

Разработка аналитической методики расчета температурных полей и влажностного режима новой энергоэффективной ограждающей конструкции

¹*ЖАҢАБАЙ Нұрлан Жаңабайұлы, к.т.н., профессор, Nurlan.Zhanabay777@mail.ru,

¹ТҰРСҰНҚҰЛҰЛЫ Тимур, PhD, доцент, Timurtursunkululy@gmail.com,

¹ИБРАИМОВА Ұлжан Бахытжанқызы, PhD, старший преподаватель, ibraimova_uljan@mail.ru,

¹УТЕЛБАЕВА Акмарал Болысбековна, д.х.н., ассоциированный профессор, mako_01-777@mail.ru,

¹БАХБЕРГЕН Султан, магистрант, sultan4ik.pro02@gmail.com,

¹НАО «Южно-Казахстанский университет имени Мухтара Ауэзова», пр. Тауке хана, 5, Шымкент, Казахстан,

*автор-корреспондент.

Аннотация. В данном исследовании в качестве новизны решения наружного ограждения в теплоизоляционный слой конструкции были внесены теплоотражающие покрытия с одновременным наличием вентилируемой и замкнутой прослойки. Внесенные изменения в конструкцию предполагают благоприятное влияние на энергосбережение через ограждения. Учитывая эти особенности конструкции на основе способа итерации был разработан аналитический метод расчета новой конструкции. Полученный метод может быть предпосылкой для составления программы для персонального компьютера. Разработанный метод расчета позволяет проводить расчеты температурных полей и влажностного режима новой конструкции. Вместе с тем разработанный метод расчета положительно дополняет существующие методики и может использоваться научно-техническими сообществами, а также в учебном процессе.

Ключевые слова: энергоэффективность, наружное ограждение, методика расчета, температурные поля, влажностный режим.

Введение

Наружная оболочка зданий по мере развития человечества изменилась достаточно кардинально, от обычных горных природных камней, глиняных блоков или деревянных брусков до инновационных современных наружных ограждений [1]. Разработка и исследование наружных оболочек зданий быстрыми темпами особенно наблюдается последние десятилетия в национальном и международных масштабах. В силу климатических особенностей местности ученые и инженеры с целью энергосбережения и создания комфортных условий в помещении зданий применяют различные виды конструктивных решений наружных ограждений [2]. Так, в работе [3] были проведены полевые натурные экспериментальные испытания и испытания на модели стеновой

конструкции процессов вентиляционной сушки с учетом скорости воздухообмена в прослойке. Результаты показали, что прослойка шириной 40 мм обеспечивает в 20-25 раз больший потенциал сушки относительно прослойки шириной 5 мм. В работе [4] обсуждается возможность добавления второй воздушной камеры, где обе соединены нижней частью фасада и с устройством наверху для регулирования потока воздуха в камерах в зависимости от температуры между внутренней и внешней частью здания. Установлено, что предлагаемая система позволяет повысить эффективность на 38% по сравнению с обычным вентилируемым фасадом с закрытым швом. В исследовании [5] дано представление о преимуществах многослойной теплоизоляции в зданиях, размещенных в сочетании с двумя воздуш-

ными зазорами. Был разработан численный подход для определения влияния толщины воздушного зазора на общее тепловое сопротивление многослойной стенки. Исследование [6] посвящено влиянию замкнутых воздушных прослоек в двойных стенах на теплоизолирующие свойства ограждения, где установлено, что увеличение толщины прослойки приводит к асимптотическому росту теплового сопротивления ограждения, а оптимальной толщиной прослойки является значение 6 см, которое даёт снижение теплопотерь на 19,45% по сравнению с 1-сантиметровой прослойкой.

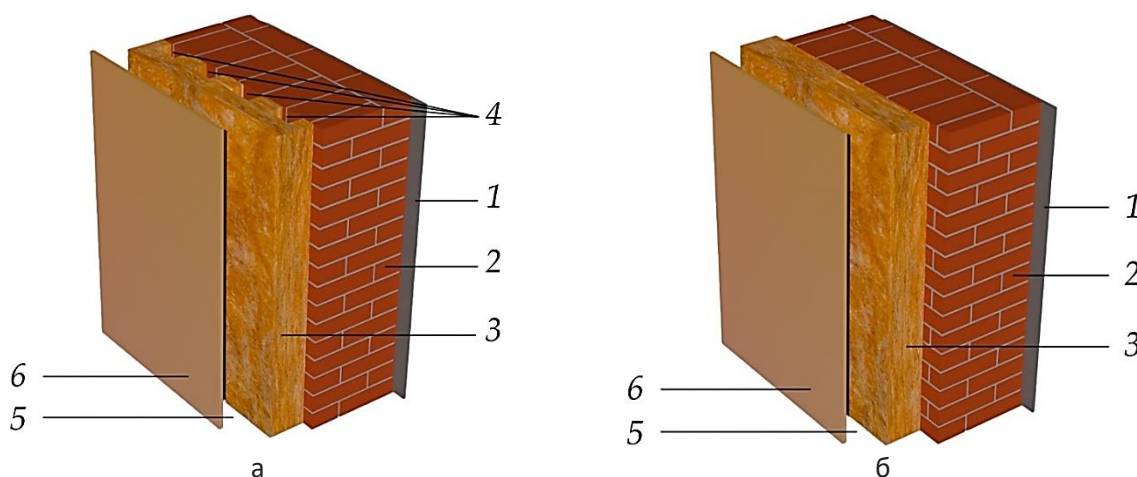
Проведенный обзор работ разработки новых энергоэффективных конструкций, а также методики расчета с учетом теплофизических и геометрических параметров яв-

ляется весьма актуальным направлением. Вместе с тем результат обзора показал наличие достаточно большого разброса значений эффективности конструкции, что требует дополнительных исследований.

Методы и материалы исследования

В работе рассматривается новый вариант (схема 1) конструкции в сравнении с традиционной конструкцией с вентилируемым фасадом (рисунок, б), методика расчета которой является исходной согласно СП РК 2.04-107-2022.

Геометрические и теплофизические характеристики указанных конструкций приведены в таблице. Здесь и далее, слои нумеруются последовательно, начиная с 1, от самого внутреннего к самому наружному. Отметим, что данные параметры подобраны



а) Разработанная (Схема 1); б) Традиционная (Схема 2)
Ограждающие конструкции с воздушной прослойкой

Геометрические и теплофизические характеристики многослойных конструкций наружного ограждения

Номер слоя	Описание	Плотность, кг/м³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)
1	Цементно-песчаная штукатурка	1800	0,58	0,09
2	Кладка из керамического кирпича	1800	0,56	0,14
3	Теплоизоляционная базальтовая вата	не менее 90-110	0,035	0,3
4	Замкнутые воздушные вертикальные канал	—	—	—
5	Вентилируемая воздушная прослойка	—	—	—
6	Керамогранит	2800	3,49	0,008

прежде всего исходя из того, чтобы при прочих равных условиях исследовать различные способы утепления несущей конструкции. В связи с этим не рассматриваются вопросы технической реализуемости данных схем. Например, во всех двух схемах облицовочный слой рассматривается как плоское тело, контактирующее с вентилируемой воздушной прослойкой без уточнения, каким образом осуществляется его крепление к несущему слою ограждающей конструкции.

В качестве новизны конструктивного решения в схеме 1 в слое утеплителя из теплоизоляционной базальтовой ваты плотностью не менее 90-110 кг/м³ организованы вертикальные воздушные замкнутые каналы с нанесением теплоотражающих экранов во внутренней стороне каналов из алюминиевой фольги. В методике расчёта толщиной теплоотражающих покрытий будем пренебрегать, а само покрытие рассматривать как серое тело [7, 8] с заданным коэффициентом поглощения. Так как такие допущения не вносят ощутимых погрешностей в результаты расчета в силу незначительности термического сопротивления неидеального теплового контакта, который имеет место в действительности, а также малой толщины и большой теплопроводности теплоотражающего покрытия. Также для полноты необходимых значений при проведении расчетов в качестве граничных условий следует принять климатические параметры рассматриваемого района, а также внутренний микроклимат помещений. Вместе с тем в расчетах в качестве требуемых значений необходимо учитывать геометрические параметры прослойки с учетом высоты фасада и сумму местных сопротивлений в воздушном канале фасада.

Научные результаты

Для расчета воспользуемся итерационной процедурой. В качестве ключевых параметров, обновляемых на каждой итерации будем рассматривать температуру и парциальное давление водяного пара на внутренней и наружной поверхностях ограждающей конструкции, и также на стыке слоев: T_k , e_k , $k = 0, 1, 2, \dots, n$, а также соответствующие значения в вентилируемой воздушной прослойке T_n , e_n .

Зная значения этих величин на предыдущей итерации, на текущей итерации выполняется следующая последовательность действий.

1. Рассчитываются эквивалентные теплопроводности слоев, содержащих замкнутую воздушную прослойку или воздушные замкнутые каналы в теплоизоляционном слое.

2. Для каждого слоя за исключением вентилируемой воздушной прослойки опре-

деляется его термическое сопротивление и сопротивление паропроницанию согласно выражениям $R_k = \delta_k / \lambda_k$ и $R_{vpk} = \delta_k / \mu_k$.

3. Рассчитывается значение коэффициента теплоотдачи на стенках вентилируемой воздушной прослойки α_n .

4. Определяется приведенное сопротивление теплопередачи части ограждающей конструкции, от помещения до вентилируемой воздушной прослойки

$$R_{int} = \frac{1}{\alpha_{int}} + \sum_{i=1}^{n_{int}} R_i + \frac{1}{\alpha_n}. \quad (1)$$

5. Находится величина теплового потока, идущего из помещения к вентилируемой воздушной прослойке

$$q_{int} = \frac{T_{int} - T_n}{R_{int}}. \quad (2)$$

6. Находим температуры на стыке слоев, двигаясь из помещения к вентилируемой воздушной прослойке.

7. Определяем скорость воздуха в вентилируемой воздушной прослойке и рассчитываем температуру воздуха в вентилируемой воздушной прослойке и на выходе из нее.

8. Определяем приведенное сопротивление теплопередачи части ограждающей конструкции, от вентилируемой воздушной прослойки до внешней поверхности ограждающей конструкции (приведенное сопротивление теплопередаче внешней облицовки).

9. Находится величина теплового потока, идущего из помещения к вентилируемой воздушной прослойке

$$q_{ext} = \frac{T_{ext} - T_n}{R_{ext}}. \quad (3)$$

10. Находим температуры на стыке слоев, двигаясь от внешней поверхности ограждающей конструкции к вентилируемой воздушной прослойке

$$T_n = T_{ext} + \frac{q_{int}}{q_{ext}}, \quad (4)$$

$$T_{k-1} = T_k + q_{ext} \cdot R_k. \quad (5)$$

11. Определяется сопротивление паропроницанию части ограждающей конструкции, от помещения до вентилируемой воздушной прослойки

$$R_{vpint} = \sum_{i=1}^{n_{int}} R_{vpi}. \quad (6)$$

12. Находится величина потока водяного пара, идущего из помещения к вентилируемой воздушной прослойке

$$q_{vpint} = \frac{e_{int} - e_n}{R_{vpint}}. \quad (7)$$

13. Находим парциальное давление водяного пара на стыке слоев, двигаясь из помещения к вентилируемой воздушной прослойке.

14. Определяем сопротивление паропрооницанию части ограждающей конструкции, от вентилируемой воздушной прослойки до внешней поверхности ограждающей конструкции (сопротивление паропрооницанию внешней облицовки).

$$R_{vpe\text{xt}} = \sum_{i=n_{\text{int}}+1}^n R_{vpi}. \quad (8)$$

15. Находится величина потока водяного пара, идущего из помещения к вентилируемой воздушной прослойке

$$q_{vpe\text{xt}} = \frac{e_{vpe\text{xt}} - e_n}{R_{vpe\text{xt}}}. \quad (9)$$

16. Находим парциальное давление на стыке слоев, двигаясь от внешней поверхности ограждающей конструкции к вентилируемой воздушной прослойке.

Для самой первой итерации в качестве эквивалентного коэффициента теплопроводности в замкнутой воздушной прослойке и в воздушных горизонтальных каналах можно использовать значение истинной теплопроводности воздуха, а температуру и парциальное давление водяного пара в вентилируемой воздушной прослойке определить при условии отсутствия течения воздуха в ней. Итерации прекращаются, когда расхождения между значениями температуры в характерных точках на предыдущей и текущей итерациях становятся меньше наперед заданной погрешности. После завершения итерационного процесса, определяется окончательное значение приведенного сопротивления теплопередаче согласно (10).

$$R = (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \frac{A}{Q}. \quad (10)$$

Таким образом, вышеизложенная методика позволяет определить значения температуры и парциального давления водяного пара на поверхностях ограждающей конструкции и на стыках её слоев, плотность теплового потока через ограждающую конструкцию и её приведенное сопротивление теплопередаче.

Выводы

В результате проведенного исследования была разработана аналитическая методика расчета температурных полей и влажностного режима новой энергоэффективной ограждающей конструкции. Полученный результат может быть предпосылкой для составления программы для персонального компьютера, позволяющей проводить расчеты температурных полей и влажностного режима рассматриваемых ограждающих конструкций. Вместе с тем разработанная аналитическая методика расчета позволяет проводить вариативный анализ и оперативно получать необходимые теплофизические значения, а также дает возможность регулировать геометрическими параметрами воздушных прослоек до принятия наиболее энергоэффективного варианта конструкции. Таким образом, результаты данного исследования положительно дополняют существующие методики по расчету теплофизических значений ограждающих конструкций и могут быть использоваться научно-техническими сообществами, а также в учебном процессе.

Исследование проводилось в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (AP22782896).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Long, L.; Li, Q.; Gan, Z.; Mu, J., Overend, M.; Zhang, D. Life cycle assessment of stone buildings in the Taihang mountains of Hebei province: Evolution towards cleaner production and operation. *Journal of Cleaner Production*. 2023, 399, 136625. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136625>
2. Rakhimova, G.; Zhangabay, N.; Samoilova, T.; Rakhimov, M.; Kropachev, P.; Stanevich, V.; Karacasu, M.; Ibraimova, U. Computational Research of the Efficiency of Using a Three-Layer Panel Made of Highly Porous Polystyrene Concrete. *Materials*. 2024, 17 (16), 4133; <https://doi.org/10.3390/ma17164133>
3. Falk, J.; Sandin, K. Ventilated Rainscreen Cladding: Measurements of Cavity Air Velocities, Estimation of Air Change Rates and Evaluation of Driving Forces. *Build. Environ.* 2013, 59, 164-176. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.017>

4. Santa Cruz, J., Porras-Amores, A.C. Ventilated Façade with double chamber and flow control device. *Energy and Buildings*. 2017, 149, 471-482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.063>
5. Mavromatidis, L.E., Bykalyuk, A., El Mankibi, M., Michel, P., Santamouris, M. Numerical estimation of air gaps' influence on the insulating performance of multilayer thermal insulation // *Building and Environment* – 2012. – 49. – Pp. 227-237. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/208/1/012046>
6. Hassan Kareem Abdullah, Saja Hashim Faraj. Experimental study for the effect of air gap in building walls on heat gain reduction // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – 61 (1). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.308>
7. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справ. пособ / С.С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов. 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.

Жаңа энергия тиімді қоршау конструкцияның температуралық өрістерін және ылғалдылық режимін есептеудің аналитикалық әдістемесін әзірлеу

^{1*}**ЖАҢАБАЙ Нұрлан Жаңабайұлы**, т.ғ.к., профессор, Nurlan.Zhanabay777@mail.ru,

¹**ТҰРСҰНҚҰЛҰЛЫ Тимур**, PhD, доцент, Timurtursunkululy@gmail.com,

¹**ИБРАИМОВА Ұлжан Бахытжанқызы**, PhD, аға оқытушы, ibraimova_uljan@mail.ru,

¹**УТЕЛБАЕВА Акмарал Болысбековна**, х.ғ.д., қауымдастырылған профессор, mako_01-777@mail.ru,

¹**БАХБЕРГЕН Султан**, магистрант, sultan4ik.pro02@gmail.com,

¹«Мұхтар Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті» КеАҚ, Тәуке хан даңғылы, 5, Шымкент, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Бұл зерттеуде сыртқы қоршау шешімінің жаңалығы ретінде құрылымның жылу оқшаулағыш қабатына жылу шағылыстыратын жабындар және сонымен бірге желдетілетін және жабық қабаттардың болуы енгізілді. Дизайнға енгізілген өзгерістер қоршаулар арқылы энергияны үнемдеуге жағымды әсер етеді. Осы дизайн ерекшеліктерін ескере отырып, итерация әдісіне негізделген жаңа дизайнды есептеудің аналитикалық әдісі жасалды. Алынған әдіс дербес компьютерге арналған бағдарламаны құрудың алғышарты болуы мүмкін. Әзірленген есептеу әдісі температура өрістерін және жаңа құрылымның ылғалдылық режимін есептеуге мүмкіндік береді. Сонымен бірге, әзірленген есептеу әдісі қолданыстағы әдістерді оң толықтырады және оны ғылыми-техникалық қауымдастықтар, сондай-ақ оқу процесінде қолдана алады.

Кілт сөздер: энергия тиімділігі, сыртқы қоршау, есептеу әдістемесі, температура өрістері, ылғалдылық режимі.

Development of An Analytical Methodology for Calculating Temperature Fields and Humidity Conditions of a New Energy-Efficient Enclosing Structure

^{1*}**ZHANGABAY Nurlan**, Cand. of Tech. Sci., Professor, Nurlan.Zhanabay777@mail.ru,

¹**TURSUNKULULY Timur**, PhD, Associate Professor, Timurtursunkululy@gmail.com,

¹**IBRAIMOVA Ulzhan**, PhD, Senior Lecturer, ibraimova_uljan@mail.ru,

¹**UTELBAYEVA Akmaral**, Dr. of Chem. Sci., Associate Professor, mako_01-777@mail.ru,

¹**BAKHBERGEN Sultan**, Master's Student, sultan4ik.pro02@gmail.com,

¹NCJSC «Mukhtar Auezov South Kazakhstan University», Tauke Khan Avenue, 5, Shymkent, Kazakhstan,

*corresponding author.

Abstract. *In this study, heat-reflecting coatings and the simultaneous presence of ventilated and closed interlayers were introduced into the thermal insulation layer of the structure as a novelty of the solution of the external fence. The changes made to the design suggest a beneficial effect on energy saving through fences. Taking into account these design features, an analytical method for calculating the new design was developed based on the iteration method. The resulting method may be a prerequisite for compiling a program for a personal computer. The developed calculation method allows calculations of temperature fields and humidity conditions of the new design. At the same time, the developed calculation method positively complements existing methods and can be used by scientific and technical communities, as well as in the educational process.*

Keywords: *energy efficiency, external fencing, calculation method, temperature fields, humidity regime.*

REFERENCES

1. Long, L.; Li, Q.; Gan, Z.; Mu, J., Overend, M.; Zhang, D. Life cycle assessment of stone buildings in the Taihang mountains of Hebei province: Evolution towards cleaner production and operation. *Journal of Cleaner Production*. 2023, 399, 136625. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136625>
2. Rakhimova, G.; Zhangabay, N.; Samoilova, T.; Rakhimov, M.; Kropachev, P.; Stanevich, V.; Karacasu, M.; Ibraimova, U. Computational Research of the Efficiency of Using a Three-Layer Panel Made of Highly Porous Polystyrene Concrete. *Materials*. 2024, 17 (16), 4133; <https://doi.org/10.3390/ma17164133>
3. Falk, J.; Sandin, K. Ventilated Rainscreen Cladding: Measurements of Cavity Air Velocities, Estimation of Air Change Rates and Evaluation of Driving Forces. *Build. Environ.* 2013, 59, 164-176. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.017>
4. Santa Cruz, J., Porras-Amores, A.C. Ventilated Façade with double chamber and flow control device. *Energy and Buildings*. 2017, 149, 471-482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.063>
5. Mavromatidis, L.E., Bykalyuk, A., El Mankibi, M., Michel, P., Santamouris, M. Numerical estimation of air gaps' influence on the insulating performance of multilayer thermal insulation // *Building and Environment* – 2012. – 49. – Pp. 227-237. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/208/1/012046>
6. Hassan Kareem Abdullah, Saja Hashim Faraj. Experimental study for the effect of air gap in building walls on heat gain reduction // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – 61 (1). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.308>
7. Kutateladze S.S. *Teploperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie: Sprav. posob* / S.S. Kutateladze. – Moscow: E`nergoatomizdat, 1990. – 367 p.
8. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha: Uchebnik dlya vuzov. 3-e izd. pererab. i dop.* – Moscow: E`nergiya, 1975. – 488 p.