виде [20]

$$\overline{Nu}_H = \frac{1}{H} \int_0^H Nu_x dx \quad (10)$$

В [6] приведено критериальное уравнение ламинарного течения воздуха в межстекольном пространстве, при $5 < (H/b) \leq 20$, $1,4 \cdot 10^3 < Gr < 10^6$ в виде

$$\overline{Nu}_b = 0.119 \cdot Gr^{0.3} \left(\frac{b}{H} \right)^{0.1} \quad (11)$$

где b - ширина воздушного зазора.

Соответственно исследованию [9] приведенный коэффициент теплоотдачи для воздушной прослойки в диапазоне изменения числа Грасгофа от 10^3 to 10^{10} и $(H/b) > 5$ рекомендуется формула при $Pr = 0.71$

$$\overline{Nu}_{av} = 0.165 \cdot Gr_b^{0.25}$$

В результате приведенный коэффициент теплоотдачи в воздушной прослойке для ширины b преобразуется к виду

$$\alpha_{red} = 1.086 \cdot \left(1 - 2.89 \cdot 10^{-4} \cdot t_{av} \right) \times \left[(t_1 - t_2) / (t_{av} + 273) \right] \quad (12)$$

Лучистый теплообмен в оконных конструкциях происходит от внутренних ограждений (потолок, пол, перегородки и др.) к внутренней поверхности остекления. Температура на внутренней поверхности остекления в холодную погоду ниже температуры окружающих поверхностей. Внешняя поверхность оконного остекления отдает лучистое тепло в окружающую среду. Лучистый теплообмен в межстекольном пространстве между обращенными друг к

другу поверхностями остекления, которые с учетом диатермии среды, стационарности процесса, а также приведенного коэффициента излучения $\varepsilon = 0,8815$ и постоянной Стефана-Больцмана для абсолютно черного тела можно определить по уравнению

$$Q_{1-2} = 4.998 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (13)$$

Суммарный тепловой поток определяется в результате действия механизмов конвективного и лучистого теплообмена, последний целесообразно представить в виде $q_{rad} = \alpha_{rad} \cdot (t_1 - t_2)$. Если t_1 изменяется в пределах комфортной температуры воздуха в помещении $t_{вн} = 20-22$ °С, а t_2 наружного воздуха от -40 °С до 10 °С, коэффициент лучистой теплоотдачи можно аппроксимировать зависимостью

$$\alpha_{rad} = 4.548 + 2.25 \cdot \tau_2 \quad (14)$$

На основании анализа условий натекания воздуха на наветренную стену можно отметить, что значительная часть окон попадает в область заторможенного потока, в которой происходит формирование коэффициента теплоотдачи при влиянии пульсирующей составляющей продольной скорости U'

$$\alpha_{dec} = A \cdot U' \quad (15)$$

где величина $A = 23.85$ можно взять из результатов исследований натекания плоской струи на преграду [23] - [26].

Пульсирующая составляющая скорости ветра равна

$$U' = 0.3 \cdot U_0 \cdot \left(\frac{\delta_{b.l.}}{h_0} \right)^{n_0} \cdot \left(\frac{\delta_{b.l.}}{h} \right)^n \quad (16)$$

где U_0 - скорость основного воздушного потока на высоте h_0 , h - высота, на которой определяется скорость U' , $\delta_{b.l.}$ - толщина пограничного слоя, n - показатель степени, зависящий от типа местности, для которой рассчитывается скорость, n_0 - показатель степени, зависящий от типа местности, на которой расположен флюгер метеостанции.

Схема натекания воздуха на здание представлена на рис. 4. Скорость воздуха в

формуле (19) по высоте определяется по графику (рис. 5).

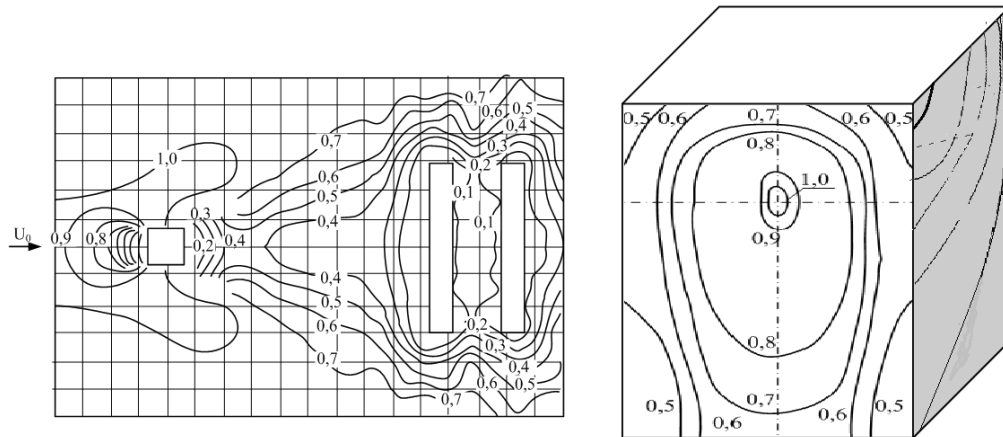


Рис. 4. Схема обтекания здания воздушным потоком.
Fig. 4. Diagram of the airflow around the building.

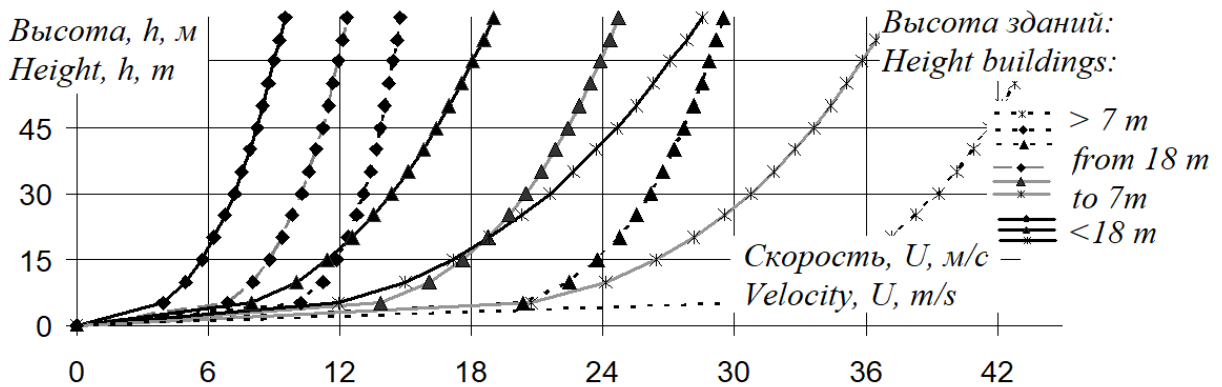


Рис. 5. Изменение скорости ветра по высоте здания.
Fig. 5. Wind velocity changes by the height near the building.

Вблизи боковой поверхности здания на значительной части наблюдается рециркуляция течений, т.е. вблизи угла здания имеется участок, в котором происходит сброс воздушного потока с наветренной стороны. В этом случае значения коэффициентов теплопередачи определяются согласно [21], [27]

$$\alpha_{out}^{grad} = 5.066 \cdot U_0 \cdot \left(\frac{\delta_{b.l.}}{h_0}\right)^{n_0} \left(\frac{\delta_{b.l.}}{h}\right)^n \quad (17)$$

Среднее значение коэффициента теплоотдачи на боковой поверхности остекления для окон можно принять равным

$$\bar{\alpha}_{av} = 1.1 \cdot \rho_{air} \cdot U \quad (18)$$

или учитывая скорость отрыва воздушного потока и ее изменение по высоте [25], [28]

$$\bar{\alpha}_{av} = 1.5 \cdot \rho \cdot U_0 \cdot \left(\frac{\delta_{b.l.}}{h_0}\right)^{n_0} \left(\frac{\delta_{b.l.}}{h}\right)^n \quad (19)$$

В качестве примера рассмотрим распределение коэффициентов теплопередачи оконных конструкций (тип стеклопакета – однокамерный, рис. 1). Температура наружного воздуха -20 °С; $U_0 = 5$ м/с, воздушный поток натекает под углом 90°. Если температура t_2 принимается равной температуре наружного воздуха -20 °С, коэффициент лучистой теплоотдачи равен $\alpha_{rad} = 4.098$ Вт/(м²·°С) в соответствии с приведенными выше формулами. Термическое сопротивление стекла равно $R_{gl} = 0.00418$ (м²·°С)/Вт.

Результаты расчета коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности остекления рассматриваемого здания

представлены на рис. 6, 7. Коэффициент теплоотдачи с высотой увеличивается, поскольку воздушный поток у поверхности Земли затормаживается, а скорость воздушного потока растет. При этом при скорости воздушного потока от 1 м/с до 5 м/с изменение коэффициента теплоотдачи от этажа к этажу незначительно.

Анализ изменения коэффициента теплоотдачи в области торможения и градиентного течения показывает, что при увеличении скорости ветра от 8 м/с до 15 м/с КТО увеличивается более чем в 2 раза по

высоте здания. Теплообмен в светопрозрачных конструкциях осуществляется одновременным действием теплопроводности и конвекции. При этом у наружной поверхности оконной конструкции наблюдается вынужденная конвекция, вызванная воздействием внешних факторов. Теплопередача происходит в тонком слое, который непосредственно примыкает к наружной поверхности.

Таким образом, необходимо уточнить зависимость КТО не только от скорости ветра, но и от температуры, рис. 8, 9.

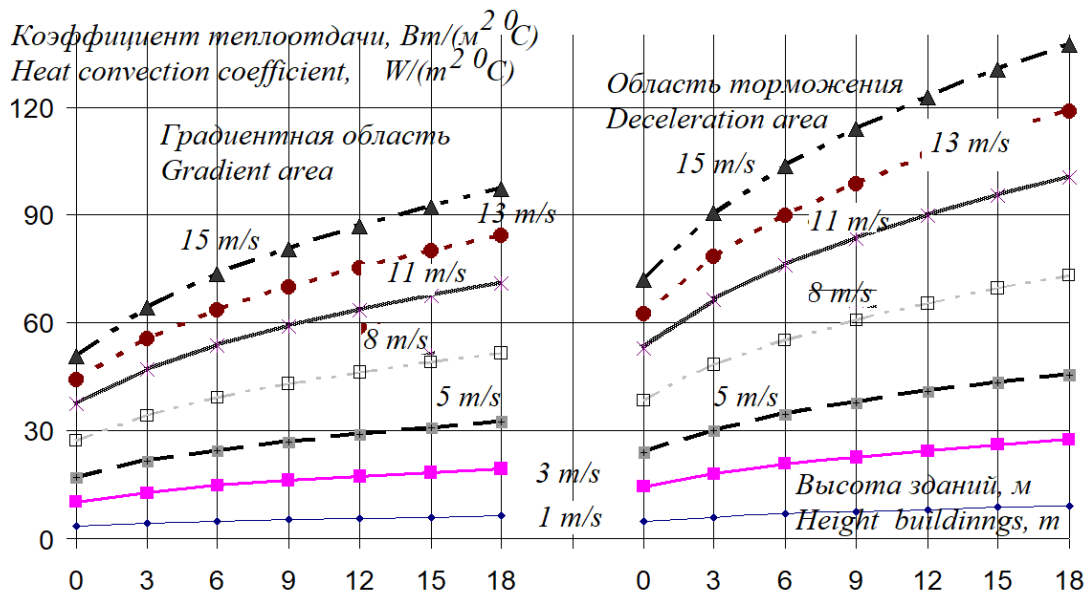


Рис. 6. Изменение коэффициента теплопередачи в зависимости от скорости ветра по высоте.

Fig. 6. The change in the heat convection coefficient depending on the wind speed in height.

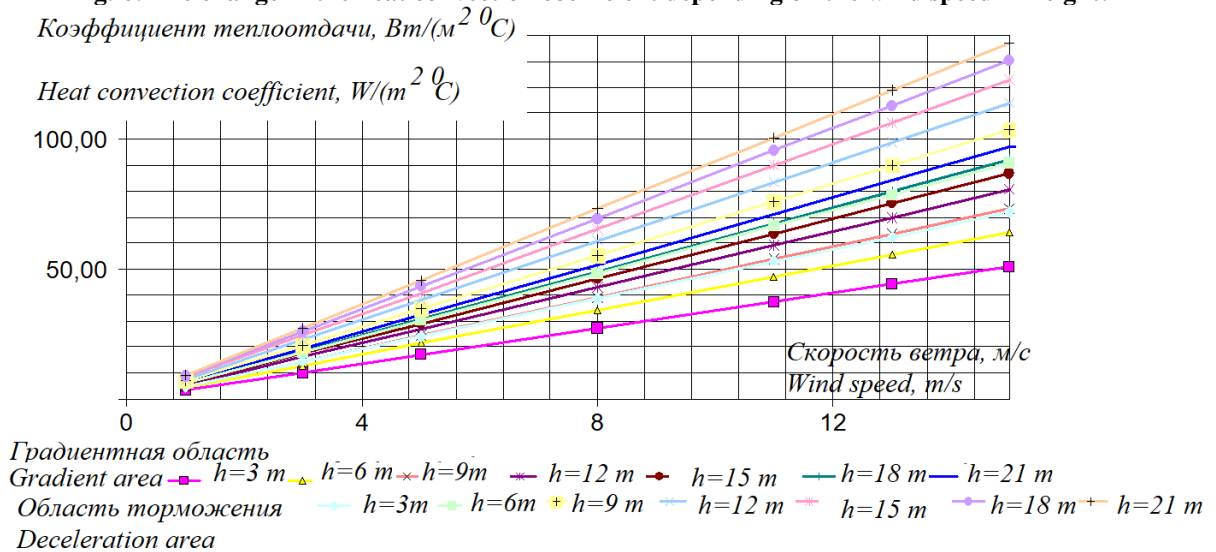


Рис. 7. Изменение коэффициентов теплопередачи в зависимости от скорости ветра по высоте.

Fig. 7. Change in heat convection coefficients depending on the wind speed in height.

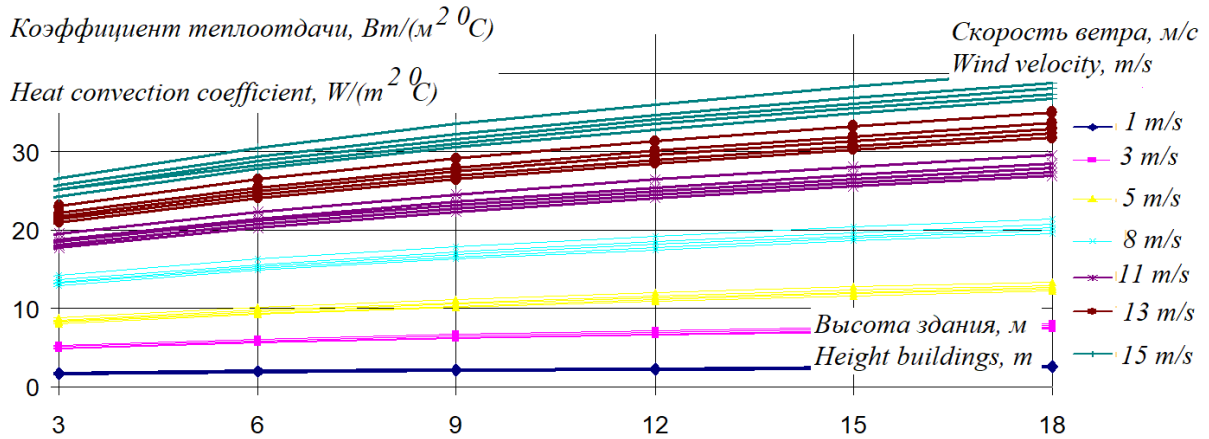


Рис. 8. Изменение коэффициентов теплоотдачи в зависимости от скорости ветра по высоте при различных температурах.

Fig. 8. Change in heat convection coefficients depending on the wind speed in height at different temperatures.

Коэффициенты теплоотдачи определены для температуры наружного воздуха 5 °С, -5 °С, 0 °С, -10 °С, -20 °С.

Из графика следует, что чем ниже температура и скорость, тем больше влияние температуры наружного воздуха, рис. 8. Анализ зависимости коэффициента теплоотдачи показал, что при высоте здания более 18 м необходимо учитывать не только влияние скорости ветра, но и температуры (рис. 10).

На рис. 11 показана зависимость коэффициента теплоотдачи от критерия Рейнольдса. Согласно расчетам режим движения воздуха турбулентный.

Как видно из рис. 11, можно получить зависимость коэффициента теплоотдачи на боковой стороне здания от критерия Рейнольдса, т.е., в конечном счете, от изменения параметров наружного климата

$$\bar{\alpha}_{Re} = -6 \cdot 10^{-15} \cdot Re^2 + 10^{-6} \cdot Re + 0.848 \cdot U_0$$

Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры наружного воздуха следует рассматривать на высоте более 15 м от поверхности земли, в этом случае по температуре

$$\bar{\alpha}_{t_{out}} = \bar{\alpha}_{av}(-0,0038 \cdot t_{out} + 0.9772)$$

по числу Re

$$\bar{\alpha}_{Re} = \bar{\alpha}_{av}(2 \cdot 10^{-8} \cdot Re + 0.4173)$$

Полученная зависимость имеет простой вид, физически обоснована и подтверждается имеющимися результатами других исследователей. Ее можно использовать для оценки энергопотребления, оценки класса энергоэффективности зданий, разработки и оценки мероприятий по энергосбережению в зависимости от параметров наружного климата.

$$\bar{k} = k \cdot (-5 \cdot 10^{-5} \cdot t_{out}^2 - 0.0046 \cdot t_{out} + 0.9776)$$

На основании полученных результатов рассчитаны коэффициенты теплопередачи оконной конструкции с использованием описанного выше подхода (рис. 12- рис.17).

Как видно из графика, на коэффициент теплоотдачи существенное влияние оказывает скорость ветра, но и зона натекания. Коэффициент теплоотдачи в градиентной области на высоте 6 м изменяется от 1.82 Вт/(м²·°С) до 2.8 Вт/(м²·°С), в зоне торможения от 2.05 Вт/(м²·°С) to 2.83 Вт/(м²·°С), на боковой поверхности 1.15 Вт/(м²·°С) до 2.64 Вт/(м²·°С). Таким образом, скорость ветра оказывает существенное влияние на тепловой режим помещения, в случае использования усредненных значений происходит недогрев или перегрев

помещения, в любом случае это приводит к увеличению энергозатрат.

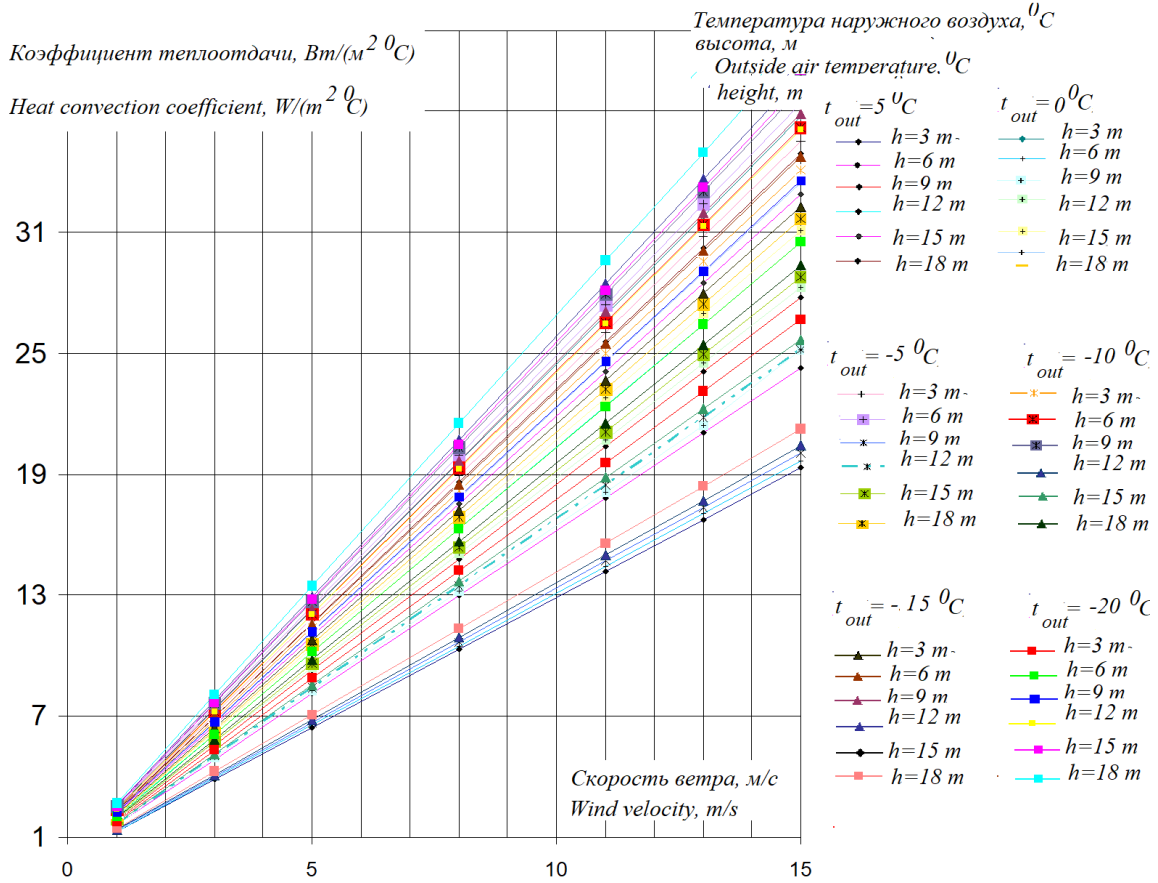


Рис. 9. Коэффициенты теплоотдачи в зависимости от скорости и температуры на высоте от 3 м до 21 м.

Fig. 9. The heat convection coefficient depending on the speed and temperature at a height of 3 m to 21 m.

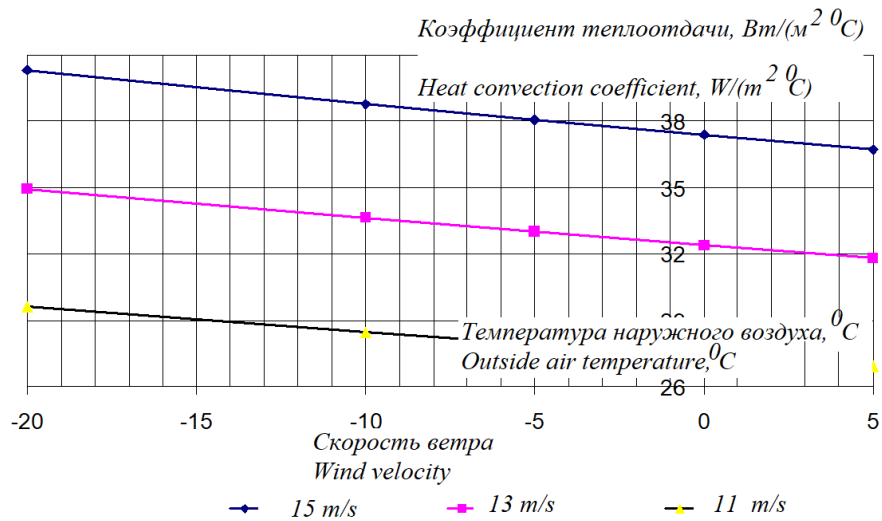


Рис 10. Коэффициенты теплоотдачи в зависимости от температуры на высоте 18 м.

Fig. 10. Heat convection coefficient depending on the temperature at a height of 18 m.

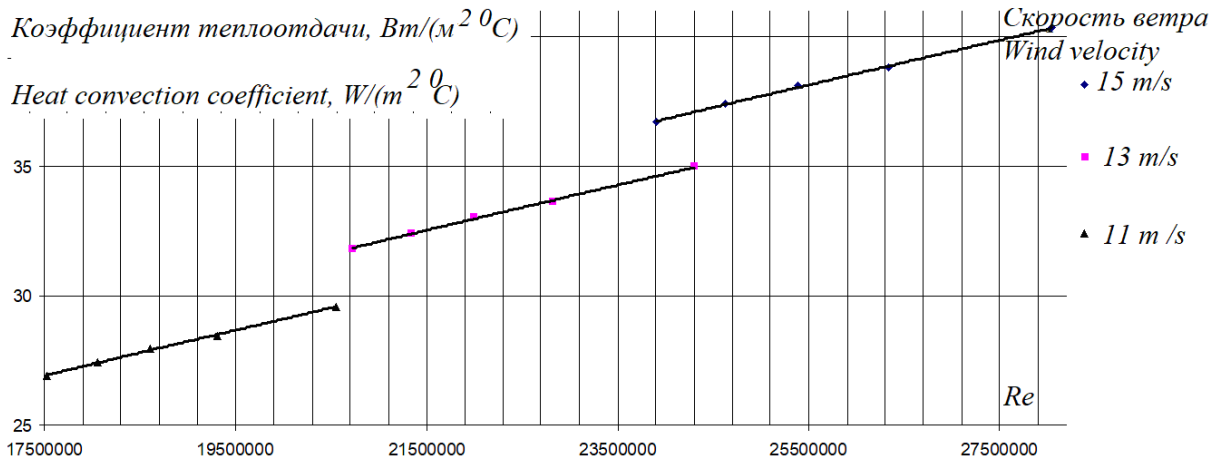


Рис. 11. Коэффициенты теплоотдачи на боковой ячейке в зависимости от критерия Re.
 Fig. 11. The heat convection coefficient on the side cell depending on criterion Re.

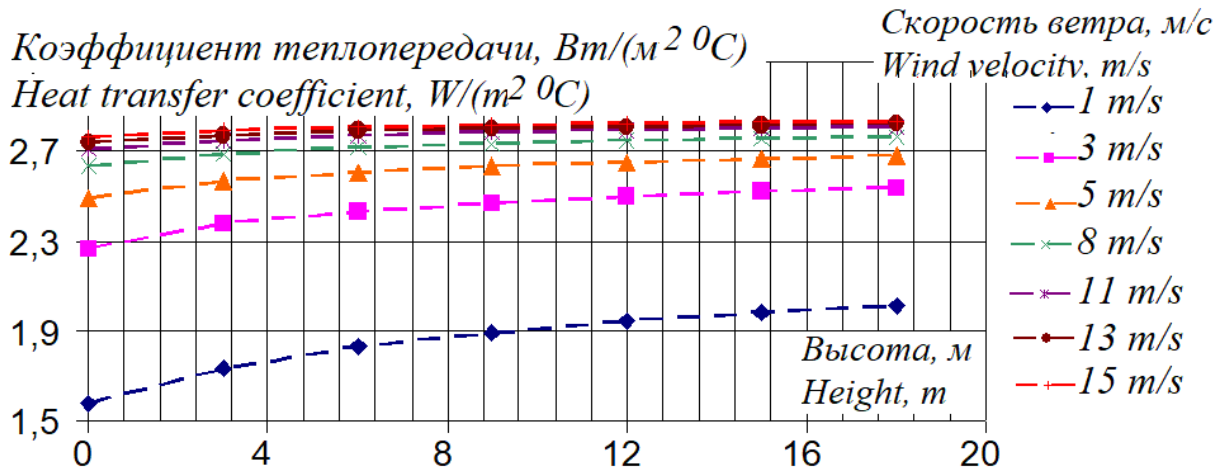


Рис. 12. Коэффициент теплопередачи окна в градиентной области.
 Fig. 12. . The heat transfer coefficient of the window in the gradient area.

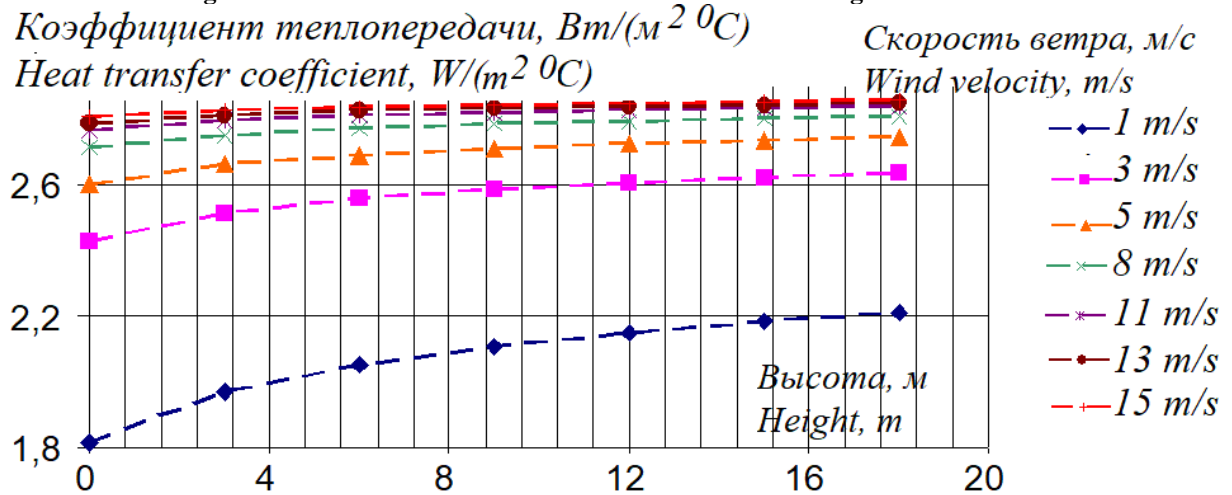


Рис. 13. Коэффициент теплопередачи окна в области торможения.
 Fig. 13. . The heat transfer coefficient of the window in the deceleration area.

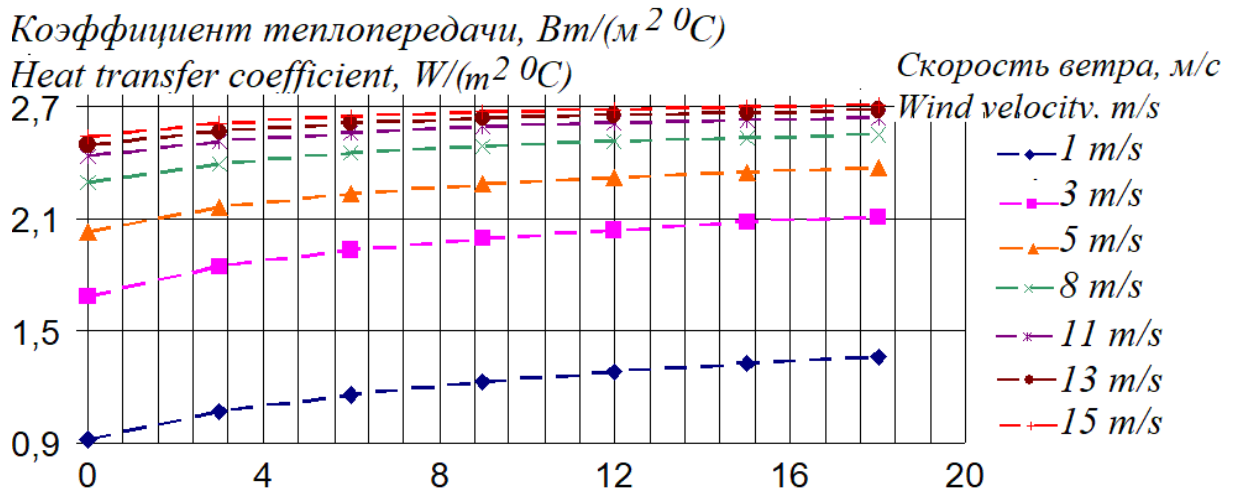


Рис. 14. Коэффициент теплопередачи окна на боковой стороне здания.
 Fig. 14. . The heat transfer coefficient of the window on the side.

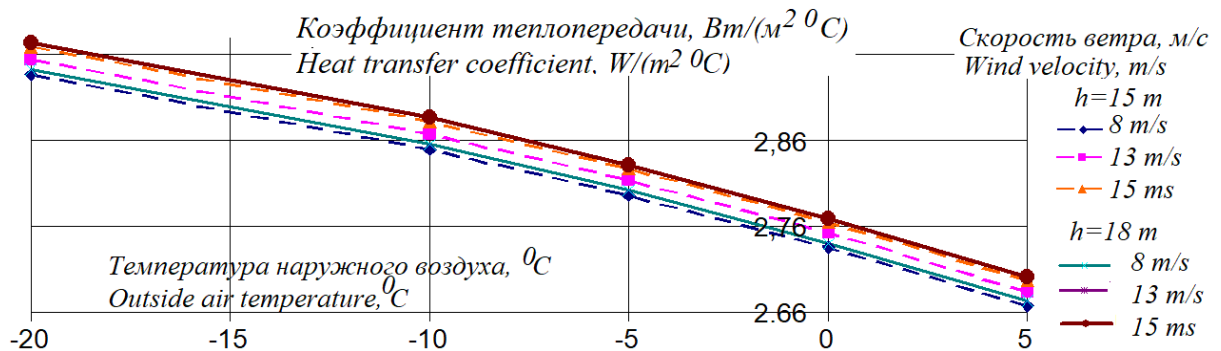


Рис. 15. Коэффициент теплопередачи в градиентной области с учетом изменения температуры наружного воздуха.
 Fig. 15. The heat transfer coefficient in the gradient area considering changes in outdoor temperature of the window.

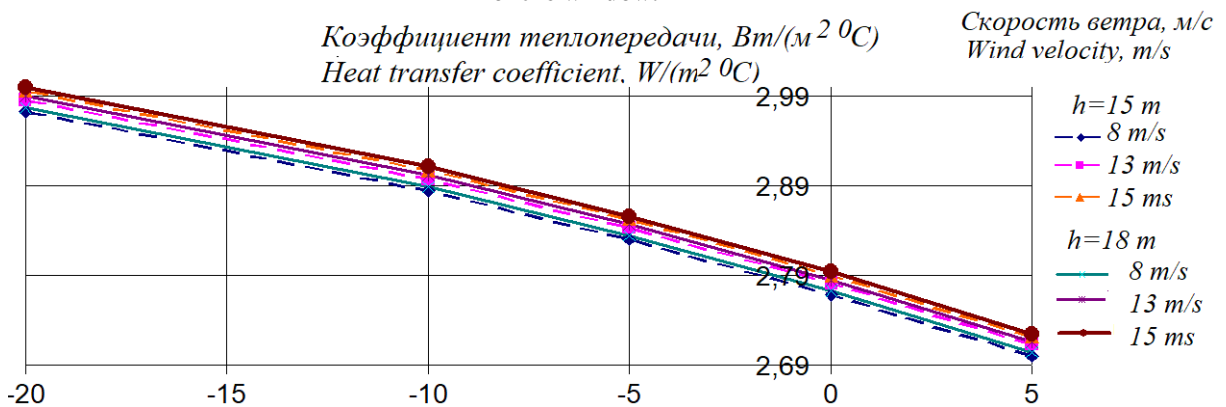


Рис. 16. Коэффициент теплопередачи в области торможения с учетом изменения температуры наружного воздуха.
 Fig. 16. The heat transfer coefficient in the deceleration area considering changes in outdoor temperature of the window.

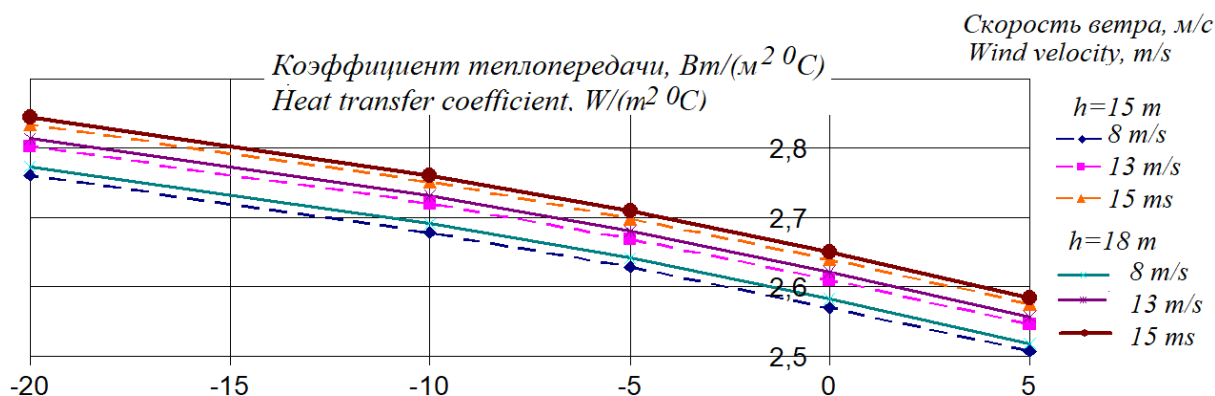


Рис. 17. Коэффициент теплопередачи на боковой стороне здания с учетом изменения температуры наружного воздуха

Fig. 17. The heat transfer coefficient on the side considering changes in outdoor temperature of the window.

Для учета всех параметров наружного климата необходимо корректировать коэффициент теплопередачи в зависимости от метеопараметров.

В результате исследований установлено, что с наветренной стороны здания на высоте более 15 м от поверхности земли, при скорости воздуха 11 м/с и температуре наружного воздуха 10 °С в зоне торможения коэффициент теплоотдачи 2.9 Вт/(м²·°С), в градиентной области 2.8 Вт/(м²·°С), на боковой 2.6 Вт/(м²·°С). Согласно представленным зависимостям при скоростях ветра до 5 м/с этажность здания имеет слабое влияние на коэффициент теплопередачи. При этом корректировку коэффициентов теплоотдачи по температуре наружного воздуха рекомендуется делать для зданий более 15 м от поверхности земли.

ВЫВОДЫ

Получены эмпирические зависимости для определения теплозащитных свойств современных светопрозрачных конструкций от текущих параметров наружного воздуха. Зависимость имеет простой вид, физически обоснована и подтверждается имеющимися результатами других исследователей. Ее можно использовать для более точной оценки годового энергопотребления зданий и оценки энергосбережения, в случае использования современных стеклопакетов.

Представленные эмпирические зависимости коэффициента теплопередачи от скорости ветра и температуры наружного воздуха позволяют оценить теплозащитные качества оконных конструкций в процессе

эксплуатации с учетом изменения внешних и внутренних возмущений.

Как следует из полученных в работе результатов, коэффициенты теплопередачи в зависимости от стороны здания различаются на 15-20 %, что существенно, так как потери тепла через светопрозрачные конструкции составляют 55-65 % от суммарных [29].

Теплофизические параметры оконных конструкций оказывают существенное влияние не только на микроклимат помещений, но и на долговечность зданий, поэтому так важно их корректное определение.

Библиография (References)

- [1] Energy audit and potential energy saving in an office building in riyadh, saudi arabia. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 21(2), 65-74. doi:10.1016/S1018-3639(18)30510-5
- [2] Bolharova, N., Ruchynskiy, M., Skochko, V., & Lesko, V. . Infographic modeling of heat exchange of energy-efficient building. *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations*, June 2020, (pp.555-569). doi:10.1007/978-3-030-42939-3_55
- [3] Energy Efficient Building Design, ISBN 978-3-030-40670-7, A-M. Dabija (Ed.), 281 p., Springer Nature Switzerland AG, April 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-40671-4>
- [4] Davydenko L., Davydenko N., Deja A, Wi'snicki B, Dzhuguryan T. Efficient Energy Management for the Smart Sustainable City Multifloor Manufacturing Clusters: A Formalization of the Water Supply System Operation Conditions Based on Monitoring Water Consumption Profiles. *Energies* 2023, 16, 4519, p.p. 1-25. DOI:10.3390/en16114519

- [5] Tian, G., Fan, Y., Gao, M., Wang, H., Zheng, H., Liu, J., Liu C. Indoor thermal environment of thin membrane structure buildings. A review. *Energy and Buildings*, Volume 234, 1 March 2021, 110704. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778820334903?via%3Dihub>. doi:10.1016/j.enbuild.2020.110704 (2021).
- [6] Wang, Z., Tian, Q., and Jia, J. The convective heat transfer performance and structural optimization of the cavity in energy-saving thermal insulation windows under cold air penetration condition. *Energies*, 15. 2481, pp. 2-23. Doi:10.3390/en15072481 (2022).
- [7] Li, L., Zhang, C., Xu, X., Yu, J., Wang, F., Gang, W., and Wang, J. "Simulation study of a dual-cavity window with gravity-driven cooling mechanism." *Building Simulation* 15(7): 1339-1352 (2022). DOI:10.1007/s12273-021-0848-x
- [8] ISO 10077:2017 "Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance."
- [9] Manju, M., Nagarajan, R. V., Satheesh Kumar, P., and Jeganathan, M. Determination of heat resistant in building structures. A case study. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology* 11(2), 2020, pp. 94-105. doi:10.34218/IJARET.11.2.2020.011
- [10] Kirankumar, G., Saboor, S., Vali, S. S., Mahapatra, D., Talanki Puttaranga Setty, A. B., and Kim, K. Thermal and cost analysis of various air filled double glazed reflective windows for energy efficient buildings. *Journal of Building Engineering* 28, 2020. Doi:10.1016/j.jobe.2019.101055.
- [11] Pourghorban, A., Asoodeh, H. The impacts of advanced glazing units on annual performance of the trombe wall systems in cold climates. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 51(3):101983 (2022). doi:10.1016/j.seta.2022.101983.
- [12] Thalfeldt, M., Pikas, E., Kurnitski, J., Voll, H. Facade design principles for nearly zero energy buildings in a cold climate. *Energy and Buildings* 67: 309-321 (2013). doi:10.1016/j.enbuild.2013.08.027.
- [13] Baiburina A.Kh., Rybakova M.M., Vatinb N.I. Heat loss through the window frames of buildings. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. 85(1). Pp. 3-14 Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/heat-loss-through-the-window-frames-of-buildings/viewer>
- [14] Jorge Luis Aguilar-Santana, Hasila Jarimi, Mariana Velasco-Carrasco and Saffa Riffat Review on window-glazing technologies and future prospects. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2020, 15, pp.112-120. *International Journal of Low-Carbon Technologies* 2020, 15, 112-120.
- [15] Mohasseb, S., and Ghazanfari, N. "Advanced techniques for the design of zero energy buildings." *Advanced techniques for the design of zero energy buildings* (2021).
- [16] Sala Lizarraga, J. M. P., and Picallo-Perez, A. Exergy analysis and thermoeconomics of buildings. *Design and analysis for sustainable energy systems*. 1st Edition - September 27, 2019. Doi:10.1016/C2018-0-01196-2.
- [17] Wendt, U. *Engineering materials and their properties*, Springer Handbook of Mechanical Engineering, 2021. Doi:10.1007/978-3-030-47035-7_8
- [18] Strobach, E., Bhatia, B., Zhao, L., and Wang, E. N. Thermal performance of high-efficiency window technologies. *Annual Review of Heat Transfer*, V.2, January 2019. Doi:10.1615/ANNUALREVHEATTRANSFER.2019030886
- [19] Wright J.L. A correlation to quantify convective heat transfer between vertical window glazings // *ASHRAE Trans.* 1996. vol. 102, pp.940-946.
- [20] Korpela S.A., Lee Y., Drummond J.E. Heat transfer through a double pane window. *J. Heat Transfer*, 1982. V.104. pp. 539-544.
- [21] Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, David P. DeWitt *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 8th Edition, December 2018, 992 p. ISBN: 978-1-119-35388-1.
- [22] Tao, Y., Zhang, H., Yan, Y., Tu, J., & Shi, L. CFD analysis of environmental impacts on a thermochromic smart window. *Energy and Buildings*, Volume 263, 2022, 112027. doi:10.1016/j.enbuild.2022.112027.
- [23] Брдлик П.М., Савин В.К.Т Теплообмен между осесимметричной струей и пластиной расположенной нормально к потоку//ИФЖ. - Т. 8, №2.-1965. - С.145-155.
- [24] Sogin H.H., Burkhard., Richardson P. D. Heat Transfer in Separated Flow/*Part I: Preliminary Experiments on Heat Transfer from an Infinite. Blurt Plate to an Air Stream, ARL 4, Brown University*, Jan 1961 - 132-140 P.P.
- [25] Daniels K. The Technology of Ecological Building. - *Birkhauser*. - 1997.- 89 p
- [26] Jensen M. and Franck N. Model-Scale Tests in Turbulent Wind: Part I, Phenomena Dependent on the Wind Speed: Shelter at Houses - *Dispersal of Smoke. Copenhagen: The Danish Technical Press* - 1963- p.102.
- [27] Gandemer J. Wind Environment Around Building. // *Aerodynamic Concept in proceeding of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*. - London. - 1975. - P.423-432.
- [28] Isyumov N., Davenport A. G. The Group Level Wind Environment in Build-Up Areas //In Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effect on Building and

Structures. - London: Cambridge Univ.Press. - 1976. - P. 403-422.

- [29] Zhu, M., Diao, R., Fu, J., Jiang, X., and Zhang, Y. Study on the influence of key parameters of exterior window structure on building energy saving effect. Paper presented at the IOP

Conference Series: Earth and Environmental Science 675, 2021. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/675/1/012051/pdf>. Doi:10.1088/1755-1315/675/1/012051

Информация об авторах



**Малыренко
Виталий
Андреевич,** Доктор
технических наук,
профессор. Область
научных интересов: анализ
состояния и повышения
эффективности
энергоустановок, разработка
теоретических основ
теплофизики зданий и
энергосбережения, создания
современной концепции
развития ЖКХ. E-mail:
vitaliy.malyarenko@kname.edu.ua



**Орлова
Наталья
Александровна,** кандидат
технических наук,
старший научный
сотрудник. Область
научных интересов:
моделирование
процессов теплообмена
на наружных
конструкциях, разработка
новых подходов по
определению уровня
энергопотребления для
разработки методологий
энергосбережения. E-
mail: naorl@ukr.net



**Алехина
Викторовна,** доктор
технических наук,
старший научный
сотрудник. Область
научных интересов: разработка
научных основ в сфере
энергетики,
усовершенствование научных
основ энергоэффективности
элементов энергетического
оборудования. E-mail:
svitlana.alyokhina@technikum-wien.at