

УДК 536.3

DOI 10.25587/2222-5404-2024-21-1-89-97

## Влияние парникового эффекта на теплопередачу через ограждающие конструкции здания

*А. М. Тимофеев* ✉, *Д. В. Харюзов*

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

✉ am.timofeev@s-vfu.ru

**Аннотация.** Расчет тепlopоступлений через внешние ограждения является важной частью задачи прогнозирования летнего теплового режима здания под прозрачным куполом, интерес к строительству которых в северных регионах в последнее время возрос. Расчет летнего теплового режима здания под куполом осложняется учетом парникового эффекта, требующего решения задачи радиационного теплообмена в системе: непрозрачная стенка – полупрозрачный экран – окружающая среда. Также необходимо принимать во внимание конвекцию в подкупольном пространстве. В работе рассмотрена относительно простая, пригодная для инженерных расчетов модель теплопередачи через стену с полупрозрачным экраном, позволяющая учесть парниковый эффект. Сопоставление расчетов с натурными данными позволяет говорить об адекватности предложенной модели. Показано, что наличие полупрозрачного экрана из-за парникового эффекта приводит к существенному повышению температуры под куполом и увеличению тепловых поступлений в здание. Проведена оценка влияния вентиляции в подкупольном пространстве на тепlopоступления через ограждающую конструкцию для выбранных значений внешних параметров: внешней температуры и солнечной радиации. Предложенная модель теплопередачи через ограждающую конструкцию с полупрозрачным экраном может стать частью более полной модели для расчета теплового режима здания под куполом.

**Ключевые слова:** теплопередача, радиационный теплообмен, полупрозрачный экран, селективные оптические свойства, купольная система, тепловой режим, парниковый эффект, естественная и вынужденная конвекция, вентиляция, математическое моделирование.

**Для цитирования:** Тимофеев А. М., Харюзов Д. В. Влияние парникового эффекта на теплопередачу через ограждающие конструкции здания. Вестник СВФУ. 2024, Т. 21, №1. С. 89–97. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-1-89-97

## Influence of the greenhouse effect on heat transfer through building envelopes

*A. M. Timofeev* ✉, *D. V. Kharyuzov*

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

✉ am.timofeev@s-vfu.ru

**Abstract.** The evaluation of heat input through fences is an important part of the task of predicting the summer thermal regime of a building under a transparent dome, the interest in the construction of which in the northern regions has increased recently. The calculation of the summer thermal regime of a building under a dome is complicated by taking into account the greenhouse effect, which requires solving the problem of radiative heat transfer in the system: opaque wall - semitransparent screen - environment. It is also necessary to take into account the convection in the dome space. A relatively simple model for calculating the characteristics of heat transfer through the wall of a building with a dome, which takes into account the greenhouse effect, is considered in this paper. Comparison of calculations with experimental data allows us to speak about the adequacy of the proposed model.

It is shown that the presence of semitransparent screen due to the greenhouse effect leads to a significant raise in temperature under the dome and an increase in heat input into the building. The influence of ventilation in the dome space on heat access through the enclosing structure for the selected values of external parameters: external temperature and solar radiation was evaluated. The proposed model of heat transfer through the enclosing structure with a semitransparent screen can become part of a more complete model for calculating the thermal regime of a building under a dome.

**Keywords:** heat transfer, radiation, semitransparent screen, selective optical properties, dome system, thermal regime, greenhouse effect, natural and forced convection, mathematical modeling.

**For citation:** Timofeev A. M., Kharyuzov D. V. Influence of the greenhouse effect on heat transfer through building envelopes. Vestnik of NEFU. 2024, Vol. 21, No. 1. Pp. 89–97. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-1-89-97

## Введение

В последнее время возрастает интерес к строительству в северных регионах домов под прозрачным куполом. Преимуществами купольной системы являются способность противостоять сильным ветрам и экстремальным температурам, а также дополнительная аккумуляция в ней энергии солнечного излучения, вызванной парниковым эффектом. Результаты моделирования предсказывают значительное снижение годовой тепловой нагрузки дома при использовании купола по сравнению со случаем незащищенного дома в северных климатических условиях [1–2]. Однако летом из-за парникового эффекта происходит перегрев в подкупольном пространстве, вынуждающий искать решения для охлаждения помещения. Прогноз влияния тех или иных конструктивных решений купольного сооружения на его тепловой режим основывается на математическом моделировании теплообмена в многослойной системе, которое в этом случае становится более сложным, так как, кроме переноса тепла теплопроводностью и конвекцией, нужно учитывать радиационный теплообмен при наличии экрана с селективными оптическими свойствами.

Имеющиеся публикации, рассматривающие теплообмен в купольных сооружениях, основываются в основном на CFD-моделировании (Computational Fluid Dynamics simulation) и сфокусированы на прогнозе распределения температуры и потоков воздуха внутри купольного пространства [2–4]. Однако применение CFD к большому воздушному пространству для динамического моделирования требует значительных вычислительных ресурсов. В то же время актуальными остаются инженерные оценки характеристик теплообмена в многослойной купольной системе с учетом таких сложных явлений, как парниковый эффект [1, 5]. В тепловом балансе зданий существенную роль играют теплопоступления через наружные ограждения. Приток теплоты через ограждения является нестационарным и зависит от изменений температуры наружного воздуха и интенсивности солнечной радиации. В настоящей работе развивается предложенный в [1] подход для расчета теплопередачи через ограждающую конструкцию с полупрозрачным экраном для оценки летнего теплового режима дома под куполом.

## Постановка задачи и метод решения

Рассмотрим фрагмент купольной системы в виде плоской непрозрачной стенки и полупрозрачного экрана, между которыми находится воздушная прослойка (рис. 1). Экран считается прозрачным для падающего внешнего коротковолнового излучения (спектр  $I$ ), которое, проходя через него, нагревает непрозрачную стенку до температуры  $T_2$ . Для данной температуры (ниже 100 °С) исходящее от стенки тепловое излучение располагается в длинноволновой (инфракрасной) области спектра (спектр  $II$ ), где экран

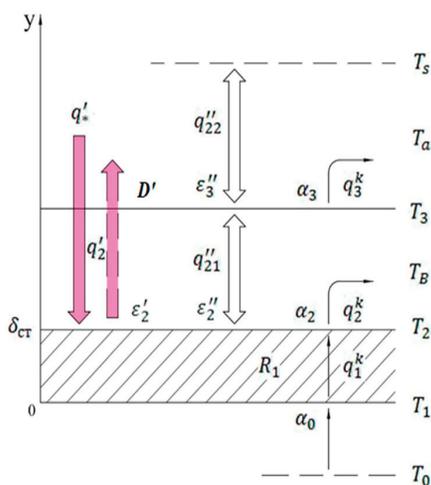


Рис. 1. Схема теплообмена с экраном  
 Fig. 1. Heat transfer scheme with screen

является непрозрачным, ослабляя таким образом радиационное охлаждение стенки. В результате происходит перегрев стенки (и подкупольного пространства) по сравнению со случаем отсутствия экрана.

На внешних границах системы задано условие конвективного теплообмена с окружающей воздушной средой, соответственно с температурой  $T_0$  на внутренней поверхности стенки (температура в помещении) и с температурой  $T_a$  на внешней поверхности экрана (температура окружающей среды).

Постановка задачи включает в себя балансные соотношения для плотности теплового потока на границах стенки и экрана. Плотность теплового потока через стенку дома:

$$q = q_1^k = \frac{T_0 - T_2}{\frac{1}{\alpha_0} + R_1}. \quad (1)$$

На внешней границе стены:

$$q = q_2^k + q_2^I + q_2^{II}, \quad (2)$$

где  $q_2^k$  – плотность конвективного потока на наружной поверхности стенки,  $q_2^I$  и  $q_2^{II}$  – результирующие радиационные потоки в спектре I и в спектре II, соответственно.

На внешней границе экрана:

$$q = q_3^k + q_2^I + q_2^{II}, \quad (3)$$

где  $q_3^k$  – плотность конвективного потока на наружной поверхности экрана,  $q_2^{II}$  – результирующий радиационный тепловой поток между экраном и небесным сводом в спектре II.

Используя законы Ньютона–Рихмана, соотношения для результирующего потока излучения между нечерными (серыми) пластинами, а также считая излучение небесного свода подобным излучению абсолютно черного тела с температурой  $T_s$ , температуру в воздушной прослойке равной  $T_B = (T_2 + T_a)/2$ , приведем систему (1)–(3) к системе из двух нелинейных уравнений для неизвестных  $T_2$  (внешняя температура стенки) и  $T_3$  (температура экрана):

$$(\varepsilon_{23}'' + \varepsilon_3'')\sigma T_3^4 + \alpha_3(T_3 - T_a) = \sigma(\varepsilon_{23}' T_2^4 + \varepsilon_3') + \frac{\alpha_2(T_2 - T_3)}{2} \quad (4)$$

$$\varepsilon_3''\sigma(T_3^4 - T_s^4) + \alpha_3(T_3 - T_a) = \varepsilon_{23}' q_*' + \frac{T_a - T_2}{\frac{1}{\alpha_0} + R_1} \quad (5)$$

Здесь:  $\varepsilon_{23}'$  и  $\varepsilon_{23}''$  – приведенные степени черноты в коротковолновой (спектр I) и длинноволновой (спектр II) частям спектра:

$$\varepsilon_{23}' = \left( \frac{1}{D'} + \frac{1}{\varepsilon_2'} - 1 \right)^{-1}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{23}'' = \left( \frac{1}{\varepsilon_2''} + \frac{1}{\varepsilon_3''} - 1 \right)^{-1}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_2'$  и  $D'$  – степень черноты стенки и коэффициент пропускания экрана в спектре I,  $\varepsilon_2''$  и  $\varepsilon_3''$  – степени черноты стенки и экрана в спектре II, соответственно;  $\alpha_0, \alpha_2, \alpha_3$  – коэффициенты конвективного теплообмена,  $R_1$  – термическое сопротивление стенки,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $q_*$  – плотность потока падающего излучения в коротковолновой части спектра (солнечное излучение). Считается, что радиационный поток является диффузным, оптические свойства также не зависят от направления излучения. Решение системы нелинейных уравнений (1)–(2) может быть получено с помощью вычислительных математических пакетов, в частности в среде MathCad.

Рассмотрим эту же задачу без полупрозрачного экрана (рис. 2) для выявления его влияния на теплообмен. Балансные уравнения при этом упрощаются. К уравнению (1) добавляется соотношение для плотности теплового потока на внешней стенке:

$$q = q_2^k + q_2' + q_2'' \quad (8)$$

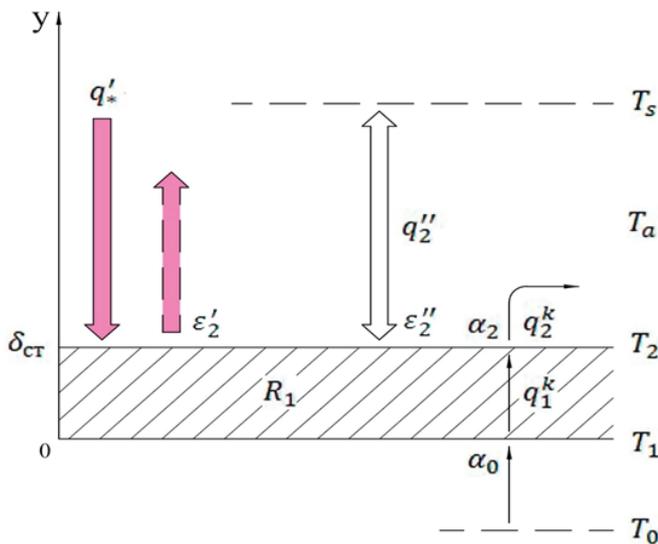
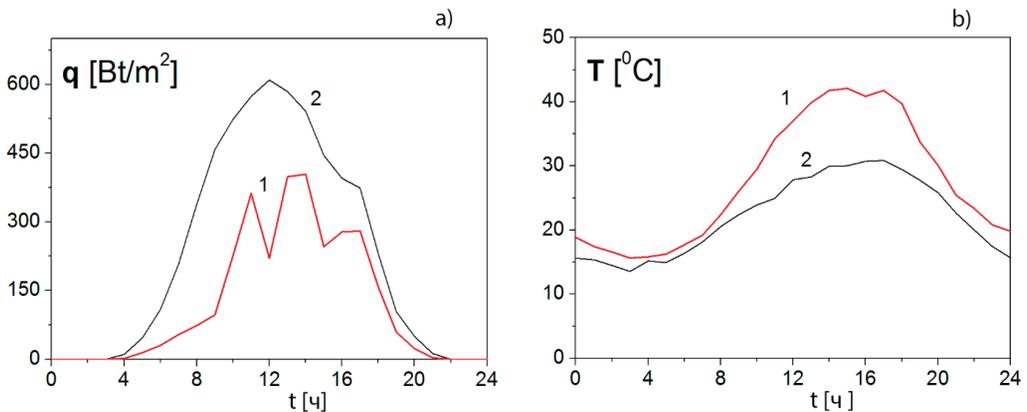


Рис. 2. Схема теплообмена без экрана  
Fig. 2. Heat transfer scheme without screen



**Рис. 3.** Данные суточного мониторинга падающего солнечного излучения (а) и температуры воздуха (б) за 16 июля 2020 г.

Кривая 1 – значение под куполом, кривая 2 – вне купола

**Fig. 3.** Data of daily monitoring of incident solar radiation (a) and air temperature (b) for July 16, 2020.

Curve 1 – under the dome, curve 2 – outside the dome

Из (1) и (8), расписывая аналогичным образом входящие в них компоненты, получаем:

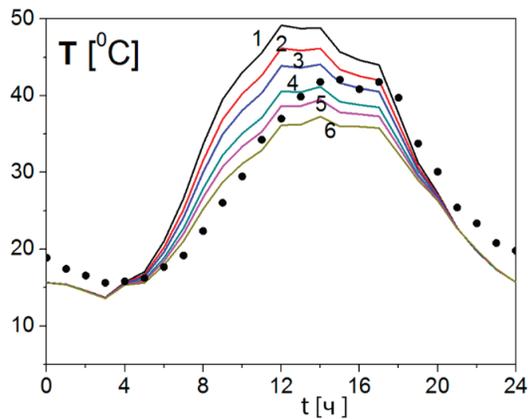
$$\varepsilon_2' q_*' + \frac{T_0 - T_2}{\frac{1}{\alpha_0} + R_1} = \alpha_2 (T_2 - T_a) + \varepsilon_2'' (\sigma T_2^4 - \sigma T_s^4). \quad (9)$$

### Анализ результатов

Расчеты были проведены для следующих значений определяющих параметров задачи, характерных для летнего периода: температура воздуха с внутренней стороны стенки  $T_0 = 27^{\circ}\text{C}$ , температура окружающей среды  $T_a$  и плотность потока падающего излучения  $q_*$  соответствовали данным мониторинга дома под куполом, построенного на испытательном полигоне СВФУ под г. Якутском в 2019 г. (рис. 3). Мониторинг осуществлялся с помощью двух метеорологических станций, одна из которых находилась внутри, другая – снаружи купола. Эти станции в постоянном режиме реального времени с помощью GSM модулей каждый час фиксировали метеопараметры и передавали их на компьютер с двухчасовым интервалом. Провалы на графиках солнечного излучения под куполом (рис. 3а) объясняются затенением прибора от непрозрачного каркаса купола.

Значения коэффициентов  $\alpha_0$  и  $\alpha_3$  приняты равными 8  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$  и 20  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$ , что приблизительно соответствует условиям теплообмена внутри помещения и на наружных стенках при умеренном ветре [6–7]. Оптические свойства стенки и экрана: степень черноты стенки и экрана в обоих диапазонах спектра 0,85 и 0,9, соответственно; средний коэффициент пропускания экрана составляет – 0.522 (рассчитан из данных мониторинга).

Как уже было отмечено, тепловой режим здания в значительной мере формируется под действием теплоступлений через наружные ограждения, которые в свою очередь зависят от изменений температуры наружного воздуха. Для здания под куполом это температура воздуха подкупольного пространства, которая формируется под действием парникового эффекта и зависит от интенсивности солнечной радиации и оптических свойств полупрозрачного экрана. Также на температуру воздуха  $T_g$  оказывает влияние воздушный режим подкупольного пространства, зависящий от геометрии и внутренней планировки, температуры внутреннего и наружного воздуха, скорости ветра, показателей проводимости воздуха. Таким образом, для определения  $T_g$  нужен тепловой расчет для всего подкупольного пространства на основе теплового баланса системы: помещение



**Рис. 4.** Температура воздуха под куполом для различных значений коэффициента теплоотдачи.

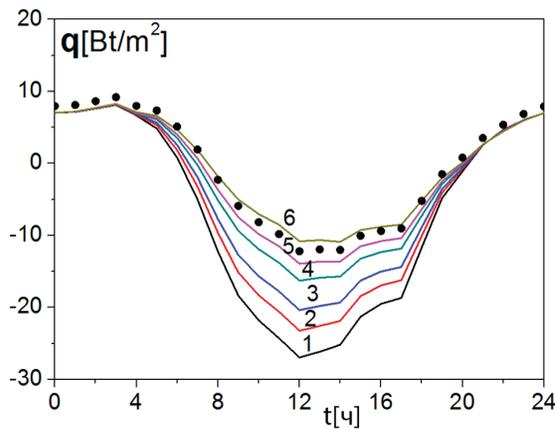
1, 2, 3, 4, 5, 6 –  $\alpha_2 = 3, 6, 9, 15, 20, 30 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ;

маркеры – данные мониторинга

**Fig. 4.** Air temperature under the dome for different values of heat transfer coefficient.

1, 2, 3, 4, 5, 6 –  $\alpha_2 = 3, 6, 9, 15, 20, 30 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ;

Markers – monitoring data



**Рис. 5.** Плотность результирующего теплового потока для различных значений коэффициента теплоотдачи.

1, 2, 3, 4, 5, 6 –  $\alpha_2 = 3, 6, 9, 15, 20, 30 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ;

маркеры – расчет без экрана

**Fig. 5.** Density of the resulting heat flux for different values of the heat transfer coefficient.

1, 2, 3, 4, 5, 6 –  $\alpha_2 = 3, 6, 9, 15, 20, 30 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ;

markers – screen calculation

– купол – окружающее пространство. Такая постановка задачи, основанная на сложной математической модели, требует привлечения значительных вычислительных ресурсов.

В данной работе рассмотрена упрощенная модель теплопередачи через плоскую ограждающую конструкцию с экраном, где конвекция в подкупольном пространстве учитывается с помощью задания коэффициента теплообмена  $\alpha_2$ . Рис. 4 демонстрирует поведение температуры воздуха под куполом для его различных значений. Как видно, несмотря на принятые упрощения, расчетные данные сопоставимы с натурными.

На рис. 5 приведены результаты расчетов плотности результирующего теплового потока, на основе которых в таблице приведены значения суточных теплоступле-

ний  $Q = \int_0^{24} q(t) dt$ . Наличие полупрозрачного экрана приводит к значительному перегреву помещения из-за парникового эффекта. При естественной конвекции воздуха в подкупольном пространстве ( $\alpha_2=3\div 9$  Вт/м<sup>2</sup>·К) теплопоступления через внешние ограждающие конструкции увеличиваются по сравнению с отсутствием экрана ( $Q = 86.74$  Дж/м<sup>2</sup>) в 5–7 раз.

Для решения проблемы перегрева помещения в летний период обычно используются системы вентилирования и кондиционирования помещений. Применение систем кондиционирования значительно увеличивает общую стоимость сооружения здания. Экономически целесообразными являются конструктивно-планировочные меры на основе естественной и искусственной вентиляции. Выбор системы вентиляции основывается на общем анализе воздушного и теплового режима здания и сводится к сложной задаче определения оптимальной совокупности различных отопительно-вентиляционных и конструктивно-планировочных решений. В данной работе проведен упрощенный анализ, основанный на том, что механическая (искусственная) вентиляция приводит к интенсификации конвективного теплообмена на стенке в результате увеличения скорости движения воздуха и, соответственно, к росту коэффициента теплоотдачи  $\alpha_2$ .

Как следует из проведенных расчетов, для значений коэффициента теплоотдачи, соответствующих принудительной конвекции ( $\alpha_2=15, 20, 30$  Вт/м<sup>2</sup>·К), происходит значительное снижение температуры воздуха в подкупольном пространстве (кривые 4, 5, 6 на рис. 4), и, как следствие, значения теплового потока приближаются к значениям, рассчитанным для стенки без экрана (маркеры на рис. 5). Соответственно снижаются суточные теплопоступления, которые начинают приближаться к значению суточного теплопоступления через стенку без экрана.

Таблица

**Суточные теплопоступления  $Q$**

Table

**Daily heat inputs  $Q$**

$\alpha_2$ [Вт/м <sup>2</sup> ·К]	3	6	9	15	20	30
$Q$ [Дж/м <sup>2</sup> ]	651.67	516.35	414.33	272.26	192.17	87.40

Величина коэффициента теплоотдачи связана со скоростью обтекающего потока. Для указанных значений коэффициента теплоотдачи можно провести оценку скорости настилающей струи воздуха из формулы, рекомендованной институтом CIBS [8]:  $\alpha_2 = 5.8 + 4.1 \cdot V$ .

Полученные значения скорости воздуха ( $V = 2, 2, 3, 5, 5, 9$  м/с) могут быть использованы для организации воздушного режима здания под куполом.

**Заключение**

Результаты расчетов и данные мониторинга свидетельствуют о том, что парниковый эффект играет заметную роль в теплообмене в купольной системе. Наличие прозрачного экрана приводит к существенному повышению температуры стенки и увеличению теплопоступлений в помещение по сравнению со случаем его отсутствия.

Расчет теплопоступлений через ограждения является важной частью задачи прогнозирования летнего теплового режима здания. В работе рассмотрена относительно простая, пригодная для инженерных расчетов модель теплопередачи через ограждающую конструкцию с полупрозрачным экраном, позволяющая учесть парниковый эффект.

Полученное согласие экспериментальных и расчетных данных подтверждает адекватность предложенной модели, учитывая принятые в ней упрощающие допущения:

- расчеты проведены для плоской стенки облученного фрагмента наружного ограждения, без учета влияния на теплообмен необлученной (затененной) части купольной системы;
- при расчетах лучистого теплообмена, спектр излучения был рассмотрен в двухполосном приближении: коротковолновом и длинноволновом;
- оптические свойства экрана определены приближенно.

Конвекция в подкупольном пространстве учитывалась с помощью задания значения коэффициента теплообмена  $\alpha_2$ . Точные значения коэффициента теплообмена могут быть получены из моделирования естественной или принудительной циркуляции воздушных масс в подкупольном пространстве, рассмотрение которого выходит за рамки настоящего исследования. Тем не менее расчеты на основе предложенной упрощенной модели подтверждают, что вентиляция на основе естественной конвекции является недостаточной для организации приемлемого летнего теплового режима в купольных сооружениях [3].

Из проведенного анализа следует, что принудительная вентиляция в подкупольном пространстве позволяет создать необходимый температурный режим в летнее время в помещении. С помощью предложенной модели рассчитана скорость циркуляции воздушных масс в подкупольном пространстве для выбранных значений внешних параметров: внешней температуры и солнечной радиации.

Предложенная модель теплопередачи через ограждающую конструкцию с полупрозрачным экраном может стать частью более полной модели для расчета летнего теплового режима здания под куполом, где тепловой баланс купольного сооружения должен включать в себя суточные тепловые поступления через все стены здания – облученные и необлученные, с учетом размеров здания и купола. Также необходимо принимать во внимание теплообмен подкупольного воздуха с поверхностью земли, в которой идут процессы протаивания. Указанные задачи должны стать предметом дальнейших исследований.

### Л и т е р а т у р а

1. Timofeev, A. M., Prokopiev, A.R. and Alekseeva, E.N. (2021). Effect of Semitransparent Screen on Heat Transfer through a Flat Wall. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. [online], 666(3). Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/666/3/032089>.
2. Lin, Y., Zmeureanu, R. (2008). Three-dimensional thermal and airflow (3D-TAF) model of a dome-covered house in Canada. *Renewable Energy*, 33(1), pp. 22–34.
3. Soleimani, Z., Calautit, J.K. and Hughes, B.R. (2016). Computational Analysis of Natural Ventilation Flows in Geodesic Dome Building in Hot Climates. *Computation*. [Online], 4(3), p. 31. Available from: <https://www.mdpi.com/2079-3197/4/3/31> [Accessed 17 August 2016].
4. Lin, Y. and Zmeureanu, R. (2008). Computer model of the airflow and thermal phenomena inside a large dome. *Energy and Buildings*, 40(7). pp. 1287-1296.
5. Тимофеев, А. М. Расчет теплопередачи через ограждающую конструкцию с полупрозрачным экраном / А. М. Тимофеев, Д. В. Харюзов // Вестник Северо-Восточного федерального университета. – 2022. – № 4 (90). – С. 40–47.
6. Mirsadeghi, M., Cóstola, D. et al. (2013). Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: implementation and uncertainty. *Appl Therm Eng.*, 56(1-2), pp.134–51.
7. Defraeye, T., Blocken, B. and Carmeliet, J. (2011). Convective heat transfer for exterior building surfaces: existing correlations and CFD modelling. *Energy Conversion and Management*, 52(1), pp. 512–22.
8. Chartered Institute of Building Services. (2015). (updated 2021). *Guide A Environmental design*. London: CIBS.

### References

1. Timofeev, A. M., Prokopiev, A.R. and Alekseeva, E.N. (2021). Effect of Semitransparent Screen on Heat Transfer through a Flat Wall. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. [online], 666(3). Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/666/3/032089>.
2. Lin, Y. and Zmeureanu, R. (2008). Three-dimensional thermal and airflow (3D-TAF) model of a dome-covered house in Canada. *Renewable Energy*, 33(1), pp. 22–34.
3. Soleimani, Z., Calautit, J.K. and Hughes, B.R. (2016). Computational Analysis of Natural Ventilation Flows in Geodesic Dome Building in Hot Climates. *Computation*. [online], Volume 4(3), p. 31. Available from: <https://www.mdpi.com/2079-3197/4/3/31> [Accessed 17 August 2016].
4. Lin, Y. and Zmeureanu, R. (2008). Computer model of the airflow and thermal phenomena inside a large dome. *Energy and Buildings*, 40(7). pp. 1287–1296.
5. Timofeev, A.M. and Khariuzov, D.V. (2022). Calculation of heat transfer through the enclosing structure with a semitransparent screen. *Vestnik of NEFU*, 4(90), pp. 40–47. (in Russian)
6. Mirsadeghi, M., Cóstola, D. et al. (2013). Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: implementation and uncertainty. *Appl Therm Eng.*, 56(1-2), pp. 134–51.
7. Defraeye, T., Blocken, B., Carmeliet, J. (2011). Convective heat transfer for exterior building surfaces: existing correlations and CFD modelling. *Energy Conversion and Management*, 52(1), pp. 512–22.
8. Chartered Institute of Building Services. (2015). (updated 2021). *Guide A Environmental design*. London: CIBS.

---

*ТИМОФЕЕВ Айал Михайлович* – д. ф.-м. н., проф. каф. теплофизики и теплоэнергетики ФТИ, СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: [am.timofeev@s-vfu.ru](mailto:am.timofeev@s-vfu.ru)

*ТИМОФЕЕВ Айал Михайлович* – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Thermophysics and Thermal Power Engineering, Institute of Physics and Technologies, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

*ХАРИУЗОВ Дмитрий Владимирович* – аспирант кафедры теплофизики и теплоэнергетики ФТИ, СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: [dima\\_haruzov@mail.ru](mailto:dima_haruzov@mail.ru)

*KHARYUZOV Dmitry Vladimirovich* – Postgraduate of the Department of Thermophysics and Thermal Power Engineering, Institute of Physics and Technologies, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.