

Лешкевич Владимир Владимирович, старший научный сотрудник, Белорусский национальный технический университет, филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт» (г. Минск, Беларусь)

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ НАРУЖНЫХ СТЕН ИЗ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ

© РУП «Институт БелНИИС», 2018
Institute BelNIIS RUE, 2018

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты численного моделирования процессов переноса теплоты и влаги в наружных стенах из ячеистого автоклавного бетона и способ их применения для расчетов долговечности наружных стен.

Выполнены расчеты изменения температурного и влажностного состояния (сушки) в нестационарных условиях для стен с наружной и внутренней штукатуркой полимерно-цементным составом и без нее. Граничные условия для расчета принимались по фактическим данным метеорологических наблюдений. Начальная влажность ячеистого бетона принята 35 % по массе. Шаг по времени принят в расчетах равным 3 часа. Показано, что полимерно-цементная штукатурка с наружной и внутренней стороны рассматриваемой конструкции значительно увеличивает сроки выхода эксплуатационной влажности ячеистого бетона на расчетные значения. При отсутствии штукатурных слоев эксплуатационная влажность достигает значений около 5 % по массе примерно за три года эксплуатации. Полученные результаты соответствуют имеющимся данным натурных стендовых исследований.

Выполнены расчеты двумерных нестационарных полей температуры и влажности углового сопряжения стен из ячеистого автоклавного бетона. Начальная влажность ячеистого

бетона принята 5 % по массе. Предложен способ расчета долговечности наружных стен, для чего применяется известный метод С. В. Александровского. Требуемые параметры для расчета долговечности предлагается вычислять на основании численного моделирования полей температуры и влажности в нестационарных условиях эксплуатации наружных стен. Это позволяет сократить время исследований, так как, в отличие от оригинального метода, не требуется проведения многолетних натурных исследований влажностного состояния материалов.

Ключевые слова: нестационарный тепловлажностный режим, влажность по массе, сушка стен, численное моделирование, расчет долговечности стен.

Для цитирования: Лешкевич, В. В. Результаты прогнозирования температурно-влажностного состояния наружных стен из ячеистого бетона и их применение для расчета долговечности / В. В. Лешкевич // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2018. – Вып. 10. – С. 185–199. <https://doi.org/10.23746/2018-10-12>

Uladzimir Liashkevich, Senior Researcher, Branch of Belarusian National Technical University “Research Polytechnic Institute” (Minsk, Belarus)

FORECASTING RESULTS OF THE TEMPERATURE AND MOISTURE CONTENT AND THEIR APPLICATION TO THE DURABILITY CALCULATION OF EXTERNAL CELLULAR CONCRETE WALLS

ABSTRACT

The results of numerical modeling of heat and moisture transfer processes in the outer walls of cellular autoclaved concrete and their application for calculating the durability are presented

The calculations of the temperature and moisture content (drying) in non-stationary conditions for walls with external and internal polymer-cement plaster and without it are done. The boundary conditions for the calculation were taken from the actual data of meteorological observations. The initial humidity of the cellular concrete is 35 % by weight. The time step in the calculations is 3 hours. It is shown that the polymer-cement plaster from the outer and inner sides of the structure significantly increases the time of attaining to the required values of the cellular concrete moisture content. In the absence of plaster layers, the moisture content reaches values of about 5 % by weight in about three years of operation. The obtained results correspond to the available data of bench studies.

Two-dimensional non-stationary fields of temperature and moisture content of the corner connection of cellular autoclaved concrete walls have been calculated. The initial moisture content of cellular concrete is 5 % by weight. A way for durability calculating of external walls is proposed, with using the method of S. V. Alexandrovsky. The required parameters for durability calculation are determined with numerical modeling of the temperature and moisture content fields in non-stationary operating conditions of external walls. This makes it possible to shorten the time of investigations, since, unlike the original method, it is not necessary to carry out long-term field studies of the moisture content of materials.

Keywords: non-stationary heat and moisture transfer regime, moisture content by weight, drying of walls, numerical modeling, calculating the durability of walls.

For citation: Liashkevich U. Forecasting results of the temperature and moisture content and their application to the durability calculation of external cellular concrete walls. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 10. 2018. Pp. 185–199. <https://doi.org/10.23746/2018-10-12> (in Russian)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время достаточно распространенной проблемой является повышенная влажность ячеистого автоклавного бетона наружных стен в первые годы эксплуатации зданий.

Научно-исследовательскими организациями проводится широкая работа в данном направлении: разработаны новые виды штукатурных составов, отличающиеся высокой паропроницаемостью [1], предлагаются варианты сушки изделий из ячеистого бетона в заводских условиях [2], получены данные натурных экспериментов о сроках выхода конструкций на расчетный влажностный режим эксплуатации [3, 4]. Ряд озвученных задач может быть решен также расчетными способами с помощью численного моделирования. Применение данных методов позволяет значительно уменьшить материальные расходы (не требуется возведения конструкций на стендах, отбор проб и др.) при большей гибкости (возможно провести исследования большого количества разнообразных конструкций) и меньших затратах времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ НАРУЖНЫХ СТЕН ИЗ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

С помощью программы для расчета нестационарных полей температуры и влажности ограждающих конструкций [5], разработанной автором, выполнено прогнозирование температурно-влажностного режима наружной стены в виде кладки толщиной 400 мм блоков из ячеистого бетона плотностью 400 кг/м^3 в двух вариантах:

- оштукатуренной с наружной и внутренней стороны полимерно-цементным раствором (толщина соответственно 5 и 4 мм);
- без оштукатуривания.

Теплофизические характеристики материалов приняты по результатам проведенных лабораторных исследований [5, 6]. Коэффициент паропроницаемости штукатурного покрытия согласно [7] составляет не менее $0,02 \text{ мг}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па})$.

Начальные условия приняты в виде известных значений функций температуры и влажности (ячеистый бетон – 35 % по массе; полимерно-цементная штукатурка – 12 % по массе) в любой точке рассматриваемой конструкции.

Граничные условия для каждого шага по времени, который составляет 3 часа, рассчитывались на основании данных метеонаблюдений для г. Минска [8].

По рассчитанному полю влажности вычислены значения эксплуатационной влажности ячеистого бетона по состоянию на 1 апреля и 1 октября каждого рассматриваемого года эксплуатации по формуле [9]:

$$u \approx \frac{\delta}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{\eta + u_i}} - \frac{1}{\eta} \quad (1)$$

- где δ – толщина слоя конструкции, м;
 u_i – влагосодержание i -го слоя материала, кг/кг;
 Δx_i – толщина i -го слоя материала, м;
 η – коэффициент теплотехнического качества;
 n – количество рассматриваемых слоев материала.

Полученное изменение эксплуатационной влажности представлено графически на рисунке 1.

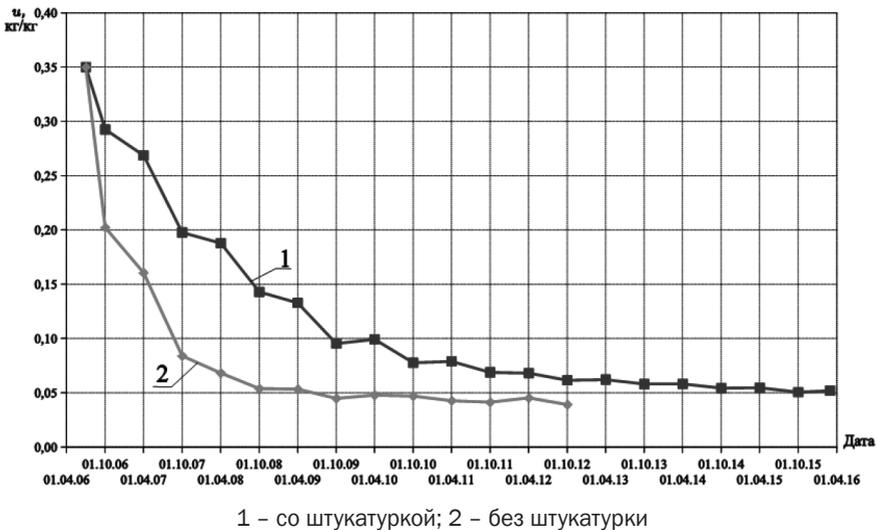


Рисунок 1. Изменение эксплуатационной влажности ячеистого бетона по состоянию на 1 октября и 1 апреля за период с 01.07.2006 по 29.02.2016 по результатам расчета

Представленные данные хорошо согласуются с результатами натурального эксперимента [3] и сведениями, приведенными в [4].

Результаты расчетов показывают, что наличие штукатурного слоя из полимерно-цементного состава играет доминирующую роль в процессе сушки слоя ячеистого бетона: эксплуатационная влажность стен без штукатурных слоев достигает значения 5 % примерно через три года эксплуатации, в то время как оштукатуренная конструкция выходит на эти значения на девятый год.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НАРУЖНЫХ СТЕН

Метод расчета долговечности наружных ограждающих конструкций по стойкости наружного промерзающего слоя, разработанный С. В. Александровским [10], основан на анализе изменения влажности наружного промерзающего слоя материала, значения которой получены экспериментальным путем в процессе многолетних натуральных исследований.

Результатирующая формула определения долговечности имеет вид

$$\Theta = \frac{N \cdot (W_i - W_p)}{[W_y^{(A)} - W_p] \sum_{(1)} n_1^{(B)} \xi_1^{(B)}(t) + [W_y^{(O)} - W_p] \sum_{(1)} n_1^{(O)} \xi_1^{(O)}(t)}, \quad (2)$$

где Θ – время эксплуатации в годах, равное долговечности ограждения;

N – выдерживаемое материалом наружного защитного слоя число циклов попеременного замораживания при стандартных испытаниях на морозостойкость;

W_i – массовое отношение влаги в материале, соответствующее его естественному полному водонасыщению без вакуумирования, кг/кг;

W_p – равновесное массовое отношение влаги в материале, ниже которого при температуре минус 20 °С лед в нем не образуется, кг/кг;

$W_y^{(A)}, W_y^{(i)}$ – массовые отношения влаги в материале в зоне промерзания ограждения в условиях его эксплуатации на зимне-весеннем (В) и летне-осеннем (О) интервалах года, кг/кг;

$\xi_1(t)$ – переменные коэффициенты льдистости, соответствующие интервалу года, зависящие от достигаемой материалом отрицательной температуры в случае перехода ее через 0°C до значения ниже температуры замерзания в нем жидкой влаги;

n_1 – число случаев перехода через 0°C до значения ниже температуры замерзания в нем жидкой влаги на соответствующем интервале года.

Предлагаемый способ заключается в получении необходимых для применения формулы (2) данных путем расчета нестационарного температурно-влажностного поля ограждения, что позволяет сократить временные затраты, обусловленные проведением натурных исследований.

Расчетная схема рассматриваемой конструкции представлена на рисунке 2.

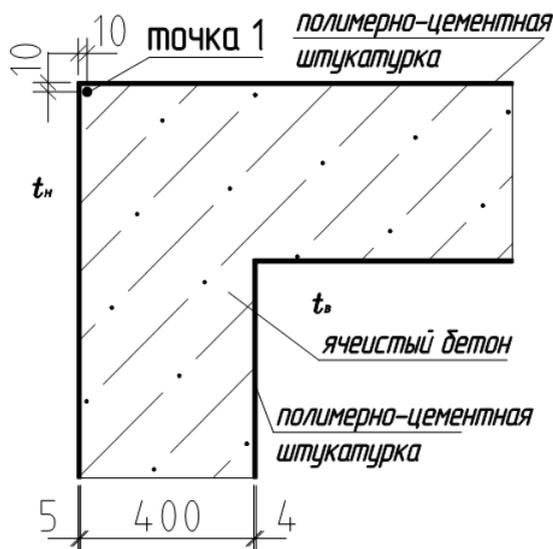


Рисунок 2. Схема рассматриваемого фрагмента конструкции

Срок эксплуатации в расчете тепловлажностного режима принят 3 года, начальная влажность ячеистого бетона – 5 % по массе.

Изолинии массовой влажности ячеистого бетона для некоторых моментов времени представлены на рисунках 3–6.

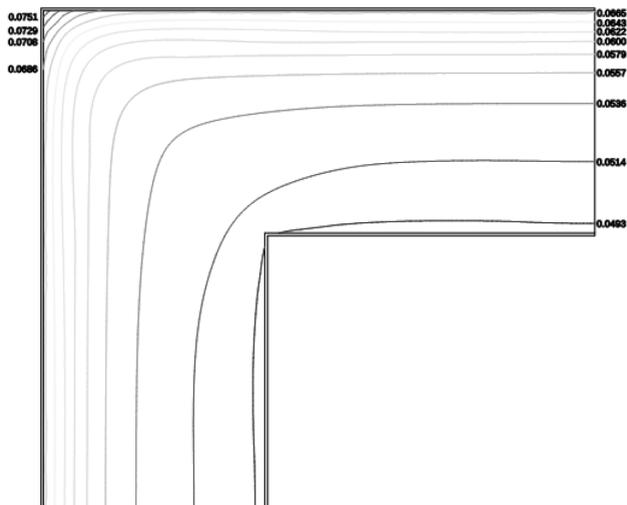


Рисунок 3. Расчетные изолинии влагосодержания (кг/кг) ячеистого бетона. Момент времени 01.11.2006 21:00:00 (номер шага 991)

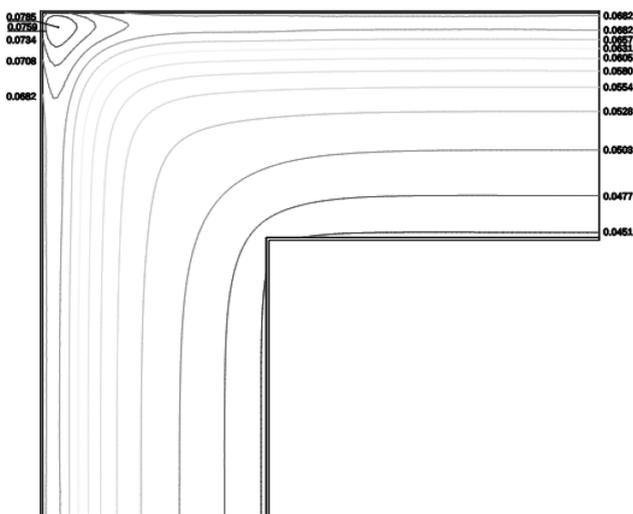


Рисунок 4. Расчетные изолинии влагосодержания (кг/кг) ячеистого бетона. Момент времени 02.04.2007 00:00:00 (номер шага 2198)

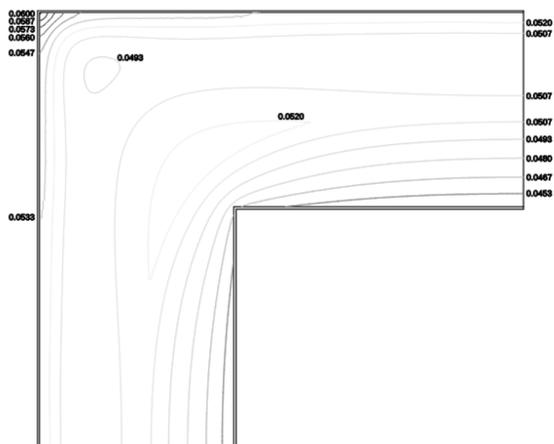


Рисунок 5. Расчетные изолинии влагосодержания (кг/кг) ячеистого бетона. Момент времени 02.01.2009 00:00:00 (номер шага 7320)

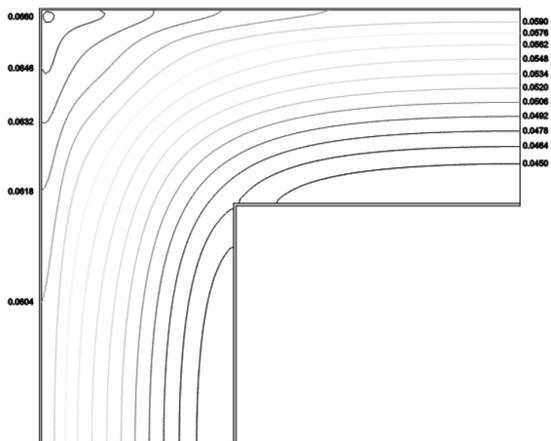


Рисунок 6. Расчетные изолинии влагосодержания (кг/кг) ячеистого бетона. Момент времени 30.06.2009 21:00:00 (номер шага 8759)

На рисунках 7–9 представлены зависимости изменения массовой влажности от времени в точке 1 (рис. 2), расположенной на расстоянии 10 мм от наружной поверхности, сопоставленные с аналогичными зависимостями для температуры и относительной

влажности наружного воздуха, а также температуры в рассматриваемой точке.

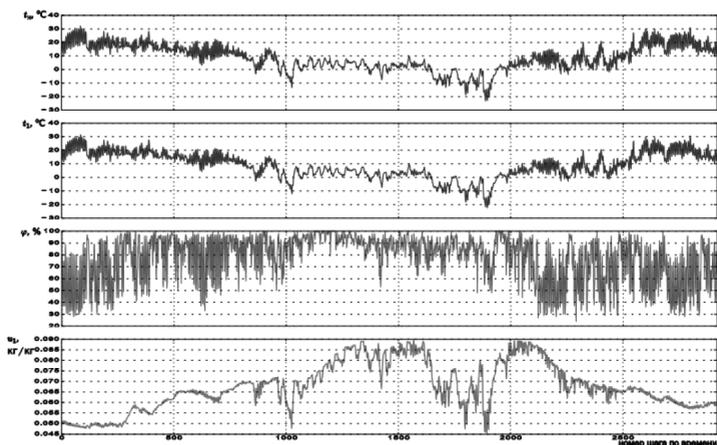


Рисунок 7. Изменение значений температуры наружного воздуха t_n , относительной влажности наружного воздуха ϕ , температуры t_h в точке 1, влагосодержания u_h в точке 1 во временном интервале с 01.07.2006 00:00:00 до 01.07.2007 18:00:00

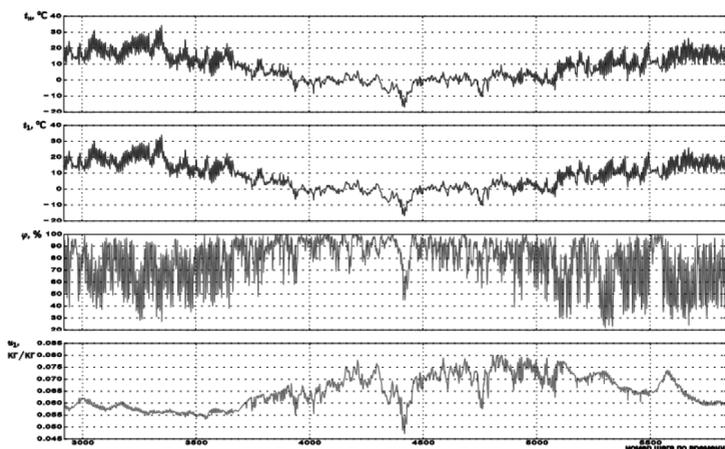


Рисунок 8. Изменение значений температуры наружного воздуха t_n , относительной влажности наружного воздуха ϕ , температуры t_h в точке 1, влагосодержания u_h в точке 1 во временном интервале с 01.07.2007 21:00:00 до 30.06.2008 15:00:00

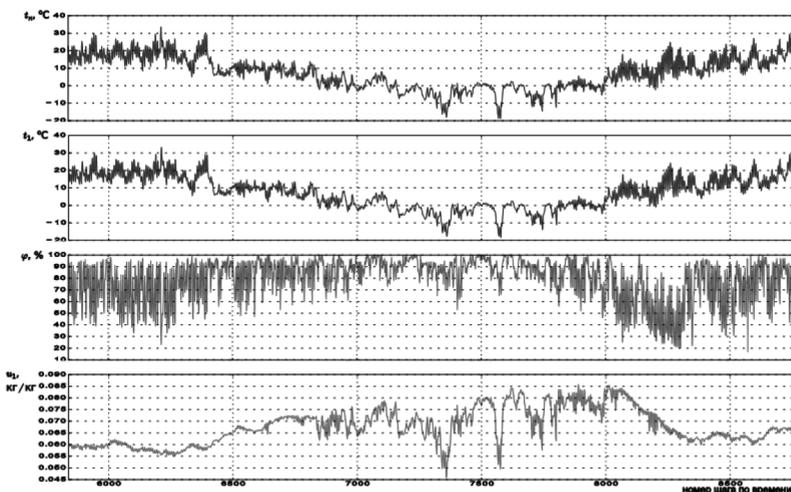


Рисунок 9. Изменение значений температуры наружного воздуха t_n , относительной влажности наружного воздуха φ , температуры t_1 в точке 1, влагосодержания u_1 в точке 1 во временном интервале с 30.06.2008 18:00:00 до 30.06.2009 21:00:00

Согласно [11] морозостойкость ячеистого бетона блоков наружных стен составляет не менее $N=35$. Массовое отношение влаги в материале, соответствующее его естественному полному водонасыщению без вакуумирования, по результатам лабораторных исследований [5] $W_i = 0,87$ кг/кг. Равновесное массовое отношение влаги в материале, ниже которого при температуре -20 °С лед в нем не образуется, согласно [10] $W_p = 0,04$ кг/кг.

Массовые отношения влаги в материале в условиях его эксплуатации на зимне-весеннем и летне-осеннем интервалах года по результатам расчета (рис. 7–9) составили $W_{\bar{y}}^{(A)} = 0,0724$ и $W_{\bar{y}}^{(I)} = 0,0614$ кг/кг.

Комплексы $\sum_{(l)} n_1 \xi_1^{(l)}(t)$ по результатам численного расчета температурного поля по данным рисунков 7–9 составили:

$$\sum_{(l)} n_1^{(B)} \xi_1^{(B)}(t) = 13,581, \quad \sum_{(l)} n_1^{(O)} \xi_1^{(O)}(t) = 1,066.$$

Подстановка полученных параметров в уравнение (2) дает $\Theta = 62,76$ лет, что выше минимальной продолжительности эффективной эксплуатации строительных конструкций в виде кладки из облегченных бетонных блоков, которая составляет 30 лет [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнены расчеты тепловлажностного состояния наружной стены из ячеистого автоклавного бетона в условиях эксплуатации. Показано, что наличие штукатурных слоев из полимерно-цементных составов значительно увеличивает сроки выхода рассматриваемой конструкции на значения эксплуатационной влажности 5 % по массе.
2. Представлены результаты численного прогнозирования нестационарного двухмерного температурно-влажностного поля наружного углового сопряжения стен из ячеистого бетона в условиях эксплуатации и показан вариант использования полученных данных для расчетов долговечности наружных стен. Важно отметить, что полученная продолжительность эксплуатации является условной в связи с невозможностью достижения рассматриваемой конструкцией нормируемых значений эксплуатационной влажности ячеистого бетона (рис. 1).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ячеистый бетон автоклавного твердения: теплофизические и эксплуатационные свойства. Проблемы и решения / Г. С. Гарнашевич, А. Г. Губская, Ж. Н. Власенко [и др.] // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 9-й международной научно-практической конференции. Минск – Могилев, 18–19 мая 2016 года / Под ред. Н. П. Сажнева, Г. С. Гарнашевич, В. Г. Морозовой. – Минск: Колорград, 2016. – С. 5–10.
2. Пути сушки газосиликатных блоков / М. И. Кузьменков, О. Г. Мартинов // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 10-й международной научно-практической конференции. Минск – Могилев, 29–31 мая 2018 года / Под ред. Н. П. Сажнева, Г. С. Гарнашевич, Ю. А. Рыхленок, В. Г. Морозовой. – Минск: А. Н. Вараксин, 2018. – С. 60–67.

3. Лаповская, С. Д. Экспериментальное определение скорости выхода начальной влаги из кладки из автоклавного газобетона в климатических условиях г. Киева / С. Д. Лаповская, О. В. Сиротин, Г. И. Гринфельд // Строительные материалы. – 2015. – № 8. – С. 18–21.
4. Теплофизические и влажностные свойства ячеистого бетона автоклавного твердения / Г. С. Гарнашевич, А. Г. Губская, Ж. Н. Власенко [и др.] // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 10-й международной научно-практической конференции. Минск – Могилев, 29–31 мая 2018 года / Под ред. Н. П. Сажнева, Г. С. Гарнашевич, Ю. А. Рыхленок, В. Г. Морозовой. – Минск: А. Н. Вараксин, 2018. – С. 54–59.
5. Лешкевич, В. В. Тепловлагоперенос в ограждениях из ячеистого бетона со штукатурными слоями полимерно-цементными составами / В. В. Лешкевич, А. Б. Крутилин, А. М. Протасевич // Проблемы современного бетона и железобетона / Под ред. О. Н. Лешкевича, В. Н. Деркача, П. В. Алявдина [и др.]. – Минск: Колорград, 2017. – № 9. – С. 325–342.
6. Крутилин, А. Б. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий / А. Б. Крутилин, Ю. А. Рыхленок, В. В. Лешкевич // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 2. – С. 46–55.
7. Композиции защитно-отделочные строительные. Технические условия: СТБ 1263-2001*. – Введ. 01-01-02. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2015. – 15 с.
8. Архив метеонаблюдений [Электронный ресурс] / Белгидромет. – 2016. – Режим доступа: <http://pogoda.by/zip/>. – Дата доступа: 02.03.2016.
9. Пастушков, П. П. Влияние влажностного режима ограждающих конструкций с наружными штукатурными слоями на энергоэффективность теплоизоляционных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03/ НИИСФ. – Москва, 2013. – 168 с.

10. Александровский, С. В. Долговечность наружных ограждающих конструкций / С. В. Александровский. – М.: НИИСФ РААСН, 2003. – 332 с.
11. Блоки из ячеистых бетонов стеновые. Технические условия: СТБ 1117-98*. – Введ. 01-04-99. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2012. – 29 с.
12. Техническое состояние и техническое обслуживание зданий и сооружений. Основные требования: ТКП 45-1.04-305-2016. – Введ. 01-04-17. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2017. – 107 с.

Статья поступила: 21.11.2018

REFERENCES

1. Garnashevich G. S., Gubskaya A. G., Vlasenko Zh. N. *Opyt proizvodstava i primeneiya yacheistogo betona avtiklavnogo tverdeniya: materialy 9-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Minsk – Mogilev, 18–19 maya 2016 goda* [Experience in the production and application of cellular autoclaved concrete: materials of the 9th International Scientific and Practical Conference. Minsk – Mogilev, May 18–19, 2016]. Pp. 5–10. (rus)
2. Kuzmenkov M. I., Martinov O. G. *Opyt proizvodstava i primeneiya yacheistogo betona avtiklavnogo tverdeniya: materialy 9-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Minsk – Mogilev, 29–31 maya 2018 goda* [Experience in the production and application of cellular autoclaved concrete: materials of the 9th International Scientific and Practical Conference. Minsk – Mogilev, May 29–31, 2018]. Pp. 60–67. (rus)
3. Lapovskaya S. D., Sirotin O. V, Grinfeld G. I. *Stroitel'nye materialy*. 2015. No 8. Pp. 18–21. (rus)
4. Garnashevich G. S., Gubskaya A. G., Vlasenko Zh. N. *Opyt proizvodstava i primeneiya yacheistogo betona avtiklavnogo tverdeniya: materialy 9-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Minsk – Mogilev, 29–31 maya 2018 goda* [Experience in the production and application of cellular autoclaved concrete: materials

- of the 9th International Scientific and Practical Conference. Minsk – Mogilev, May 29–31, 2018]. Pp. 54–59. (rus)
5. Leshkevich V. V., Krutilin A. B., Protasevich A. M. *Contemporary issues of concrete and reinforced concrete. Collected research papers. Annual.* 2017. No 9. Pp. 325–342. (rus)
 6. Krutilin A. B., Leshkevich V. V., Ryhlenok Yu. A. *Magazine of Civil Engineering.* 2015. No 2. Pp. 46–55. (rus)
 7. *Kompozicii zashchitno-otdelochnye stroitelnye. Tekhnicheskiye usloviya* [Protective and finishing compositions for construction. Specifications] : STB 1263-2001*. Minsk: The State Committee for Standardization of the Republic of Belarus, 2015. 15p. (rus)
 8. *Arkhiv meteobludeniya* [Archive of meteorological observations][Electronic resource] / The Center of Hydrometeorology, Radioactive Contamination Control and Environmental Monitoring of the Republic of Belarus. – 2016. – Mode of access: <http://pogoda.by/zip/>. – Date of access: 02.03.2016.
 9. Pastushkov P. P. *Vliyaniye vlazhnostnogo rezhima ograzhdayushchikh konstruktsiy s naruzhnymi shtukaturnymi sloyami na energoeffektivnost teploizolyacionnykh materialov* [Influence of moisture regime of enclosing structures with external plaster on energy efficiency of heat-insulating materials]. Ph.D. thesis. Moscow: NIISF, 2013. 168 p. (rus)
 10. Aleksandrovskiy S. V. *Dolgovechnost naruzhnykh ograzhdayushchikh konstruktsiy* [Durability external walling]. Moscow: NIISF RAASN, 2003. – 332 p. (rus)
 11. *Bloki iz yacheistyykh betonov stenovyye. Tekhnicheskiye usloviya* [Wall blocks of cellular concrete. Specifications]. STB 1117-98*. Minsk: The State Committee for Standardization of the Republic of Belarus, 2012. 29 p. (rus)
 12. *Tekhnicheskoye sostoyaniye i tekhnicheskoye obsluzhivaniye zdaniy i sooruzheniy. Osnovnyye trebovaniya* [Technical condition and maintenance of buildings and structures. Primary requirements]. TKP 45-1.04-305-2016. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2017. 107 p. (rus)

Received: 21.11.2018