

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 3. С. 208–219.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (3): 208–219.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 699:86:519.86

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-3-208-219

EDN: XFZSRD

ВЗАИМОСВЯЗАННЫЙ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В НАРУЖНОЙ СТЕНЕ ИЗ ГАЗОБЕТОНА СО СЛОЯМИ ШТУКАТУРНОГО РАСТВОРА НА ЕЕ ПОВЕРХНОСТЯХ

**Николай Александрович Цветков, Александр Витальевич Толстых,
Юлия Николаевна Дорошенко, Альвирт Альвиртович Абдулин**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. На сегодняшний день все большую важность приобретает использование ограждающих конструкций зданий, выполненных из ячеистых бетонов, т. к. они обладают хорошими конструкционными характеристиками и высокими теплозащитными свойствами.

Актуальность. Тепловлажностный режим ограждающих конструкций из газобетона оказывает определяющее влияние на их прочностные и теплозащитные характеристики, поэтому актуальным является исследование, направленное на выяснение закономерностей тепловлагопереноса в газобетонных стенах с учетом влияния штукатурных слоев.

Цель. Выполнение анализа долгосрочной динамики тепловлажностного режима газобетонных стен с учетом влияния штукатурных покрытий, наносимых в разные этапы эксплуатации ограждающих конструкций.

Результаты. Приведены результаты численного моделирования нестационарных процессов тепловлагопереноса в плоской однородной стене из газобетона марки D400 с различными вариантами наружной и внутренней штукатурки для климата г. Томска.

Расчеты показали, что наружный штукатурный слой, нанесенный в начале эксплуатации, может привести к значительному накоплению влаги, тогда как внутренний штукатурный слой, нанесенный в начале эксплуатации стены, не оказывает заметного влияния на тепловлажностный режим ограждающей конструкции. Получены результаты, отражающие влияние различных вариантов оштукатуривания на положение максимума влаго-

содержания в стене из газобетона. Показано, что наружное оштукатуривание стены из газобетона, в том числе и выполненное по истечении первого года эксплуатации, приводит к избыточному увлажнению на наружной поверхности в холодный период в связи с процессами конденсации влаги в зоне стабильно низких температур.

Ключевые слова: стена из газобетона, штукатурный слой, ограждающие конструкции, тепловлагодперенос, влагодперенос, тепловлажностный режим, средняя влажность, поток влаги, сопротивление теплопередаче, координата максимального увлажнения

Финансирование: работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» Министерства науки и высшего образования РФ (грант в форме субсидии: соглашение от 06.06.2024 № 075-15-2024-234).

Для цитирования: Цветков Н.А., Толстых А.В., Дорошенко Ю.Н., Абдулин А.А. Взаимосвязанный тепло- и массоперенос в наружной стене из газобетона со слоями штукатурного раствора на ее поверхностях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 3. С. 208–219. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-3-208-219. EDN: XFZSRD

ORIGINAL ARTICLE

CORRELATION BETWEEN HEAT AND MASS TRANSFER IN FOAM CONCRETE EXTERNAL WALL COVERED WITH PLASTER MORTAR

Nikolai A. Tsvetkov, Aleksandr V. Tolstykh, Yuliya N. Doroshenko, Alvirt A. Abdulin

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Building wall structures made of foam concrete are becoming more and more popular due to their structural qualities and excellent thermal protection. The heat and moisture regime of wall structures made of foam concrete has a decisive effect on their strength and heat protection properties.

Purpose: The aim of this work is to clarify the heat and moisture transfer in foam concrete walls taking into account the influence of plaster layers deposited.

Methodology/approach: Numerical modeling is conducted for non-stationary heat and moisture transfer in a flat homogeneous wall composed of D400 aerated concrete with various exterior and interior plastering options for climatic conditions in Tomsk. Calculations show that the plaster mortar applied to the wall, results in a significant buildup of moisture, while the internal plaster mortar applied, has no discernible impact on the heat and moisture transfer of the wall structure.

Research findings: It is shown the influence of different plastering options on the position of the maximum moisture content in the wall made of foam concrete. The external walls coated with plaster mortar, including those performed after the first year of operation, demonstrate excessive moisture on the outer surface during the cold period due to the moisture condensation in the range of consistently low temperatures.

Keywords: foam concrete wall, plaster layer, enclosing structure, heat and moisture transfer, heat and moisture regime, average humidity, heat transfer resistance, maximum moisture coordinate

Funding: The work was carried out under the Strategic Academic Leadership Program “Priority-2030” and financially supported by Grant No. 075-15-2024-234 from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V., Doroshenko Yu.N., Abdulin A.A. Correlation Between Heat and Mass Transfer in Foam Concrete External Wall Covered with Plaster Mortar. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (3): 208–219. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-3-208-219. EDN: XFZSRD

Введение

Хорошие конструкционные характеристики и высокие теплозащитные свойства ячеистых бетонов являются основанием для их использования в ограждающих конструкциях зданий. Применение в современных зданиях пористого бетона обеспечивает относительно низкую стоимость капитального строительства, необходимую прочность [1] возводимых конструкций в сочетании с требуемой энергоэффективностью [2].

Избыточное накопление влаги в порах газобетона может послужить фактором, приводящим к увеличению потерь тепловой энергии и к нарушению целостности ограждающих конструкций. Авторы [3] выполнили исследование тепловлажностных режимов при возникновении трещин в газобетоне. Отмечено, что накопление влаги с большей интенсивностью характерно для трещиноватых газобетонных конструкций. Эксперименты, описанные в работе [4], связывают повышение коэффициента текущей теплопроводности в газобетоне с избыточным накоплением сверхсорбционной влаги в его порах. В основе большинства расчетных оценок влияния штукатурных слоев на тепловлажностные режимы, реализующиеся при эксплуатации стен из газобетона, лежат аналитические достаточно упрощенные подходы. Так, в работе [2] оценивается влияние растворных швов в стене из газобетонных блоков на ее теплозащитные характеристики без учета возможного влагопереноса. Приведенные в исследованиях [5, 6, 7] расчеты и оценки, учитывающие перенос влаги в ограждающих конструкциях, которые были выполнены с использованием упрощенных методов, нуждаются в дальнейшем уточнении и апробации. В работе [8], используя программный комплекс Comsol Multiphysics, авторы выполнили численное исследование тепловлажностного режима газобетонных стен в условиях тропического климата. Результаты моделирования позволили выявить связь избыточной влажности с просадкой балконных плит, растрескиванием стен и обрушением зданий. Авторы [9, 10] разработали новые подходы к моделированию совместного тепловлагопереноса в пористых строительных конструкциях на основе постоянно пополняющихся экспериментальных данных.

Для прогнозирования избыточного накопления влаги и соответствующего снижения теплозащитных свойств ограждающих конструкций из газобетона целесообразно выполнять комплексное численное моделирование процессов совместного тепловлагопереноса на основании известных данных экспериментов и расчетных моделей, предусматривающих учет взаимного влияния переменных коэффициентов паропроводности и влагопроводности [11, 12].

Результаты исследований по влиянию наружных слоев штукатурного раствора на интенсивность переноса влаги в фасадных системах ограждающих конструкций представлены в работах [7, 13].

Целью настоящей статьи является исследование многолетнего тепловлажностного состояния газобетонных стен с учетом влияния штукатурных

слоев, которые могут быть нанесены в различные моменты времени при эксплуатации этих ограждающих конструкций.

Материалы и методы исследования

Численное моделирование совместных процессов переноса тепла и влаги выполнялось для автоклавного газобетона марки D400 на основе одномерных нестационарных уравнений и граничных условий, соответствующих климатическим характеристикам г. Томска [11, 14]. При определении теплопроводности пористого бетона была учтена ее двухпараметрическая зависимость от удельного влагосодержания и от текущей температуры [11].

Влияние наружного и внутреннего штукатурных слоев обеспечивалось соответствующими значениями коэффициентов сопротивления паропрооницанию, которые принимались следующими:

– на внутренней поверхности стены из газобетона $R_{\text{пв}} = 0,069 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ (толщина штукатурки 5 мм);

– на наружной поверхности стены из газобетона $R_{\text{пн}} = 0,096 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ (толщина штукатурки 10 мм) или $R_{\text{пн}} = 0,263 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ (толщина штукатурки 30 мм).

Ввиду незначительной толщины штукатурных слоев их тепловым сопротивлением можно пренебречь при выполнении численных расчетов полей температур, влагосодержания и влагопотоков (рис. 1–4). На оси ординат графиков численные обозначения соответствуют началу эксплуатации или месяцам 1-го, 2-го или 3-го года эксплуатации: 0, 12, 24, 36 – июлю; 3, 15, 27 – октябрю; 6, 18, 30 – январю; 9, 21, 33 – апрелю.

На рис. 1–4 представлены 5 графических зависимостей для различных вариантов оштукатуривания:

00 – полное отсутствие штукатурных слоев;

10 – штукатурный слой на внутренней поверхности, нанесенный в начале ввода в эксплуатацию стены из газобетона;

11 – штукатурные слои на внутренней и наружной поверхностях, нанесенные на стены из газобетона (толщина наружного слоя 10 мм);

101 – штукатурный слой на внутренней поверхности, нанесенный в начале ввода в эксплуатацию стены из газобетона, и на наружной поверхности, нанесенный через 11 мес. после ввода в эксплуатацию (толщина наружного слоя 10 мм);

102 – штукатурный слой на внутренней поверхности, нанесенный в начале ввода в эксплуатацию, и на наружной поверхности, нанесенный через 11 мес. после ввода в эксплуатацию (толщина наружного штукатурного слоя 30 мм).

Результаты

На рис. 1 представлены зависимости среднего удельного влагосодержания от времени с начала ввода в эксплуатацию стены из газобетона. В начальный период интенсивной сушки ограждающей конструкции продолжительностью около 13 мес. средняя влажность стены будет максимальной из всех рассмотренных вариантов оштукатуривания в том случае, если штукатурные слои

были нанесены как на внутреннюю, так и на наружную поверхности в начале ввода в эксплуатацию. Следует отметить, что наружная штукатурка, даже при толщине 30 мм, не вызывает существенного увеличения влажности.

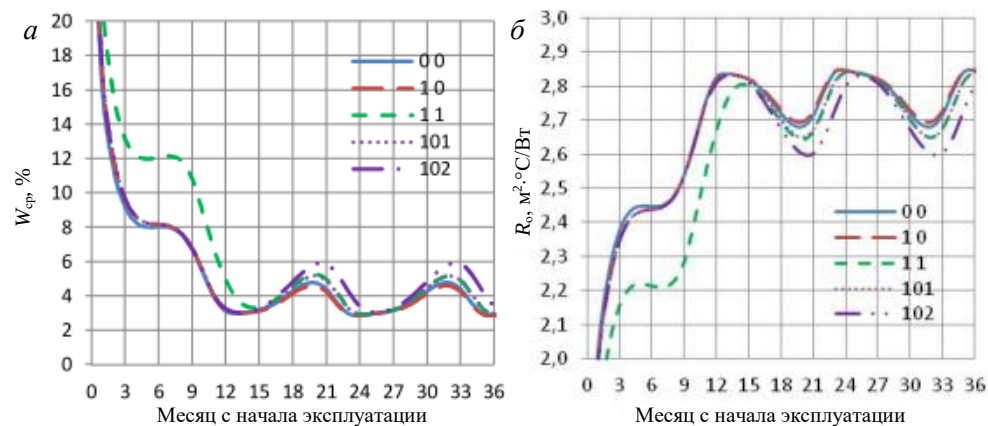


Рис. 1. Среднее влагосодержание стены из газобетона (а) и ее сопротивление теплопередаче (б) для различных вариантов оштукатуривания

Fig. 1. Average moisture content of the foam concrete wall (a) and its resistance to heat transfer (b) for different plastering options

Избыточное влагосодержание, характерное для начального периода ввода в эксплуатацию ограждающих газобетонных конструкций, приводит к заметному ослаблению их теплозащитных функций (рис. 1, б). По завершении первого года с начала эксплуатации сопротивление теплопередаче достигает максимального значения, соответствующего наиболее высоким температурам наружного воздуха. В дальнейшем наблюдаются периодические колебания сопротивления теплопередаче с максимумами в июле – августе и минимумами в марте. При этом наличие наружного штукатурного слоя толщиной 30 мм приводит к смещению максимума сопротивления теплопередаче к августу. Как и осредненная по толщине влажность, сопротивление теплопередаче незначительно меняется с увеличением коэффициента сопротивления паропрооницанию на наружной поверхности стены при оштукатуривании. Максимальное уменьшение сопротивления теплопередаче в марте – апреле не превышает 4–5 %.

Характеристики влагообмена для внутренней поверхности газобетонной стены можно оценить по графикам на рис. 2. Оштукатуривание внутренней и наружной поверхностей не вызывает значимого увеличения влагосодержания на поверхности, контактирующей с внутренним воздухом, а также обеспечивает большой поток влаги от поверхности к внутреннему воздуху при высыхании в конце первого года эксплуатации. В летние месяцы влагопоток значительно превышает аналогичные значения для других вариантов оштукатуривания.

Результаты, представленные на рис. 3, показывают, что наличие внутреннего и наружного штукатурных слоев с начала эксплуатации заграждения приводит к значительному росту влажности на наружной поверхности стены, которая в декабре первого года эксплуатации превосходит аналогичные величины для других вариантов в 4 раза. Амплитуда изменений потока влаги через наруж-

ную поверхность (при наличии внутреннего и наружного штукатурных слоев) в течение первого года эксплуатации также существенно превосходит аналогичные величины, полученные для других вариантов оштукатуривания стены.

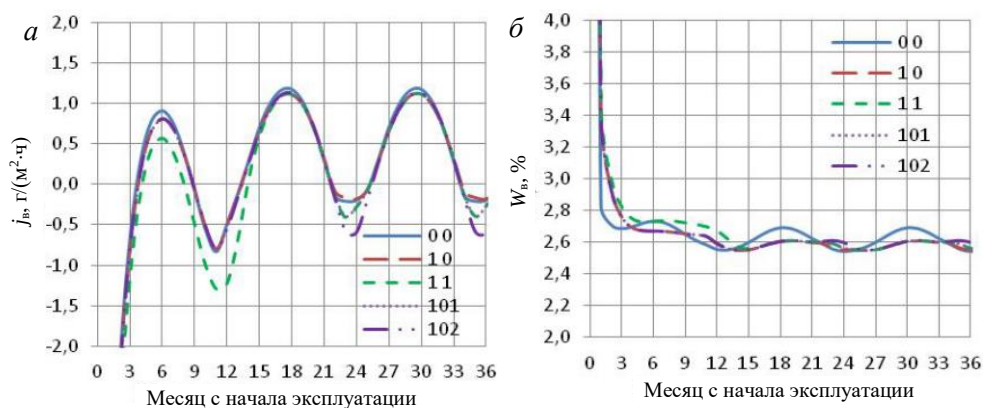


Рис. 2. Влагодток через внутреннюю поверхность (а) (отрицательные значения влагопо-тока соответствуют сушке, положительные – накоплению влаги) и влагосодержа-ние на внутренней поверхности (б) для различных вариантов оштукатуривания

Fig. 2. Moisture flow (a) and moisture accumulation (b) on the inner surface. Negative and positive values indicate drying and moisture accumulation at different plastering options

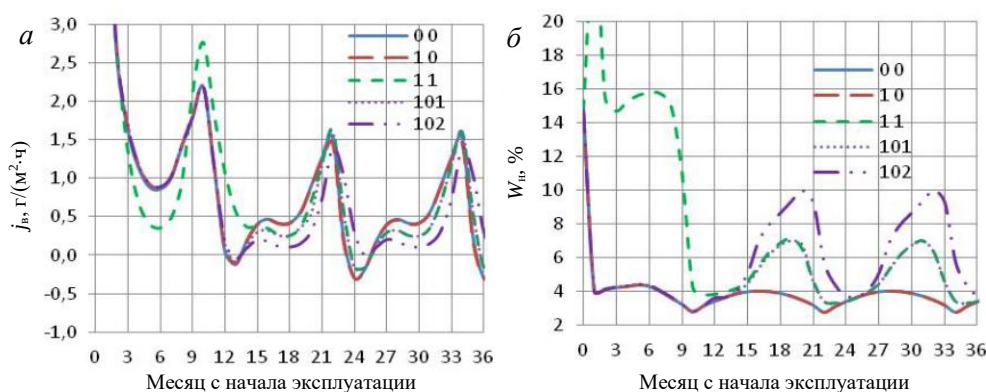


Рис. 3. Влагодток через наружную поверхность (а) (положительные значения влагопо-тока соответствуют сушке, отрицательные – накоплению влаги) и влажность на наружной поверхности (б) для различных вариантов оштукатуривания

Fig. 3. Moisture flow (a) and moisture accumulation (b) on the outer surface. Negative and positive values indicate drying and moisture accumulation at different plastering options

Наружный штукатурный слой вызывает значительное увеличение влажности на наружной поверхности стенки. При толщине наружного штукатурного слоя 10 мм в наиболее неблагоприятные месяцы второго и третьего годов эксплуатации (ноябрь, февраль) влажность на наружной поверхности стены превосходит аналогичные характеристики для вариантов, не предусматривающих наружное оштукатуривание, в 1,8 раза, а при толщине наружного слоя 30 мм влажность на наружной поверхности увеличивается в декабре второго года эксплуатации и в марте третьего года эксплуатации в 2,9 раза.

Для оценки возможности накопления влаги внутри оштукатуренной стены из газобетона целесообразно рассмотреть изменение влажности в плоскости максимального увлажнения однослойной ограждающей конструкции, которая локализована на расстоянии $2/3$ толщины от поверхности [15], контактирующей с внутренним воздухом помещения (рис. 4). Качественное поведение влагосодержания в этой плоскости почти совпадает с характерными особенностями подобной зависимости для влажности, взятой в среднем по толщине стены (см. рис. 1, а), однако колебания влажности от максимальных величин к минимальным имеют несколько большую амплитуду.

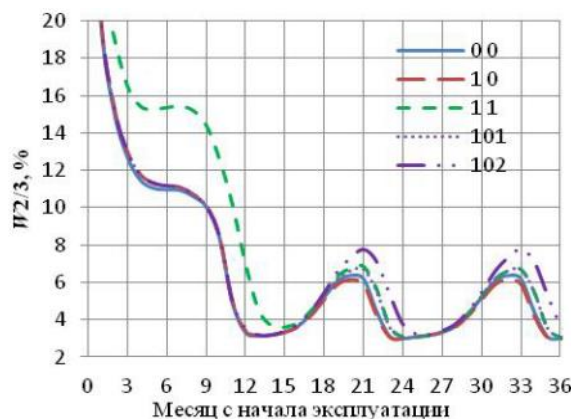


Рис. 4. Влажность в плоскости, вблизи которой локализован максимум увлажнения однослойной ограждающей конструкции

Fig. 4. In-plane moisture near the maximum point of single-layer wall structure

Для прогнозирования возможного накопления влаги в газобетонной стене были получены распределения влажности по толщине для рассмотренных вариантов оштукатуривания, результаты представлены на рис. 5–7 (результаты расчета для варианта оштукатуривания 102 не приводятся, т. к. они практически совпадают с аналогичными результатами для варианта 101).

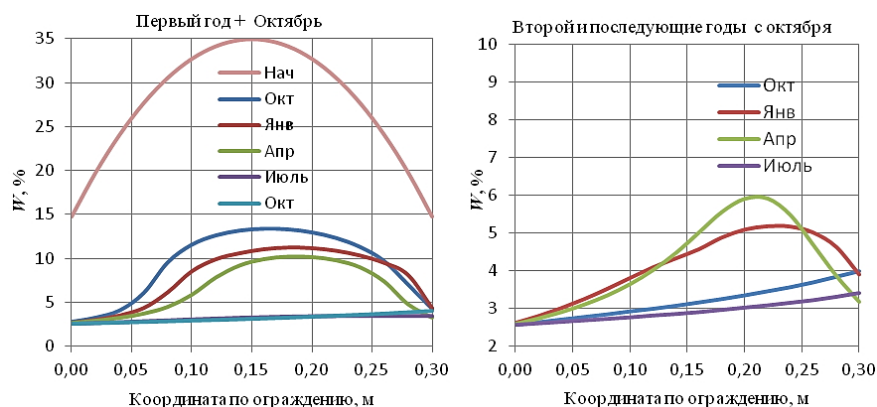


Рис. 5. Распределение влажности по толщине стены из газобетона: вариант 10

Fig. 5. Moisture distribution across foam concrete wall thickness. Option 10

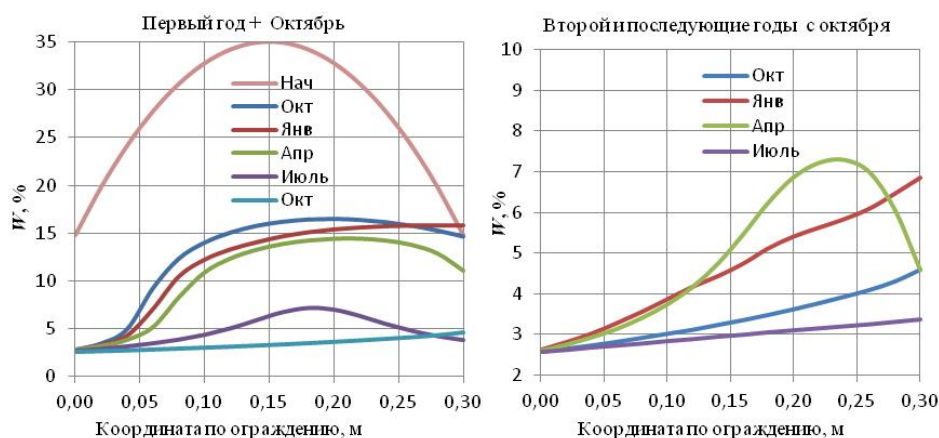


Рис. 6. Распределение влажности по толщине стены из газобетона: вариант 11
Fig. 6. Moisture distribution across foam concrete wall thickness. Option 11

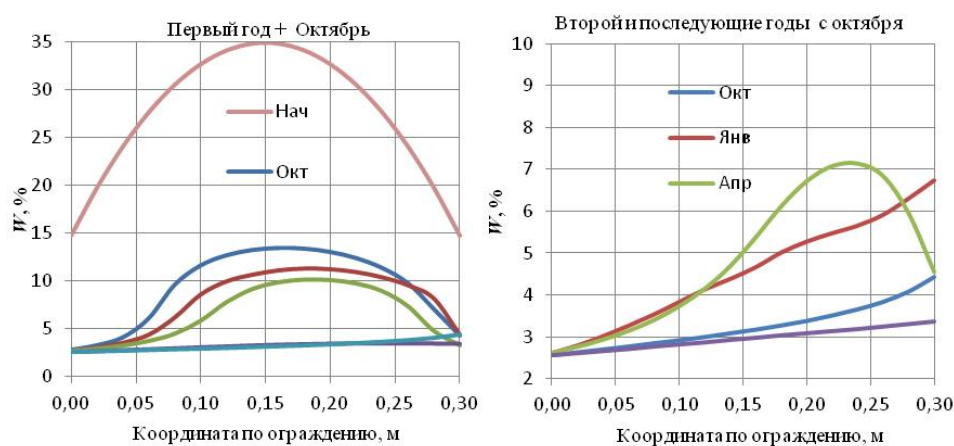


Рис. 7. Распределение влажности по толщине стены из газобетона: вариант 101
Fig. 7. Moisture distribution across foam concrete wall thickness. Option 101

В качестве начального распределения влаги принимался симметричный профиль с максимальным значением в центральной плоскости симметрии стены.

В течение первого года с момента ввода в эксплуатацию газобетонного ограждения, до января, апреля, положение координаты максимального увлажнения перемещается от центра стены (координата по ограждению 0,15 м):

- для вариантов оштукатуривания 10 и 101 – в точку с координатой 0,18 м (3/5 толщины от внутренней поверхности);
- для варианта оштукатуривания 11 – в точку с координатами 0,28, 0,22 м (14/15 толщины от внутренней поверхности).

В июле, по завершении первого года эксплуатации, максимум увлажнения локализован:

- для вариантов оштукатуривания 10 и 101 – в точке с координатой 0,26 м (13/15 толщины от внутренней поверхности);

– для варианта оштукатуривания 11 – в точке с координатой 0,22 м (11/15 толщины от внутренней поверхности).

В октябре на второй год эксплуатации стены из газобетона максимум увлажнения расположен на наружной поверхности стены для всех рассмотренных вариантов оштукатуривания.

Во второй и последующие годы, с октября по апрель, положение координаты максимального увлажнения перемещается от наружной поверхности стены:

– для варианта оштукатуривания 10 – в точку с координатой 0,22 м (11/15 толщины от внутренней поверхности);

– для вариантов оштукатуривания 11 и 101 – в точку с координатой 0,24 м (4/5 толщины от внутренней поверхности).

В январе (во второй и последующие годы эксплуатации) максимум увлажнения локализован:

– для вариантов оштукатуривания 11 и 101 – на наружной поверхности газобетонного ограждения;

– для варианта оштукатуривания 10 – в точке с координатой 0,22 м (11/15 толщины от внутренней поверхности).

Заключение

Таким образом, наружный слой штукатурки, нанесенный в начале эксплуатации, может привести к значительному накоплению влаги снаружи и внутри ограждающей конструкции, в то время как внутренний слой штукатурки, нанесенный в начале эксплуатации газобетонной стены, не оказывает заметного влияния на тепловлажностный режим ограждающей конструкции. На ранних этапах эксплуатации этот процесс приводит к значительному снижению теплозащитных свойств ограждающей конструкции. Рекомендуется производить наружную штукатурку стен в июне следующего года, через одиннадцать месяцев после начала эксплуатации.

Наличие любого из рассмотренных в данной работе вариантов оштукатуривания приводит к существенному изменению расположения максимума влажности внутри стены из газобетона по сравнению с известным значением для однослойной ограждающей конструкции.

В первый год с начала ввода в эксплуатацию газобетонного ограждения, при наличии оштукатуривания только на внутренней поверхности стены или при наружном оштукатуривании в конце первого года эксплуатации, максимальное влагосодержание в месяцы с наиболее заметным накоплением влаги располагается ближе к внутренней поверхности, чем в случае однослойной стены. В случае нанесения штукатурных слоев как внутри, так и снаружи (с начала ввода в эксплуатацию), в конце первого года эксплуатации максимальное влагосодержание в месяцы с наиболее заметным накоплением влаги смещается в сторону наружной поверхности ограждения из газобетона относительно той же координаты для однослойных конструкций. В октябре второго года эксплуатации максимальное влагосодержание достигается на поверхности, контактирующей с наружным воздухом.

Во второй и последующие годы (в апреле) максимум внутристенной влажности располагается ближе к наружной поверхности газобетонной стены,

чем точка локализации максимального влагосодержания в однослойной стене для всех рассмотренных вариантов оштукатуривания. В январе второго и последующих годов эксплуатации максимум влагосодержания наблюдается на наружной поверхности ограждения при наличии на ней штукатурки, а при отсутствии наружного оштукатуривания максимальное влагосодержание находится в точке, удаленной от наружной поверхности стены на 11/15 ее толщины.

Следует также отметить, что наружное оштукатуривание стены из газобетона, в том числе выполненное по истечении первого года эксплуатации, приводит к избыточному увлажнению наружной поверхности в холодный период из-за процессов конденсации влаги в зоне стабильно низких температур. Согласно результатам, представленным в работах аналогичной тематики, для предотвращения нежелательной конденсации необходимо использовать фасадные системы с наружным утепляющим слоем и тонким штукатурным слоем.

Применение полученных результатов моделирования возможно в процессе строительства и эксплуатации зданий с ограждающими конструкциями из газобетона. Тепловые потери здания при проектировании систем отопления могут быть более точно оценены с помощью полученных результатов расчета нестационарного тепловлажностного режима в стенах, где основной несущей конструкцией являются газобетонные элементы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Grzyb K., Jasiński R. Full-scale studies of stiffening walls made of autoclaved aerated concrete // ICAAC 2023 : 7th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete. 2023. V. 6. I. 2. P. 135–141. DOI: <https://doi.org/10.1002/cepa.1973>
2. Gorshkov A.S., Vatin N.I., Rymkevich P.P., Kydevich O.O. Payback period of investments in energy saving // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 78 (2). P. 65–75. DOI: 10.18720/MCE.78.5
3. Min H., Zhang W., Gu X. Effects of load damage on moisture transport and relative humidity response in concrete // Construction and Building Materials. 2018. V. 169. P. 59–68.
4. Низовцев М.И., Терехов В.И., Яковлев В.В. Теплопроводность газобетона повышенной влажности // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2004. № 9. С. 36–38. EDN: PIJUVB
5. Ватин Н.И., Глумов А.В., Горшков А.С. Влияние физико-технических и геометрических характеристик штукатурных покрытий на влажностный режим однородных стен из газобетонных блоков // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 1. С. 28–33. EDN: PCEFIP
6. Крайнов Д.В., Садыков Р.А. Влияние влагосодержания на теплозащитные свойства ограждающей конструкции // Вестник МГСУ. 2011. № 3. С. 404–410.
7. Гагарин В.Г., Зубарев К.П., Козлов В.В. Определение зоны наибольшего увлажнения в стенах с фасадными теплоизоляционными композиционными системами с наружными штукатурными слоями // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 1. С. 125–132. EDN: VLONPF
8. Moyou A.Y., et al. Numerical computation of heat transfer, moisture transport and thermal comfort through walls of buildings made of concrete material in the city of Douala, Cameroon: An ab initio investigation // Heliyon. 2024. V. 10. I. 13. P. 34058.
9. Berger J., Gasparin S., Dutykh D., Mendes N. On the solution of coupled heat and moisture transport in porous material // Transport Porous Media. 2018. V. 121. P. 665–702. DOI: 10.1007/s11242-017-0980-3
10. Berger J., Dutykh D., Mendes N. A new model for simulating heat, air and moisture transport in porous building materials // Int. J. Heat Mass Tran. 2019. V. 134. P. 1041–1060.
11. Жуков А.В., Цветков Н.А., Хуторной А.Н., Толстых А.В. Влияние температурной зависимости изотермы сорбции и коэффициента влагопроводности на влагоперенос в стене из

- газобетона // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 6 (117). С. 729–739. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.6.729-739
12. Гагарин В.Г., Зубарев К.П. Математическое моделирование нестационарного влажностного режима ограждений с применением дискретно-континуального подхода // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 2. С. 244–256. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.244-256
 13. Зубарев К.П., Гвоздков А.Н. Математическое моделирование тепловлажностного режима систем фасадных теплоизоляционных композиционных с наружными штукатурными слоями в стационарной и нестационарной постановках // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : материалы XIX Международной научной конференции. Волгоград : Изд-во: Волгоградский государственный медицинский университет, 2021. С. 19–25. EDN: RJNLUF
 14. Жуков А.В., Цветков Н.А., Хуторной А.Н., Кузнецова А.А. Обоснование физико-математической модели тепловлагопереноса в наружных стенах из газобетона // Инвестиции, строительство, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики : мат. VII Междунар. науч.-практ. конф., Томск, 14–16 марта 2017 г. В 2 частях. Часть 1 / под ред. Т.Ю. Овсянниковой, И.Р. Салагор. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2017. С. 483–497. EDN: YOKJOX
 15. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Москва : АВОК-ПРЕСС, 2006. 250 с.

REFERENCES

1. Grzyb K., Jasiński R. Full-Scale Studies of Stiffening Walls Made of Autoclaved Aerated Concrete. In: *Proc. 7th Int. Conf. on Autoclaved Aerated Concrete*. 2023; 6. (I. 2): 135–141. DOI: <https://doi.org/10.1002/cepa.1973>
2. Gorshkov A.S., Vatin N.I., Rymkevich P.P., Kydrevich O.O. Payback Period of Investments in Energy Saving. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 78 (2): 65–75. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.78.5>
3. Min H., Zhang W., Gu X. Effects of Load Damage on Moisture Transport and Relative Humidity Response in Concrete. *Construction and Building Materials*. 2018; 169: 59–68.
4. Nizovtsev M.I., Terekhov V.I., Yakovlev V.V. Thermal Conductivity of Aerated Concrete with High Humidity. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2004; (9): 36–38. (In Russian)
5. Vatin N.I., Glumov A.V., Gorshkov A.S. Influence of Physical-Technical and Geometrical Characteristics of Plaster Coatings on Moisture Regime of Homogeneous Foam Concrete Walls. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2011; (1): 28–33. (In Russian)
6. Krainov D.V., Sadykov R.A. Moisture Content Effect on Thermal Protection of Walling Structure. *Vestnik MGSU*. 2011; (3): 404–410. (In Russian)
7. Gagarin V.G., Zubarev K.P., Kozlov V.V. The Highest Moisture Area in Façade Heat-Insulation Composite Wall Systems with External Plastering. *Vestnik of Tomsk State university of Architecture and Building*. 2016; (1): 125–132. (In Russian)
8. Moyou A.Y., et al. Numerical Computation of Heat Transfer, Moisture Transport and Thermal Comfort Through Walls of Buildings Made of Concrete Material in the City of Douala, Cameroon: An ab Initio Investigation. *Heliyon*. 2024; 10 (I. 13): 34058.
9. Berger J., Gasparin S., Dutykh D. On the Solution of Coupled Heat and Moisture Transport in Porous Material. *Transport Porous Media*. 2018; 121: 665–702.
10. Berger J., Dutykh D., Mende N. A New Model for Simulating Heat, Air and Moisture Transport in Porous Building Materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019; 134: 1041–1060.
11. Zhukov A.V., Tsvetkov N.A., Khutornoi A.N., Tolstykh A.V. Effect of Temperature Dependence of Sorption Isotherm and Coefficient of Moisture Conductivity on Moisture Transfer in an Foam Concrete Wall. *Vestnik MGSU*. 2018; 6 (117): 729–739. (In Russian)
12. Gagarin V.G., Zubarev K.P. Mathematical Simulation of Non-Stationary Humidity Regime of Fences based on Discrete-Continuum Approach. *Vestnik MGSU*. 2021; 15 (2): 244–256. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.2.244-256>. (In Russian)
13. Zubarev K.P., Gvozdkov A.N. Mathematical Simulation of Heat and Humidity Regime of Facade Thermal Insulation Composite Systems with External Plaster Layers in Stationary and non-Stationary

- tionary Settings. In: *Proc. 19th Int. Sci. Conf. 'Indoor and Ambient Air Quality'*. Volgograd, 2021. Pp. 19–25. (In Russian)
14. Zhukov A.V., Tsvetkov N.A., Khutornoi A.N., Kuznetsova A.A. Substantiation of Physico-Mathematical Model of Heat and Moisture Transfer in Aerated Concrete External Walls. In: *Proc. 7th Int. Sci. Conf. 'Investments, Construction, Real Estate as a Material Basis for Economy Modernization and Innovation'*. Tomsk: TSUAB, 2017. Pp. 483–497. (In Russian)
15. Fokin K.F. Construction Heat Engineering of Enclosing Parts of Buildings. Moscow: AVOK-PRESS. 2006. 250 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Цветков Николай Александрович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, nac.tsuab@yandex.ru

Толстых Александр Витальевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tolstbu@yandex.ru

Дорошенко Юлия Николаевна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kafotopvent1@rambler.ru

Абдулин Альвирт Альвиртович, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, alik.abdulin.2000@mail.ru

Authors Details

Nikolai A. Tsvetkov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, nac.tsuab@yandex.ru

Aleksandr V. Tolstikh, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sinvintie@rambler.ru

Yuliya N. Doroshenko, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kafotopvent1@rambler.ru

Alvirt A. Abdulin, Graduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, alik.abdulin.2000@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.03.2025
Одобрена после рецензирования 09.04.2025
Принята к публикации 21.04.2025

Submitted for publication 24.03.2025
Approved after review 09.04.2025
Accepted for publication 21.04.2025