

УДК 697.1

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-112-119

*А.Н. БЕЛОУС<sup>1</sup>, Л.З. КУЛУМБЕГОВА<sup>2</sup>, О.Е. БЕЛОУС<sup>1</sup>,**<sup>1</sup>Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,**<sup>2</sup>Юго-Осетинский государственный университет им. А.А. Тибилова*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТИ МАЛОИНЕРЦИОННЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

В статье на примере расчета теплоустойчивости сэндвич-панели в летний период года поднимается вопрос о несовершенстве теории теплоустойчивости.

На основании выполненного сравнительного анализа алгоритма расчета внутреннего теплоусвоения материала определены главные различия методик расчета. Приводятся результаты расчета согласно классической теории и инженерной нормативной методике, а также результаты численного моделирования в программном комплексе ELCUT 6.4. Произведен сравнительный анализ амплитуды колебания температуры на внутренней поверхности сэндвич-панели.

Приведены аргументы о необходимости дальнейшего изучения нестационарного режима теплопередачи относительно ограждающих конструкций.

**Ключевые слова:** теплоустойчивость; нестационарная теплопередача; ограждающие конструкции.

**Для цитирования:** Белоус А.Н., Кулумбегова Л.З., Белоус О.Е. Определение теплоустойчивости малоинерционных ограждающих конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 4. С. 112–119.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-112-119

*A.N. BELOUS<sup>1</sup>, L.Z. KULUMBEGOVA<sup>2</sup>, O.E. BELOUS<sup>1</sup>,**<sup>1</sup>Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,**<sup>2</sup>South Ossetian State University*

## **HEAT STABILITY OF LOW-INERTIA BUILDING ENVELOPES**

The paper deals with the problem of imperfection of the theory of heat stability based on the analysis of heat stability of sandwich panels in the summer period. Different methods of calculation of the heat stability are proposed based on the comparative analysis of the material inner heat absorption. Calculations are conducted in accordance with the classical theory and engineering normative procedure and using the results of numerical simulation in ELCUT Pro 6. 4 software. The comparative analysis is given to the temperature fluctuation amplitude on the inner surface of a sandwich panel. Further research is required for the non-stationary mode of heat transfer in building envelopes.

**Keywords:** heat stability; non-stationary heat transfer; building envelopes.

**For citation:** Belous A.N., Kulumbegova L.Z., Belous O.E. Opredelenie teploustoichivosti maloinertsionnykh ograzhdayushchikh konstrukttsii [Heat stability of low-inertia building envelopes]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 4. Pp. 112–119.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-112-119

## Введение

Нельзя отрицать, что XXI в. – это, прежде всего, век скорости, которая правит и навязывает всем правила игры. Скорость правит не только в современных высокотехнологичных отраслях, таких как мультимедиа, производство и транспортировка, но и все чаще в отраслях, которые всегда были консервативны, – медицина и строительство. В строительной отрасли при выборе конструктивного решения и материалов заказчики отдают предпочтение тем, которые позволяют сократить срок строительства. В большинстве случаев в качестве наружных ограждающих конструкций применяются сэндвич-панели, которые обладают рядом положительных факторов: быстрота и простота монтажа, высокое сопротивление теплопередаче, небольшая цена, большая цветовая гамма и минимальные затраты на обслуживание в период эксплуатации. Однако не стоит забывать, что данная конструкция обладает малой тепловой инерцией  $D = 0,4 \dots 0,6$ .

Теоретические основы для расчета теплоустойчивости ограждающих конструкций заложили в своих трудах ученые К.Ф. Фокин [1] и В.Н. Богословский [2]. На основании предложенной теории теплоустойчивости были разработаны инженерные методы расчета.

Большой вклад в вопросы теплоустойчивости внес А.М. Шкловер в 60-х гг. XX в. В своих трудах он решил многие задачи, связанные с теплоустойчивостью ограждающих конструкций. В частности, была определена зависимость между конструктивным решением стен и теплоустойчивостью [3, 4].

Развитие методики расчета теплоустойчивости продолжили в своих трудах современные российские ученые [5–9], которые предложили различные подходы к решению отдельных задач. Некоторыми аспектами нестационарного режима наружных ограждающих конструкций в летний период занимались и зарубежные ученые [10–12].

В статьях [13, 14] отмечается, что при натурных исследованиях и компьютерном моделировании нестационарного процесса теплопередачи в ограждающих конструкциях получены результаты, не соответствующие теоретическим расчетам, согласно классической теории теплопередачи и инженерного метода расчета [15].

Целью настоящего исследования является корректировка существующей нормативной методики расчета теплоустойчивости ограждающих конструкций в летний период года.

## Методы

Основным показателем теплоустойчивости наружных ограждающих конструкций является амплитуда колебания температуры на внутренней поверхности  $A$ , К. Амплитуда колебания на внутренней поверхности находится как отношение расчетной амплитуды колебания температуры наружного воздуха  $A_{\text{расч}}$ , К, к коэффициенту затухания амплитуды в ограждающей конструкции  $V$ .

Определение величины расчетной амплитуды колебания температуры наружного воздуха не вызывает сложностей, т. к. она зависит от климатиче-

ских параметров: максимальной суточной амплитуды колебания температуры, максимальной и средней солнечной радиации и коэффициента теплоотдачи наружной поверхности в летний период. Коэффициент затухания амплитуды температуры равен

$$\nu = 0,9e^{\frac{D}{\sqrt{2}}} \frac{(s_1 + \alpha_B)(s_2 + Y_1) \dots (s_i + Y_{i-1})(s_{N-1} + Y_{N-2})(\alpha_H + Y_N)}{(s_1 + Y_1)(s_2 + Y_2) \dots (s_i + Y_i)(s_N + Y_N)\alpha_H}, \quad (1)$$

где  $s$  – теплоусвоение материала  $Y$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $D$  – тепловая инерция материала;  $Y$  – теплоусвоение внутренней поверхности материала, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Однако при определении теплоусвоения внутренней поверхности в ограждающей конструкции необходимо использовать алгоритм, который учитывает тепловую инерцию. При этом у авторов [15] и [1, 2] в алгоритме есть большое различие между определением внутренней поверхности относительно конструкций с суммарным коэффициентом тепловой инерции меньше 1.

Алгоритм расчета теплоусвоения поверхности слоя:

1. Слой резких колебаний полностью расположен в слое ограждения. Это будет в том случае, если показатель тепловой инерции слоя  $D_1 = R_1 s_1 \geq 1$ , соответственно теплоусвоение внутренней поверхности ограждения будет равно коэффициенту теплоусвоения материала первого слоя, т. е.  $Y_B = s_1$ .

2. Показатель тепловой инерции  $i$ -го слоя  $D_i = R_i s_i < 1$ , тогда:

$$\text{– для первого слоя } Y_1 = \frac{R_1 s_1^2 + \alpha_B}{1 + R_1 \alpha_2}; \quad (2)$$

$$\text{– для } i\text{-го слоя } Y_i = \frac{R_i s_i^2 + Y_{i-1}}{1 + R_i Y_{i-1}}. \quad (3)$$

3. Конструкция малоинерционная  $\sum_{i=1}^n D_i < 1$  – в нормативных документах

[15] отсутствуют рекомендации, и последний  $n$ -й слой рассчитывается согласно формуле (3). У авторов [1–4, 6, 13] предлагается вести расчет последнего  $n$ -го слоя с учетом коэффициента теплоотдачи наружной поверхности:

$$Y_n = \frac{R_n s_n^2 + \alpha_H}{1 + R_n \alpha_H}. \quad (4)$$

Для подтверждения или опровержения правильности третьего пункта алгоритма возможно провести лабораторные исследования конструкций с малой инерционностью или смоделировать нестационарный процесс теплопередачи в программном комплексе ELCUT 6.4, который дает большую достоверность при расчетах ограждающих конструкций с теплопроводными включениями [13].

### Результаты исследования

Рассмотрим в качестве наружной ограждающей конструкции сэндвич-панель, используемую в г. Цхинвале. Климатические параметры для июля: ГСОП – 2741, средняя температура наружного воздуха – 22 °С, максимальная амплитуда колебания температуры наружного воздуха – 19,9 °С, максимальная солнечная радиация – 748 Вт/м<sup>2</sup>, средняя солнечная радиация – 175 Вт/м<sup>2</sup>, скорость ветра – 4,5 м/с.

Согласно [15], требуемое сопротивление теплопередаче для стен  $R = 2,02$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт, исходя из этого принимаем толщину сэндвич-панели, с коэффициентом теплопередаче утеплителя  $\lambda = 0,045$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), равной 90 мм. Толщины наружного и внутреннего профилированного листа равны 0,8 мм.

Для данной конструкции произведем расчет теплотехнических показателей двумя методиками, результаты расчета представлены в таблице.

### Результаты расчета теплотехнических показателей сэндвич-панели в летний период

Теплотехнический показатель	Согласно методике [15]	Согласно методике [1, 2]
Теплоусвоение внутренней поверхности слоя № 1, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	8,90	8,90
Теплоусвоение внутренней поверхности слоя № 2, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	0,48	0,48
Теплоусвоение внутренней поверхности слоя № 3, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	0,69	24,90
Коэффициент затухания амплитуды температуры	16,58	27,11
Амплитуда температуры на внутренней поверхности, °С	1,83	1,12

Произведем моделирование воздействия нестационарного теплового потока на сэндвич-панель в программном комплексе ELCUT 6.4. Результаты моделирования представлены на рисунке.

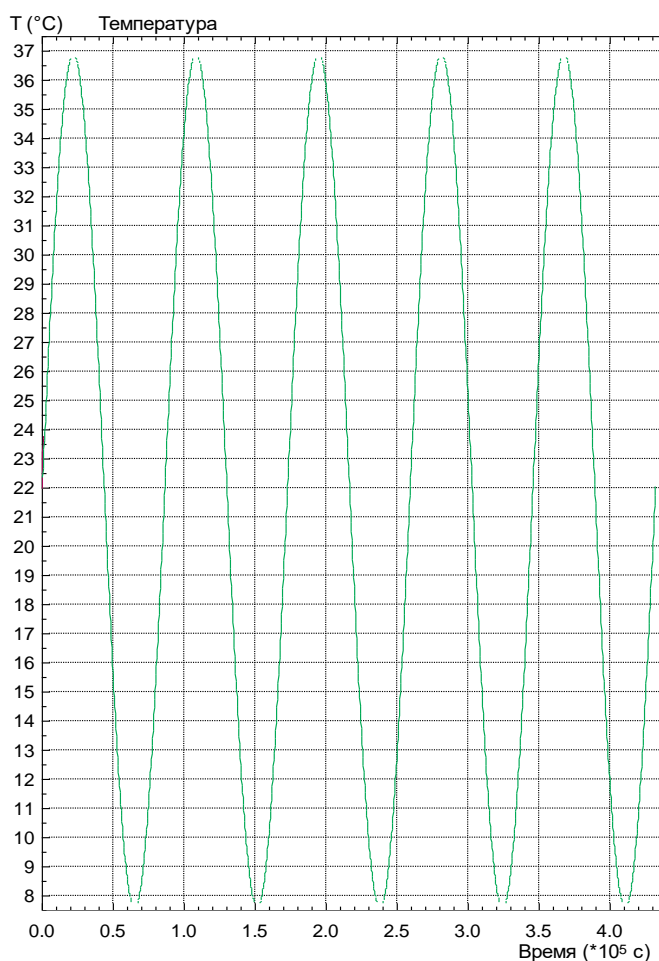


График колебания температур на наружной и внутренней поверхности сэндвич-панели

При этом необходимо отметить, что для получения точных данных согласно рекомендациям [13], произведем моделирование пяти суточных циклов, при этом первые два цикла не будут браться в дальнейших расчетах. На рисунке показаны колебания температуры на поверхностях на протяжении 5 сут. Для трёх последних суточных циклов для наружной поверхности амплитуда колебания равна  $28^{\circ}\text{C}$ , а для внутренней поверхности сэндвич-панели  $1,5^{\circ}\text{C}$  соответственно.

### Заключение

Как видно из результатов расчетов двумя методиками, разница при определении теплоусвоения внутренней поверхности материала третьего слоя сэндвич-панели отличается в 36 раз, при этом коэффициент затухания колебания амплитуды температуры в ограждающей конструкции отличается в 1,64 раза. Как следствие, мы имеем амплитуду колебания температуры на внутренней поверхности согласно нормативной методике [15], равную  $1,83^{\circ}\text{C}$ , и согласно

классической теории с учетом теплообмена у внутренней поверхности  $1,12\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно.

Если взять предположение, что классическая методика [1, 2] показывает более точный результат, соответственно, нормативная методика тогда показывает завышенные показатели амплитуды колебания температуры на внутренней поверхности. Но это повлечёт за собой перерасход материала и, как следствие, удорожание объекта.

К сожалению, результаты численного моделирования сэндвич-панели в условиях нестационарной теплопередачи не вносят ясность в достоверность той или иной методики, т. к. согласно вычислениям амплитуда колебания температуры на внутренней поверхности равна  $1,50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Данное значение меньше результата, полученного по нормативной методике [15], на 18 % и выше, чем значение, рассчитанное по методике [1, 2], на 34 %.

Данное исследование показывает, что теория теплоустойчивости в классическом виде, а также производные из неё инженерные методики требуют доработки с учетом новых аспектов: буферизации тепла в толще ограждающей конструкции [12], несходимости теоретических расчётов и натурных исследований светопрозрачных ограждающих конструкций и различия между теоретическими расчетами и результатами численного моделирования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фокин К.Ф.* Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. 5-е изд., пересмотр. Москва : АВОК-ИРЕСС, 2006. 256 с.
2. *Богословский В.Н.* Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). Москва : Высшая школа, 1982. 415 с.
3. *Шкловер А.М.* Теплоустойчивость зданий. Москва : Гос. изд. лит. по стр. и арх., 1952. 90 с.
4. *Шкловер А.М.* Теплопередача при периодических тепловых воздействиях. Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1961. 160 с.
5. *Кошлатый О.Б.* Зависимость теплоустойчивости наружных стен от их конструктивного решения // Новые идеи нового века : материалы Международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2013. Т. 2. С. 357–360.
6. *Малявина Е.Г., Усманов Ш.З.* Ограничение амплитуды колебаний температуры помещения в теплый период года // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 188–194.
7. *Горшков А.С., Рымкевич П.П.* Диаграммный метод описания процесса нестационарной теплопередачи // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 8 (60). С. 68–82.
8. *Панферов В.И., Панферов С.Ф.* Применение метода частотных передаточных функций для решения одной задачи теплоустойчивости ограждения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Строительство и архитектура. 2015. Т. 15. № 1. С. 48–51.
9. *Кутуев М.Д., Манапбаев И.К.* Использование метода интерполирования для расчета теплоустойчивости ограждающих конструкций в условиях Кыргызстана // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17. № 5. С. 157–159.
10. *Deconinck A., Roels S.* The as-built thermal quality of building components: characterising non-stationary phenomena through inverse modelling // Energy Procedia. 2017. October. V. 132. P. 351–356.
11. *Rulik S., Wróblewski W., Majkut M., Strozik M., Rusin K.* Experimental and numerical analysis of heat transfer within cavity working under highly non-stationary flow conditions // Energy. 2020. January. V. 190:116303.
12. *Stolarska A., Strzalkowski J.* Modelling of Edge Insulation Depending on Boundary Conditions for the Ground Level // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2017. October. V. 245 (4):042003.

13. Белоус А.Н., Белоус О.Е., Крахин С.В. Перераспределение теплового потока в толще ограждающей конструкции при суточном цикле летнего периода // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 96–104. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-96-104
14. Белоус А.Н. Оценка тепловой надежности витражной системы «Spider» // Современное промышленное и гражданское строительство. 2009. Т. 5. № 3. С. 99–105.
15. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Москва : Министерство регионального развития РФ, 2012. 82 с.

## REFERENCES

1. Fokin K.F. Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastei zdaniy [Heat engineering of building enclosures]. Yu.A. Tabunshchikov and V.G. Gagarin Eds., 5th ed., Moscow: AVOK-PRESS, 2006. 256 p. (rus)
2. Bogoslovskii V.N. Stroitel'naya teplofizika (teplofizicheskie osnovy otopleniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha [Building thermophysics (thermal physics of heating, ventilation and air conditioning)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1982. 415 p. (rus)
3. Shklover A.M. Teploustoichivost' zdaniy [Thermal stability of buildings]. Moscow: Gosstroizdat, 1952. 90 p. (rus)
4. Shklover A.M. Teploperedacha pri periodicheskikh teplovykh vozdviizheniyakh [Heat transfer under periodic thermal influences]. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat, 1961. 160 p. (rus)
5. Koshlatyi O.B. Zavisimost' teploustoichivosti naruzhnykh sten ot ikh konstruktivnogo resheniya [Dependence of thermal resistance of exterior walls on their design]. In: Novye idei novogo veka: materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Proc. Int. Sci. Conf. 'New Ideas of New Century'). 2013. V. 2. Pp. 357–360. (rus)
6. Malyavina E.G., Usmanov Sh.Z. Ogranichenie amplitudy kolebaniy temperatury po-meshcheniya v teplyi period goda [Limiting the amplitude of room temperature fluctuations during summer period]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2017. No. 2(61). Pp. 188–194. (rus)
7. Gorshkov A.S., Rymkevich P.P. Diagrammnyi metod opisaniya protsessa nestatsionarnoi teploperedachi [Diagrammatic method for describing an unsteady heat transfer process]. Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal. 2015. No. 8 (60). Pp. 68–82. (rus)
8. Panferov V.I., Panferov S.F. Primenenie metoda chastotnykh peredatochnykh funktsii dlya resheniya odnoi zadachi teploustoichivosti ograzhdeniya [Method of frequency transfer functions to solve a single heat resistance problem of building envelope]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura. 2015. V. 15. No. 1. Pp. 48–51. (rus)
9. Kutuev M.D., Manapbaev I.K. Ispolzovanie metoda interpolirovaniya dlya rascheta teploustoichivosti ograzhdayushchikh konstruktov v usloviyakh Kyrgystana [Interpolation method for thermal resistance analysis of building envelopes in Kyrgyzstan]. Vestnik KRSU. 2017. V. 17. No. 5. Pp. 157–159. (rus)
10. Deconinck A., Roels S. The as-built thermal quality of building components: characterising non-stationary phenomena through inverse modelling. Energy Procedia. 2017. V. 132. Pp. 351–356.
11. Rulik S., Wróblewski W., Majkut M., Stozik M., Rusin K. Experimental and numerical analysis of heat transfer within cavity working under highly non-stationary flow conditions. Energy. 2020. V. 190, 116303.
12. Stolarska A., Strzalkowski J. Modelling of Edge Insulation Depending on Boundary Conditions for the Ground Level. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2017. V. 245. No. 4. 042003.
13. Belous A.N., Belous O.E., Krakhin S.V. pereraspredelenie teplovogo potoka v tolshche ograzhdayushchei konstruktivnoi pri sutochnom tsikle letnego perioda [Heat flow redistribution in wall structure during diurnal cycle in summer]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 96–104. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-96-104
14. Belous A.N. Otsenka teplovoi nadezhnosti vitrazhnoi sistemy "Spider" [Assessment of thermal reliability of "Spider" stained glass system]. Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2009. V. 5. No. 3. Pp. 99–105. (rus)

15. SP 50.13330.2012. Teplovaya zashchita zdaniy [Thermal protection of buildings]. Moscow, 2012. 82 p. (rus)

#### Сведения об авторах

*Белоус Алексей Николаевич*, канд. техн. наук, доцент, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 286123, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, 2, us28@ya.ru

*Кулумбегова Лонда Зауровна*, ст. преподаватель, Юго-Осетинский государственный университет им. А.А. Тибилова, 100001, Республика Южная Осетия, г. Цхинвал, ул. Путина (бывшая ул. Московская), 8, londalonda1965@mail.ru

*Белоус Ольга Евгениевна*, ассистент, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 286123, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, 2, ol-0929@mail.ru

#### Authors Details

*Aleksei N. Belous*, PhD, A/Professor, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., Donetsk Region, 86123, Makiivka, Donetsk People's Republic, us28@ya.ru

*Londa Z. Kulumbegova*, Senior Lecturer, South Ossetian State University, 8, Putin Str., 100001, Tskhinvali, Republic of South Ossetia, londalonda1965@mail.ru

*Ol'ga E. Belous*, Assistant Lecturer, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., Donetsk Region, 86123, Makiivka, Donetsk People's Republic, ol-0929@mail.ru