

УДК 691.327:666.973.6:539.2173.001.24

Н.А. ЦВЕТКОВ, Д.Н. ЦВЕТКОВ, А.В. ТОЛСТЫХ, Ю.Н. ДОРОШЕНКО

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА
ПАРОПРОНИЦАЕМОСТИ НА ВЛАГОПЕРЕНОС
В НАРУЖНОЙ СТЕНЕ ИЗ ГАЗОБЕТОНА**

Выполнено численное моделирование многолетних процессов тепловлагопереноса в плоской однородной стенке из газобетона D400 с учетом движения сорбционной влаги за счет градиента парциального давления водяного пара и сверхсорбционной влаги за счет градиента влагосодержания. Коэффициент теплопроводности рассчитывался в рамках модели сорбционного увлажнения, с использованием аппроксимационных полиномиальных зависимостей, полученных авторами статьи. Выяснено возможное влияние уменьшения либо увеличения значения коэффициента паропроницаемости на 50 % от рекомендуемого значения на тепловлажностные режимы, реализующиеся при эксплуатации стен из газобетона, в том числе при низких температурах наружного воздуха. Установлено, что изменение коэффициента паропроницаемости влияет на период удаления строительной влаги и амплитуду колебания влажности в процессе дальнейшей эксплуатации, не изменяя при этом скорость удаления строительной влаги.

К л ю ч е в ы е с л о в а: тепловлажностный режим, увлажнение газобетона, сорбционная и сверхсорбционная влажность, коэффициент паропроницаемости, теплопроводность, перенос паровой фазы, перенос жидкой влаги.

DOI 10.32683/0536-1052-2021-745-1-91-102

Высокие затраты энергии и других материальных ресурсов, а также растущие экологические требования к возведению и эксплуатации зданий вызвали рост интереса к новым строительным материалам. Новые материалы должны быть универсальными, простыми в использовании, долговечными и энергоэффективными. Автоклавный газобетон хорошо известен как экологически чистый строительный материал [1]. Энергия, затрачиваемая на производство газобетона, относительно невелика по сравнению с ее затратами при производстве многих других строительных материалов. Расход сырья, приходящийся на единицу готового продукта, также очень низок при производстве газобетона [2]. В процессе производства не образуется никаких существенно загрязняющих окружающую среду побочных продуктов. Благодаря хорошим теплозащитным характеристикам использование газобетона приводит к снижению потребления энергии на отопление и, соответственно, к повышению энергоэффективности зданий [3, 4]. Легкие пористые строительные материалы, такие как автоклавный газобетон, широко применяются в строительстве [5–7].

Следует отметить, что стандартизированные подходы к прогнозированию эксплуатационных свойств наружных ограждений из газобетона во многих случаях не дают нужного результата. Например, авторы [8] установили, что фактические теплофизические характеристики автоклавных аэрирован-

ных бетонных блоков в большинстве случаев не совпадают со значениями, заявленными производителями и представленными в соответствующих стандартах. Во многих случаях аналитические расчетные методы не позволяют адекватно оценивать тепловлажностные режимы, реализующиеся в конструкциях из газобетона, так как в них не учитывается возможное влияние переменных свойств материала, существенно зависящих от процессов тепло-влажнопереноса [9, 10]. Авторы [11] показали, что стандартный метод определения плоскости максимального увлажнения для наружных ограждений, включающих кладку из газобетонных блоков, дает физически необоснованный результат.

Таким образом, численное моделирование нестационарных процессов совместного тепло-влажнопереноса с привлечением эффективных нестационарных моделей [12, 13] по-прежнему сохраняет свое значение. В [14] была разработана численная модель для расчета переноса влаги в многослойных конструкциях из газобетона, учитывающая особенности тепло-влажнопереноса через границу контакта раствора и газобетонных блоков. Результаты моделирования теплопередачи, полученные в [15], показали, что теплоперенос через швы кладки из газобетонных блоков оказывает существенное влияние на ее термическое сопротивление и теплоустойчивость. В [16] выполнено исследование теплопереноса в бетоне методом численного моделирования с переменными, зависящими от времени, граничными условиями. Авторами [17] разработана физико-математическая модель и программное обеспечение, предназначенное для оценки старения бетонных конструкций, в основе которого моделирование долговременных трехмерных и нестационарных полей влажности и температуры внутри бетонных элементов, как при комнатной, так и при повышенной температуре.

Для того чтобы спрогнозировать возможное накопление влаги, способное существенно снизить теплоизоляционные свойства газобетонных конструкций, должны быть разработаны надежные методы экспериментального определения изотерм сорбции автоклавного газобетона [18]. Анализ результатов исследований процессов влагопоглощения в газобетоне, выполненный в [19], показал, что режим циркуляции воздуха, с учетом его температуры и влажности, оказывает большое влияние на показатели влагопоглощения. В [20] отмечено, что в диапазоне от низкой до средней относительной влажности диффузия водяного пара является основным механизмом переноса влаги. Поэтому при проектировании и оптимизации энергоэффективных зданий все большее внимание следует уделять транспортным свойствам водяного пара, определяемым степенью паропроницаемости. Выяснение степени возможного влияния паропроницаемости на тепло-влажностные режимы, реализующиеся при эксплуатации стен из газобетона, в том числе при низких температурах наружного воздуха, является целью настоящей работы.

Моделирование процесса тепло-влажнопереноса проводилось на основе одномерной нестационарной постановки задачи:

$$c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right], \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu(x) \frac{\partial [\varphi E]}{\partial x} + \beta \frac{\partial U}{\partial x} \right], \quad (2)$$

где x – координата;

τ – время;

t – температура, °С;

E – давление насыщенного пара;

ρ, c – плотность и удельная теплоемкость;

λ, μ, β – коэффициенты теплопроводности, паропроницаемости и влагопроводности материала соответственно.

В качестве материала исследований использовался автоклавный газобетон марки D400. Коэффициент теплопроводности газобетона принимался зависящим как от влагосодержания, так и от температуры. Для его определения использовались зависимости, предложенные в [21, 22].

Коэффициент влагопроводности рассчитывался на основе модели сорбционного увлажнения с использованием аппроксимационных полиномиальных зависимостей [12]. При его определении учитывались следующие допущения, обоснованные в [23, 24]:

– механизм переноса паровой фазы, связанный с градиентом парциального давления и коэффициентом паропроницаемости, сказывается на процессах влагопереноса во всем интервале изменения относительной влажности воздуха и, соответственно, влагосодержания материала;

– перенос жидкой влаги становится существенным при увеличении значений относительной влажности до 0,9, таким образом, слагаемое, определяющее этот процесс, следует учитывать только при достаточно большой влажности воздуха.

Расчетные параметры наружного воздуха принимались в соответствии с климатическими условиями г. Томска. Для их определения использовались формулы [12], полученные авторами статьи при обработке данных метеостанции в г. Томске.

Для оценки возможного влияния значения коэффициента паропроницаемости на влажностное состояние ограждающих конструкций из газобетона были выполнены расчеты в нескольких вариантах. Для обозначения различных вариантов используются следующие индексы: 13 – коэффициент паропроницаемости $\mu = 0,13$ мг/(м · ч · Па); 23 – $\mu = 0,23$; 33 – $\mu = 0,33$ мг/(м · ч · Па).

Расчеты проводились при уменьшении либо увеличении значения коэффициента паропроницаемости на 50 % от рекомендованного в СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий.

На рис. 1 приведены зависимости влажности газобетона, осредненной по толщине ограждения, от времени, отсчитываемого от начала эксплуатации. За начало эксплуатации ограждения принята середина июля. Начальный период характеризуется уменьшением средней влажности от первоначального значения до значительно меньшего, соответствующего ноябрю первого года эксплуатации. Затем, после небольшого участка стабильности в холодный период, происходит дальнейшее падение влагосодержания до минимальной величины.

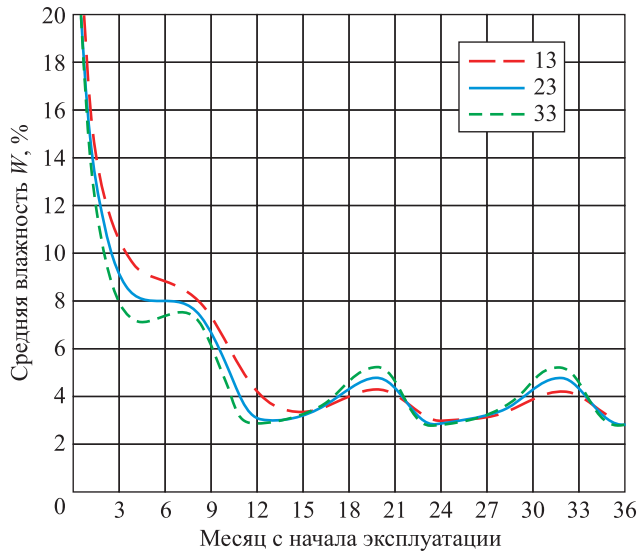


Рис. 1. Влажность, осредненная по толщине стены из газобетона

В дальнейшем происходят периодические изменения влагосодержания, приводящие к возникновению локальных максимумов, соответствующих февралю второго и третьего годов эксплуатации. Существенные различия в средней влажности, впрочем, не превышающие 25–30 %, для зависимостей, соответствующих значениям коэффициента паропроницаемости 0,13 и 0,33 мг/(м · ч · Па), наблюдаются только по окончании периода удаления строительной влаги и первого года эксплуатации. В периоды максимального увлажнения на втором и третьем годах эксплуатации это различие не превышает 18 %.

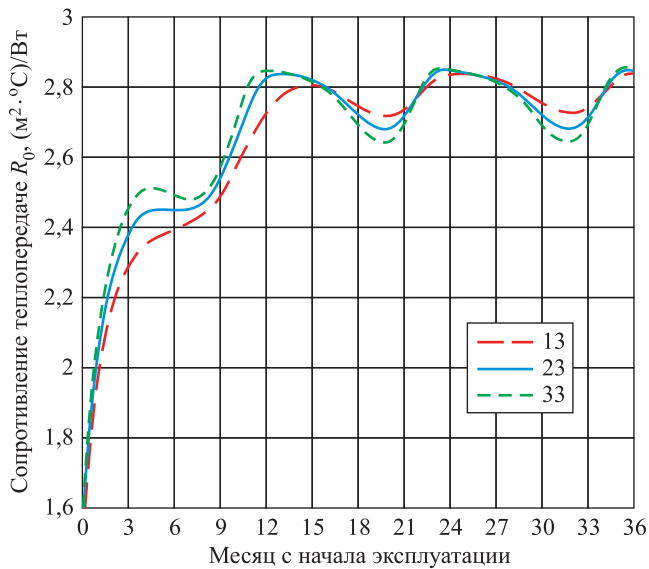


Рис. 2. Сопротивление теплопередаче стены из газобетона

Характер зависимости сопротивления теплопередаче R_0 , $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$, коррелирует с поведением средней влажности стены (рис. 2). При удалении строительной влаги сопротивление увеличивается, а затем наблюдаются его периодические колебания, при этом минимальные значения R_0 соответствуют максимальным величинам влагосодержания газобетона. Максимальные различия сопротивлений теплопередаче, связанные с изменением коэффициента паропроницаемости, составляют 7–14 %.

Рис. 3, а иллюстрирует изменение потока влаги j_v через внутреннюю поверхность ограждения из газобетона.

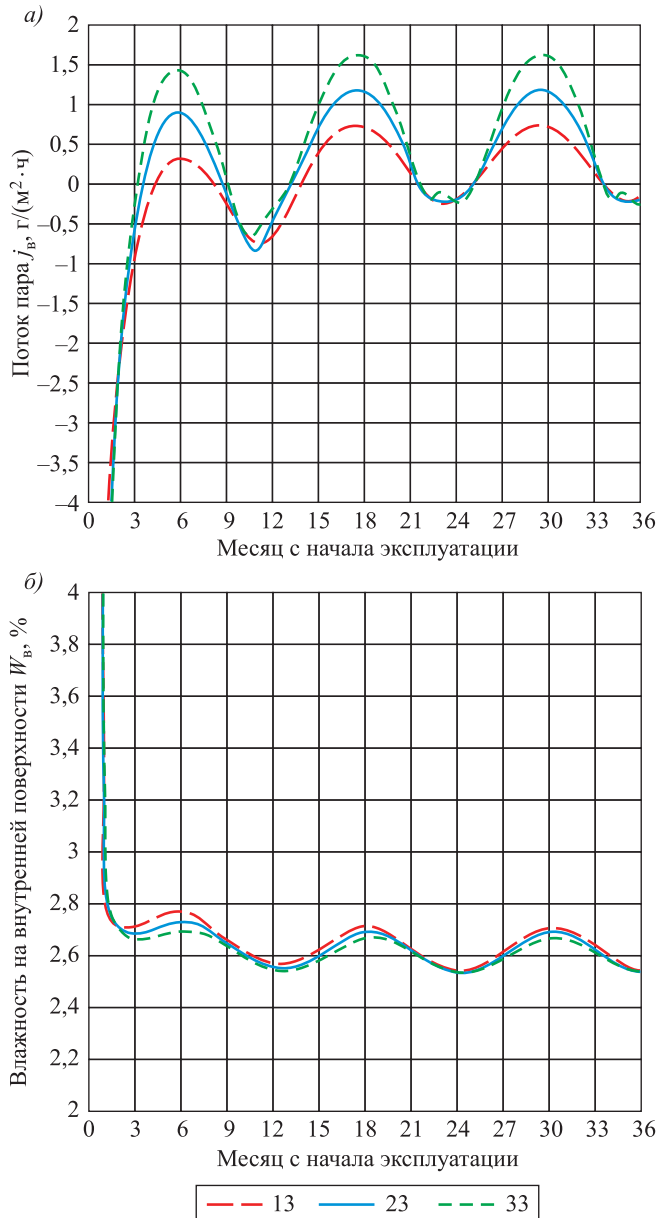


Рис. 3. Поток влаги (знак «-» соответствует высыханию, знак «+» увлажнению) (а) и влажность на внутренней поверхности стены из газобетона (б)

В период с июля по ноябрь первого года эксплуатации процессы удаления строительной влаги обуславливают быстрое высыхание внутренней поверхности. Далее, в течение всего расчетного промежутка времени, в периоды с декабря по март преобладает увлажнение, а с марта по июль – высыхание. Увеличение коэффициента паропроницаемости вызывает существенное изменение амплитуды колебаний влажностных потоков в периоды с преобладанием накопления влаги. Эта амплитуда увеличивается на 57–78 % при изменении μ от 0,13 до 0,33 мг/(м · ч · Па).

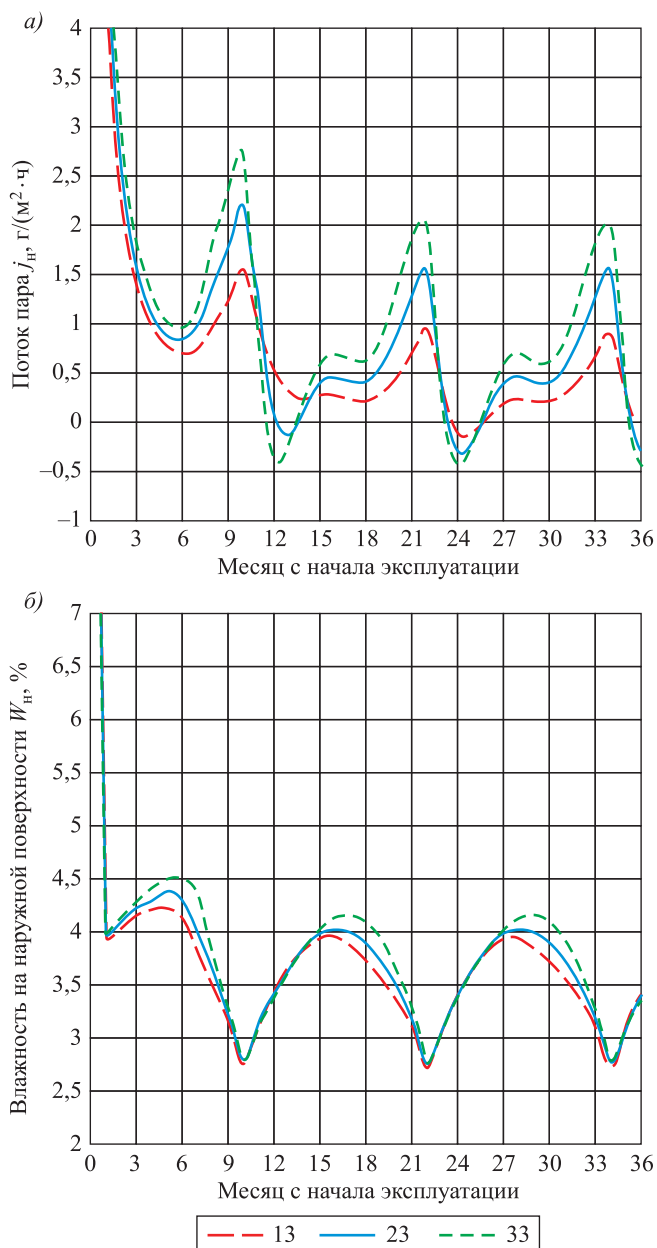


Рис. 4. Поток влаги (знак «+» соответствует высыханию, знак «-» увлажнению) (а) и влажность на наружной поверхности стены из газобетона (б)

Влажность на внутренней поверхности стены испытывает гораздо менее интенсивные колебания (рис. 3, б), и ее величина практически не подвержена влиянию, связанному с изменением коэффициента паропроницаемости. Небольшое различие в величинах влажности, около 3 %, наблюдается только вблизи первого локального максимума зависимости $W_{в}(\tau)$.

Через наружную поверхность стены в течение всего первого года эксплуатации происходит удаление влаги (рис. 4, а), как и через внутреннюю поверхность.

Поток влаги через наружную поверхность j_n достигает максимума в мае. Затем происходят периодические колебания величины влагопотока с максимальными значениями в мае, почти постоянной влагоотдачей в осенне-зимний период и минимальными величинами в июне. На наружной поверхности изменение коэффициента паропроницаемости вызывает существенное изменение амплитуды колебаний влагопотоков преимущественно в периоды с преобладанием удаления влаги. Эти различия для положительных максимальных влагопотоков достигают 42–54 %. В периоды, для которых (при больших значениях коэффициента паропроницаемости) более характерно накопление влаги, также наблюдаются несколько меньшие различия амплитуды колебаний потоков влаги.

На рис. 4, б приведена зависимость влажности на наружной поверхности W_n . Влажность на наружной поверхности также практически не чувствительна к изменению коэффициента паропроницаемости, хотя имеются некоторые отличия до 9 % между зависимостями влажности вблизи ее максимальных значений.

Изменение влажности $W_{1/3}$ в плоскости, расположенной на удалении в треть толщины стены от ее наружной поверхности и соответствующей плоскости максимального увлажнения, согласно [25], иллюстрируют графики, представленные на рис. 5.

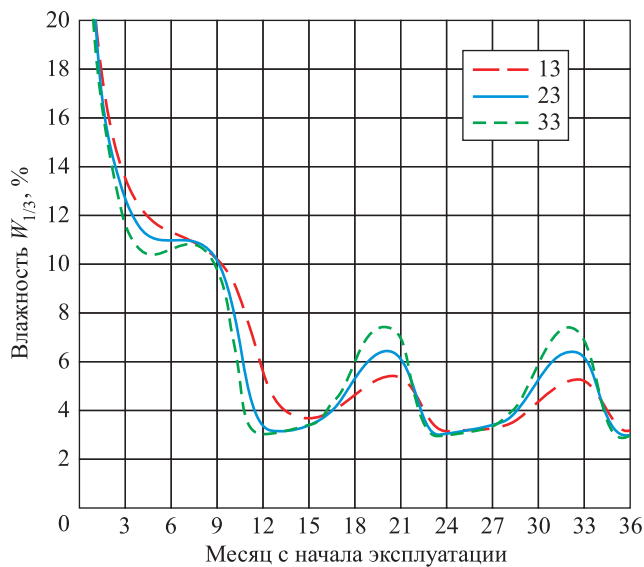


Рис. 5. Влажность в плоскости, расположенной на расстоянии 1/3 толщины от наружной поверхности

Характер колебаний влажности $W_{1/3}$ почти такой же, как и для зависимости влажности, осредненной по толщине стены (см. рис. 1). Однако различия влажности в плоскости максимального увлажнения в момент окончания удаления строительной влаги и вблизи максимальных значений на втором и третьем годах эксплуатации, связанные с изменением коэффициента паропроницаемости, существенно превосходят аналогичные показатели для средней влажности и составляют 45 и 30 % соответственно.

Заключение. Из приведенного анализа следует, что уменьшение либо увеличение значения коэффициента паропроницаемости на 50 % от стандартного значения (вариант 23) не приводит к качественному изменению процесса влагопереноса.

Следует отметить лишь две особенности: 1) уменьшение коэффициента паропроницаемости увеличивает период удаления строительной влаги до 15 мес и уменьшает амплитуду колебания влажности в процессе дальнейшей эксплуатации; 2) увеличение коэффициента паропроницаемости практически не сказывается на скорости удаления строительной влаги, но заметно увеличивает амплитуду колебания влажности в процессе дальнейшей эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Klingner R.* Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. 2008. P. 1–43.
2. Autoclaved Aerated Concrete // ECT Fact Sheets. Purdue, ECT Team, 2007. P. 84.
3. *Gorshkov A.S., Vatin N.I., Rymkevich P.P., Kydrevich O.O.* Payback period of investments in energy saving // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 78(2). P. 65–75.
4. *Gorshkov A., Murgul V., Oliyuk O.* Forecasted Payback Period in the Case of Energy-Efficient Activities // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 53.
5. *Стерлягов А.Н., Низовцев М.И.* Теплотехнические особенности наружных стен малоэтажных зданий // Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий: сб. науч. тр. всерос. науч. конф. с междунар. участием (г. Новосибирск, 24–26 марта 2015 г.). Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2015. С. 114–123.
6. *Горшков А.С.* Условия обеспечения устойчивости для поэтажно-опертых стен из газобетонных блоков // Технологии бетонов. 2014. № 4. С. 49–55.
7. *Hendry E.A.W.* Masonry walls: Materials and construction // Construction and Building Materials. 2001. No. 15(8). P. 323–330.
8. *Vatin N., Korniyenko S.V., Gorshkov A.S., Pestryakov I.I., Olshevskiy V.* Actual thermophysical characteristics of autoclaved aerated concrete // Magazine of Civil Engineering. 2020. No. 96(4). P. 129–137.
9. *Стерлягов А.Н.* Совместный тепло- и влагоперенос в ограждающих конструкциях зданий из газобетона: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: НГАСУ, 2007. 164 с.
10. *Крайнов Д.В., Садыков Р.А.* Влияние влагосодержания на теплозащитные свойства ограждающей конструкции // Вестн. МГСУ. 2011. № 3. С. 404–410.
11. *Корниенко С.В., Ватин Н.И., Горшков А.С.* Оценка влажностного режима стен с фасадными теплоизоляционными композиционными системами // Стр-во уникальных зданий и сооружений. 2016. № 6. С. 34–54.
12. *Жуков А.В., Цветков Н.А., Хуторной А.Н., Толстых А.В.* Влияние температурной зависимости изотермы сорбции и коэффициента теплопроводности на влагоперенос в наружной стене из газобетона // Вестн. МГСУ. 2018. Т. 13. № 6 (117). С. 729–739.

13. Васильев Г.П., Личман В.А., Песков Н.В. Моделирование процесса сушки ограждающих конструкций зданий // Жилищ. стр.-во. 2013. № 7. С. 21–26.
14. Xiaochuan Qu, Fariborz Haghighat, Mavinkal K. Kumaran. Moisture Transport Across Interfaces Between Autoclaved Aerated Concrete and Mortar // Journal of Building Physics. 2003. Vol. 26. P. 213–236.
15. Горшков А.С., Рымкевич П.П., Ватин Н.И. Моделирование процессов нестационарного переноса тепла в стеновых конструкциях из газобетонных блоков // Инж.-строит. журн. 2014. № 8. С. 38–48.
16. Qian C., Chen D., Wang H., Wang Y. Simultaneous heat and moisture transfer in concrete with time-dependent boundary conditions // Magazine of Concrete Research. 2008. Vol. 60. No. 10. P. 725–733.
17. Huang H., Spencer B.W. Grizzly model of fully coupled heat transfer, moisture diffusion, alkali-silica reaction and fracturing processes in concrete // Conference: Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems. 2018. P. 131–141.
18. Slávik R., Struhárová A., Čekon M. Reliability Study of Equilibrium Moisture Content Methods for Sorption/Desorption Isotherms Determination of Autoclaved Aerated Concrete // Applied Sciences. 2021. No. 11(2). P. 824.
19. Xiao He, Jian Yin, Jiewen Yang, Qiao Liang, Songyun Wu. Effect of Dry-Wet Circulation on Moisture Absorption of Autoclaved Aerated Concrete // Advances in Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 2019.
20. Shuai-Qi Tian, Ke Wang, Li-Wu Fan, Zi-Tao Yu, Xu Xu, Jian Ge. Transient determination on the water vapor diffusion coefficient of autoclave aerated concrete: effects of sample and sensor sizes // Conference Paper: International Heat Transfer Conference 16. 2018. P. 8629–8636.
21. Гринфельд Г.И., Куптараева П.Д. Кладка из автоклавного газобетона с наружным утеплением. Особенности влажностного режима в начальный период эксплуатации // Инж.-строит. журн. 2011. № 8. С. 41–50.
22. Киселев И.Я. Влияние равновесной сорбционной влажности строительных материалов на сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций зданий // Жилищ. стр.-во. 2013. № 6. С. 39–40.
23. Гагарин В.Г. Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий: дис. ... д-ра техн. наук. М.: НИИСФ РААСН, 2000. 396 с.
24. Киселев И.Я. Повышение точности определения теплофизических свойств теплоизоляционных строительных материалов с учетом их структуры и особенностей эксплуатационных воздействий: дис. ... д-ра техн. наук. М.: НИИСФ РААСН, 2006. 366 с.
25. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. С. 250.

Цветков Николай Александрович, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: nac.tsuab@yandex.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Цветков Дмитрий Николаевич, ст. препод.; E-mail: orf@mail.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Толстых Александр Витальевич, канд. физ.-мат. наук, доц.;

E-mail: tolstbu@yandex.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Дорошенко Юлия Николаевна, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: kafotopvent1@rambler.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 24.12.2020

Tsvetkov Nikolay Aleksandrovich, DSc, Professor; E-mail: nac.tsuab@yandex.ru
Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Tsvetkov Dmitriy Nikolaevich, Senior Lecturer; E-mail: orf@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Tolstykh Aleksandr Vital'evich, PhD, Ass. Professor; E-mail: tolstbu@yandex.ru
Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Doroshenko Yuliya Nikolaevna, PhD, Ass. Professor; E-mail: kafotopvent1@rambler.ru
Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

ASSESSMENT OF EFFECT OF STEAM PERMEABILITY COEFFICIENT ON MOISTURE TRANSFER IN OUTER WALL FROM AERATED CONCRETE

Numerical simulation of long-term heat and moisture transfer processes in a flat homogeneous wall made of aerated concrete D400 is performed, taking into account the movement of sorption moisture due to the gradient of the partial pressure of water vapor and supersorption moisture due to the gradient of moisture content. The moisture conductivity coefficient was calculated within the sorption humidification model using approximation polynomial dependencies obtained by the authors of the article. The possible effect of reducing or increasing the value of the vapor permeability coefficient by 50 % of the recommended value on the heat and humidity modes realized during the operation of aerated concrete walls, including at low outdoor temperatures, was found out. It is established that the change in the vapor permeability coefficient affects the construction moisture removal period and the amplitude of humidity fluctuations during further operation, without changing the construction moisture removal rate.

Key words: heat and humidity regime, humidification of aerated concrete, sorption humidity, super-sorption humidity, coefficient of vapor permeability, moisture conductivity, thermal conductivity, vapor phase transfer, liquid moisture transfer.

REFERENCES

1. *Klingner R.* Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2008. Pp. 1–43.
2. Autoclaved Aerated Concrete. ECT Fact Sheets. Purdue, ECT Team, 2007. P. 84.
3. *Gorshkov A.S., Vatin N.I., Rymkevich P.P., Kydrevich O.O.* Payback period of investments in energy saving. Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 78(2). Pp. 65–75.
4. *Gorshkov A., Murgul V., Oliylyk O.* Forecasted Payback Period in the Case of Energy-Efficient Activities. MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 53.
5. *Sterlyagov A.N., Nizovtsev M.I.* Teplotekhnicheskiye osobennosti naruzhnykh sten maloetazhnykh zdaniy [Thermotechnical features of the outer walls of low-rise buildings]. Energo- i resursoeffektivnost' maloetazhnykh zhilykh zdaniy: sbornik nauchnykh trudov vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem (g. Novosibirsk, 24–26 marta 2015 g.) [Energy and resource efficiency of low-rise residential buildings: collection of scientific works of all-Russian scientific conference with international participation (Novosibirsk, March 24–26, 2015)]. Novosibirsk, Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2015. Pp. 114–123. (in Russian)
6. *Gorshkov A.S.* Usloviya obespecheniya ustoychivosti dlya poetazhno-opertykh sten iz gazobetonnykh blokov [Conditions for ensuring stability for pave-in-place walls made of aerated concrete blocks]. Tekhnologii betonov [Concrete Technology]. 2014. No. 4. Pp. 49–55. (in Russian)

7. Hendry E.A.W. Masonry walls: Materials and construction. Construction and Building Materials. 2001. No. 15(8). Pp. 323–330.
8. Vatin N., Korniyenko S.V., Gorshkov A.S., Pestryakov I.I., Olshevskiy V. Actual thermophysical characteristics of autoclaved aerated concrete. Magazine of Civil Engineering. 2020. No. 96(4). Pp. 129–137.
9. Sterlyagov A.N. Sovmestnyy teplo- i vlagoperenos v ograzhdayushchikh konstruktivnykh zdaniy iz gazobetonov: dis. ... kand. tekhn. nauk [Joint heat and moisture transfer in building envelopes of buildings made of aerated concrete: a thesis for the degree of PhD]. Novosibirsk, NSUACE, 2007. 164 p. (in Russian)
10. Kraynov D.V., Sadykov R.A. Vliyaniye vlagosoderzhaniya na teplozashchitnyye svoystva ograzhdayushchey konstruktivnykh zdaniy [Moisture content influence on heat-reflecting properties of a building envelope from porous concrete]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011. No. 3. Pp. 404–410. (in Russian)
11. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Otsenka vlazhnostnogo rezhima sten s fasadnymi teploizolyatsionnymi kompozitsionnymi sistemami [Assessment of moisture conditions of walls with façade's thermoinsulation composite systems with external mortar layers]. Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy [Construction of Unique Buildings and Structures]. 2016. No. 6. Pp. 34–54. (in Russian)
12. Zhukov A.V., Tsvetkov N.A., Khutornoy A.N., Tolstykh A.V. Vliyaniye temperaturnoy zavisimosti izotermiy sorbtzii i koeffitsiyenta vlagoprovodnosti na vlagoperenos v naruzhnoy stene iz gazobetonov [The influence of the temperature dependence of the isotherms sorption and coefficient of hydraulic conductivity]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018. Vol. 13. No. 6(117). Pp. 729–739. (in Russian)
13. Vasil'ev G.P., Lichman V.A., Peskov N.V. Modelirovaniye protsessa sushki ograzhdayushchikh konstruktivnykh zdaniy [Modeling the process of drying building envelopes]. Zhilishchnoye stroitel'stvo [Housing construction]. 2013. No. 7. Pp. 21–26. (in Russian)
14. Xiaochuan Qu, Fariborz Haghighat, Mavinkal K. Kumaran. Moisture Transport Across Interfaces Between Autoclaved Aerated Concrete and Mortar. Journal of Building Physics. 2003. Vol. 26. Pp. 213–236.
15. Gorshkov A.S., Rymkevich P.P., Vatin N.I. Modelirovaniye protsessov nestatsionarnogo perenosa tepla v stenovykh konstruktivnykh iz gazobetonnykh blokov [Simulation of non-stationary heat transfer processes in autoclaved aerated concrete-walls]. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal [Magazine of Civil Engineering]. 2014. No. 8. Pp. 38–48. (in Russian)
16. Qian C., Chen D., Wang H., Wang Y. Simultaneous heat and moisture transfer in concrete with time-dependent boundary conditions. Magazine of Concrete Research. 2008. Vol. 60. No. 10. Pp. 725–733.
17. Huang H., Spencer B.W. Grizzly model of fully coupled heat transfer, moisture diffusion, alkali-silica reaction and fracturing processes in concrete. Conference: Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems. 2018. Pp. 131–141.
18. Slávik R., Struhárová A., Čekon M. Reliability Study of Equilibrium Moisture Content Methods for Sorption/Desorption Isotherms Determination of Autoclaved Aerated Concrete. Applied Sciences. 2021. No. 11(2). P. 824.
19. Xiao He, Jian Yin, Jiewen Yang, Qiao Liang, Songyun Wu. Effect of Dry-Wet Circulation on Moisture Absorption of Autoclaved Aerated Concrete. Advances in Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 2019.
20. Shuai-Qi Tian, Ke Wang, Li-Wu Fan, Zi-Tao Yu, Xu Xu, Jian Ge. Transient determination on the water vapor diffusion coefficient of autoclave aerated concrete: effects of sample and sensor sizes. Conference Paper: International Heat Transfer Conference 16. 2018. Pp. 8629–8636.

21. *Grinfel'd G.I., Kuptaraeva P.D.* Kladka iz avtoklavного газобетона s naruzhnym utepleniyem. Osobennosti vlazhnostnogo rezhima v nachal'nyy period ekspluatatsii [Autoclaved aerated concrete masonry with external insulation. Features of moisture conditions during the initial period of operation]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering]. 2011. No. 8. Pp. 41–50. (in Russian)
22. *Kiselev I.Ya.* Vliyaniye ravnovesnoy sorbtionnoy vlazhnosti stroitel'nykh materialov na soprotivleniye teploperedache naruzhnykh ograzhdayushchikh konstruksiy zdaniy [The effect of equilibrium sorption of moisture in building materials for resistance to heat transfer of enclosing structures of buildings]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo* [Housing construction]. 2013. No. 6. Pp. 39–40. (in Russian)
23. *Gagarin V.G.* Teoriya sostoyaniya i perenosa vlagi v stroitel'nykh materialakh i teplozashchitnyye svoystva ograzhdayushchikh konstruksiy zdaniy: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Theory of the state and transport of moisture in building materials and heat-shielding properties of enclosing structures of buildings: thesis for the degree of DSc]. Moscow, Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, 2000. 396 p. (in Russian)
24. *Kiselev I.Ya.* Povysheniye tochnosti opredeleniya teplofizicheskikh svoystv teploizolyatsionnykh stroitel'nykh materialov s uchetom ikh struktury i osobennostey ekspluatatsionnykh vozdeystviy: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Increase of accuracy of definition of thermophysical properties of heat-insulating building materials taking into account their structure and features of operational influences: the thesis for obtaining the scientific degree of DSc]. Moscow, Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, 2006. 366 p. (in Russian)
25. *Fokin K.F.* Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastey zdaniy [Building heat engineering of enclosing parts of buildings]. Moscow, AVOK-PRESS, 2006. 250 p. (in Russian)