

doi: 10.5862/MCE.54.5

## Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий

*Заведующий лабораторией теплофизических исследований А.Б. Крутилин;  
заведующий отделом ограждающих конструкций Ю.А. Рыхленок,  
РУП «Институт БелНИИС»;  
младший научный сотрудник В.В. Лешкевич,  
Белорусский национальный технический университет*

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований теплофизических характеристик автоклавных ячеистых бетонов плотностью 400 и 500 кг/м<sup>3</sup>.

Определены зависимости коэффициентов теплопроводности от температуры и влажности. Установлены граничные влажности, при которых при отрицательных температурах в порах материалов лед не образуется или его количество незначительно. Предложен новый способ определения коэффициентов термовлагопроводности. Установлено, что при отрицательных температурах образцов ячеистого бетона с влажностью более 30 % по массе одним из основных механизмов перемещения влаги является термовлагопроводность.

По результатам испытаний ячеистого бетона на морозостойкость выполнена приблизительная оценка влияния влажности на долговечность наружных стен.

**Ключевые слова:** ячеистый бетон; теплопроводность; термовлагопроводность, долговечность

### Введение

Для эффективного использования теплозащитного потенциала строительных материалов необходимо такое конструктивное исполнение наружных стен, при котором они в течение каждого годового отопительного периода будут иметь минимальные влажности и, соответственно, минимальные коэффициенты теплопроводности. Однако сокращение сроков строительства зданий приводит к возведению наружных стен с материалами, имеющими технологическую и строительную влажность. Во многих случаях данные влажности значительно превышают расчетные массовые отношения влаги этих материалов, принимаемые при теплотехнических расчетах.

Подобные проблемы выявлены и при эксплуатации наружных стен из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения низкой плотности ( $\rho = 400$  и  $500$  кг/м<sup>3</sup>). Сегодня в Республике Беларусь в первые годы эксплуатации в зданиях наблюдаются дефекты, вызванные исчерпанием ресурса морозостойкости вследствие повышенной влажности ячеистого бетона. С целью определения долговечности (здесь и далее по тексту под термином «долговечность» принят срок службы ограждающей конструкции до разрушения или повреждения ее части вследствие исчерпания ресурса морозостойкости) необходимы данные как по показателям морозостойкости, так и по теплофизическим характеристикам материалов, с помощью которых возможно прогнозирование влажностного режима наружных стен зданий.

Исследования для прогнозирования долговечности наружных ограждающих конструкций выполнены во многих работах, начиная с середины прошлого века, и ведутся по настоящее время [1–7 и др.]. Многочисленные исследования направлены на изучение долговечности теплоизоляционных материалов в условиях эксплуатации ограждающих конструкций.

По оценке долговечности используемые подходы можно условно разделить на три группы:

- на основании результатов натурных обследований и испытаний;
- по результатам испытаний в климатических камерах;
- на основании расчетов по известным характеристикам материалов с учетом прогнозируемого тепловлажностного состояния ограждающей конструкции за многолетний период эксплуатации.

Несмотря на несомненную ценность и актуальность натурных обследований и испытаний ограждающих конструкций в климатических камерах, полученные данные не всегда можно

Крутилин А.Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В.В. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий

распространять на схожие конструкции, имеющие отличия в используемых материалах. Нет единого подхода при переходе от результатов, полученных в климатических камерах, к реальным срокам долговечности. Проводимые эксперименты в климатических камерах зачастую выполняются с определенными влажностями материалов, что не может охватить весь необходимый диапазон их возможных значений, например, при оценке влияния технологической (строительной) влаги на долговечность.

В связи с вышеизложенным для оценки долговечности наружных стен зданий из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения низкой плотности ( $\rho = 400$  и  $500 \text{ кг/м}^3$ ) в настоящей работе за основу была принята методика С.В. Александровского [3] с некоторыми незначительными отклонениями.

Для определения долговечности наружных стен по данной методике необходимы не только данные по морозостойкости материалов, но и прогнозирование влажностного режима с определением массовых влажностей материалов в зоне промерзания конструкций. Для этого нужны теплофизические характеристики материалов, основные из которых:

- зависимость коэффициента теплопроводности от влажности в области положительных и отрицательных температур;
- коэффициенты паропроницаемости;
- показатели, определяющие движение жидкой влаги в изотермических и неизотермических условиях;
- изотермы сорбции материалов.

В настоящей работе приведена часть экспериментальных данных для ячеистого бетона низкой плотности ( $\rho = 400$  и  $500 \text{ кг/м}^3$ ).

### Влияние влажности на коэффициент теплопроводности ячеистого бетона

Несмотря на то, что вопрос зависимости теплопроводности от влажности считается достаточно изученным [8–15], данные для ячеистого бетона низкой плотности ( $\rho = 400$  и  $500 \text{ кг/м}^3$ ) в области отрицательных температур ограничены. Некоторые данные приведены в работах [8] и [14].

Экспериментальные исследования выполнены на образцах, предоставленных ОАО «Управляющая компания холдинга «Забудова» (далее – тип 3), в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ) на установке для измерения теплопроводности типа NETZSCH HFM 436 Lambda. Экспериментальные данные приведены на рисунках 1 и 2. Следует отметить, что при больших влажностях материалов вид графиков в области отрицательных температур может иметь отличия (иметь скачок при возникновении льда в порах).

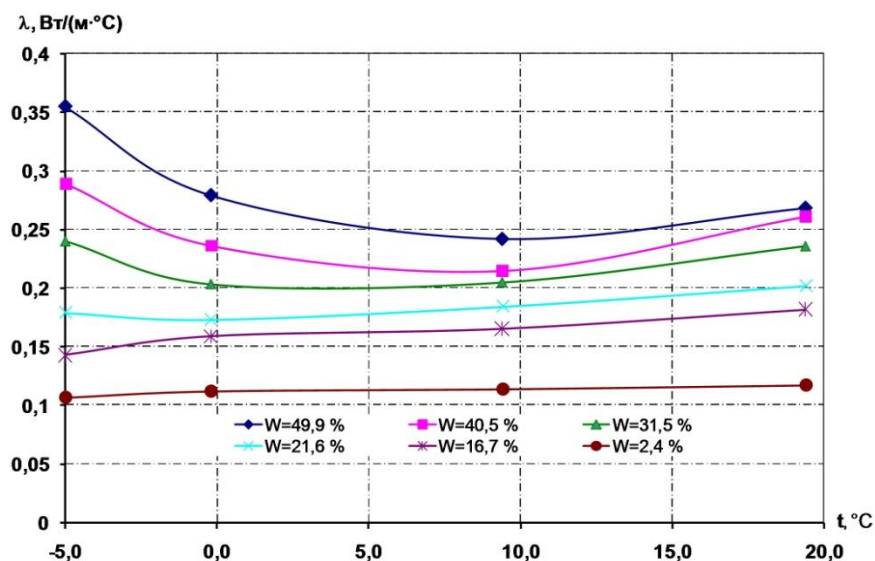


Рисунок 1. Зависимость коэффициента теплопроводности ячеистого бетона ( $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$ ) от температуры и массовой влажности

Крутилин А.Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В.В. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий

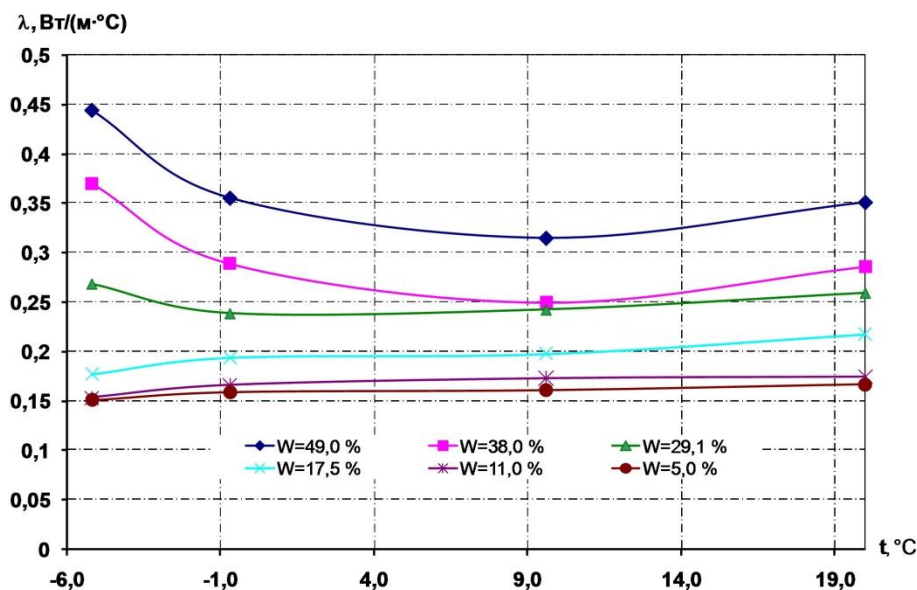


Рисунок 2. Зависимость коэффициента теплопроводности ячеистого бетона ( $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ ) от температуры и массовой влажности

Для отрицательных температур увеличение коэффициента теплопроводности происходит при массовой влажности ячеистого бетона  $W \approx 20\%$  для плотности  $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$  и более;  $W = 17,5\%$  для плотности  $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ , что связано с началом образования льда в порах материалов.

С понижением температуры коэффициенты теплопроводности ячеистого бетона в зависимости от влажности могут как увеличиваться, так и уменьшаться. Это позволяет определить граничные влажности, при которых при отрицательных температурах в порах материалов лед не образуется или его количество незначительно.

### Коэффициенты изотермической влагопроводности ячеистого бетона при положительных и отрицательных температурах

Исследования влияния влажности на коэффициент изотермической влагопроводности ячеистого бетона выполняли на образцах типа 3 плотностью  $\rho = 400$  и  $500 \text{ кг/м}^3$ .

Образцы увлажнялись водой до влажности, близкой к 20, 35, 45 и 60 % по массе, и упаковывались со всех сторон в полиэтиленовую пленку. В таком состоянии образцы выдерживались в условиях, близких к изотермическим, для равномерного перераспределения жидкой влаги по их толщине. Температуры образцов для проведения эксперимента приняты  $t = +20^\circ\text{C}$  и  $t = -5^\circ\text{C}$ .

После выдержки в изотермических условиях образцы с влажностью, близкой по показателям, стыковались методом разрезной колонки друг с другом и со всех сторон влагоизолировались полиэтиленовой пленкой. После определенной временной выдержки в изотермических условиях для принятых температур образцов колонки периодически разбирали, образцы взвешивали и собирали заново. Коэффициенты изотермической влагопроводности для различных температур определяли по формуле:

$$\beta_W = \frac{G_W}{\frac{dw}{dx}}, \quad (1)$$

где  $G_W$  – количество влаги, проходящей через  $1 \text{ м}^2$  площади в 1 час,  $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;  $dw/dx$  – перепад массовой влажности по длине образца,  $\%/ \text{м}$ .

Зависимости коэффициентов изотермической влагопроводности в зависимости от влажности для различных температур приведены на рисунках 3 и 4.

Результаты экспериментальных исследований изотермической влагопроводности ячеистого бетона показали, что при отрицательных температурах также имеется перемещение влаги из-за наличия незамерзшей воды в порах материалов. Для области положительных температур перемещение воды в образцах наблюдается при влажностях  $W > 17\%$  по массе для ячеистого бетона плотности  $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$  и при  $W > 20\%$  по массе для ячеистого бетона плотности  $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$ . Для области отрицательных температур перемещение воды в образцах наблюдается при влажности  $W > 37\%$  по массе для ячеистого бетона плотности  $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$  и  $W > 45\%$  по массе для ячеистого бетона плотности  $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$ . Результаты показывают значительное влияние температуры и плотности материала на коэффициент изотермической влагопроводности.

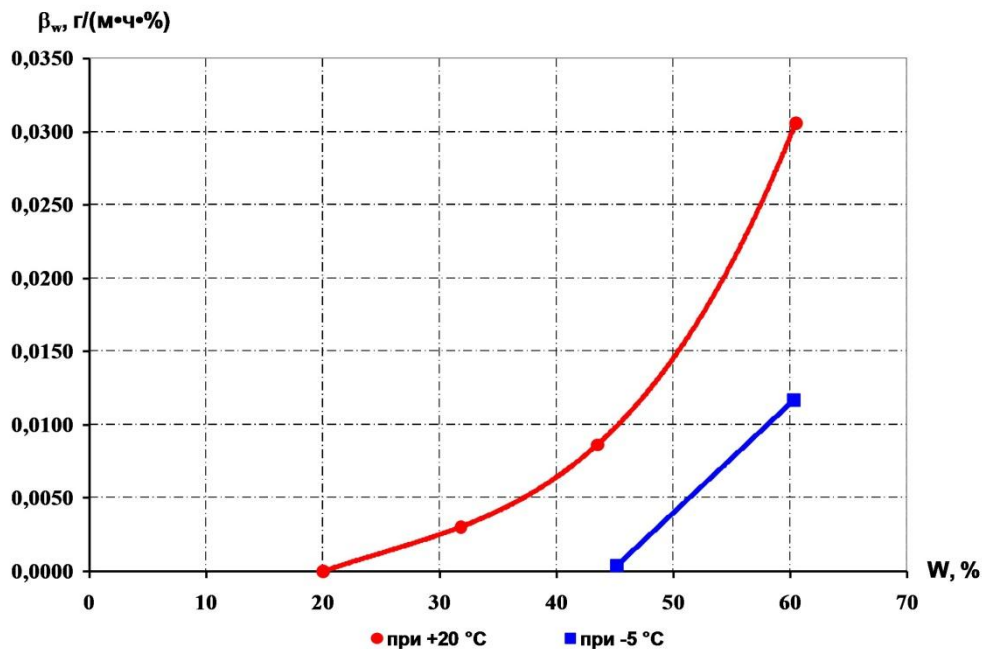


Рисунок 3. Коэффициенты изотермической влагопроводности ячеистого бетона ( $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$ ) в зависимости от влажности

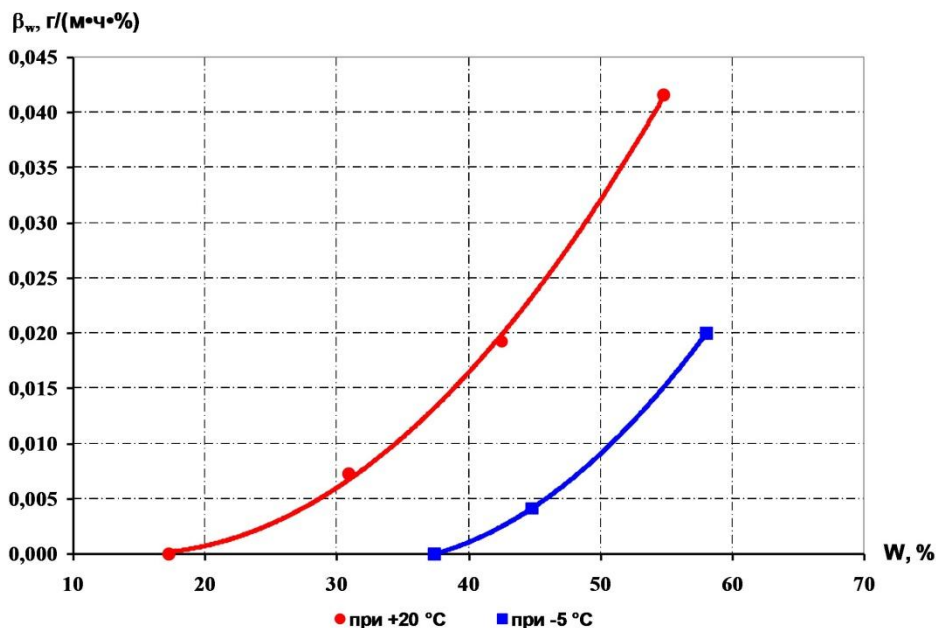


Рисунок 4. Коэффициенты изотермической влагопроводности ячеистого бетона ( $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ ) в зависимости от влажности

Крутилин А.Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В.В. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий

## Определение коэффициентов термовлагопроводности в образцах ячеистого бетона

При эксплуатации наружных стен с повышенной влажностью ячеистого бетона при наличии градиента температуры возможно также движение влаги по сечению стены за счет механизма термовлагопроводности.

Впервые данный механизм движения влаги установил А.В. Лыков [16] в середине прошлого века. Исследования по изучению этого механизма велись преимущественно в области сушки материалов вследствие наличия при протекании данных процессов значительных градиентов температуры. Определение термоградиентных коэффициентов строительных материалов производилось преимущественно советскими учеными до конца 1990-х годов. Данные по их величинам, а также исследования их зависимостей для ячеистых бетонов низких плотностей ограничены, а для отрицательных температур образцов не найдены.

Определение термоградиентных коэффициентов предлагалось различными способами, обзор которых приведен в работе [17]. Выделяют стационарные методы, заключающиеся в выдержке влагоизолированного образца между двумя термостатами до установления момента стационарного температурного и влажностного состояния, после чего по кривым распределения влагосодержания и температуры по длине образца рассчитывают термоградиентный коэффициент. Недостаток стационарных методов – длительность проведения испытаний, при которых постоянно необходимо производить монтаж и демонтаж образцов. Нестационарные методы определения термоградиентного коэффициента, как правило, требуют специально разработанного оборудования, но проводятся значительно быстрее. Разработанные методы использовались преимущественно в области положительных температур образцов.

Зарубежными исследователями за последние 20 лет выполнены исследования по влиянию градиентов температуры на перенос влаги через материалы [18, 19] преимущественно в области их сорбционного увлажнения. Работы вызвали неоднозначную реакцию по корректности выполненных экспериментальных исследований и необходимости учета градиента температуры на перенос влаги через (в) материалы при прогнозировании влажностного режима наружных ограждающих конструкций [20, 21].

Результаты исследований зарубежных авторов [16–25], а также работы К.Ф. Фокина, В.Н. Богословского, В.И. Лукьянова, В.Г. Гагарина и других исследователей предполагают различные модели для прогнозирования влажностного режима ограждающих конструкций и, соответственно, различные способы для определения коэффициентов переноса влаги через (в) капиллярно-пористые тела.

При раздельном учете основных механизмов переноса влаги в модели прогнозирования влажностного режима наружных ограждающих конструкций предлагается вместо термоградиентного коэффициента определять коэффициент термовлагопроводности (по аналогии с коэффициентом влагопроводности):

$$\beta_t = \frac{G_t}{\frac{dt}{dx}}, \quad (2)$$

где  $G_t$  – количество влаги, проходящей через  $1 \text{ м}^2$  площади за 1 час за счет термовлагопроводности,  $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;  $dt/dx$  – перепад температуры по длине образца,  $^\circ\text{C}/\text{м}$ .

Проведены эксперименты на состыкованных образцах (разрезная колонка) с разными, но близкими по величине массовыми влажностями. Для создания «теплой» и «холодной» поверхностей использована установка для измерения теплопроводности типа "NETZSCH HFM 436 Lambda" в БНТУ.

Перед стыковкой образцы ячеистого бетона с различными влажностями упаковывали в полиэтиленовую пленку и выдерживали не менее двух недель в условиях, близких к изотермическим. После выдержки составляли колонки, которые со всех сторон влагоизолировали полиэтиленовой пленкой и устанавливали в обойму из экструзионного полистирола.

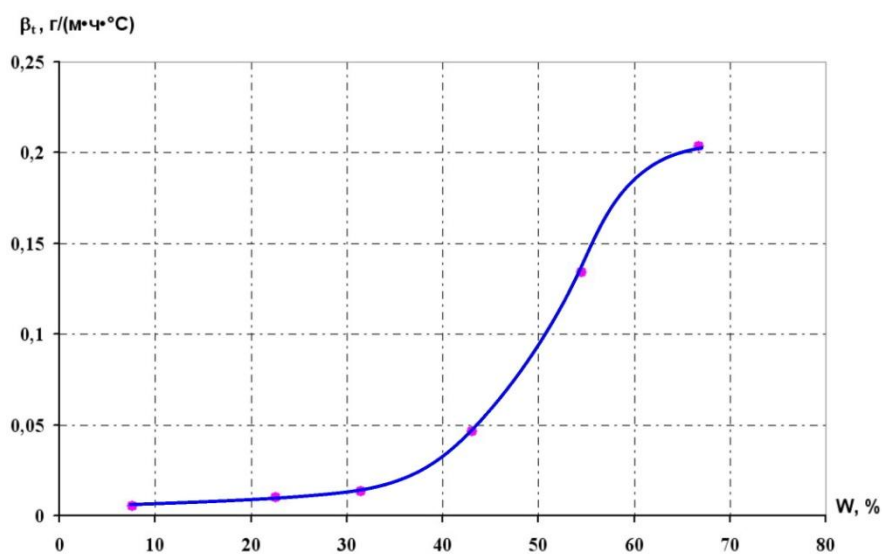
Колонки выдерживали при перепаде температуры между плитами установки  $\Delta t \approx 15 \text{ }^\circ\text{C}$ . При проведении эксперимента колонки периодически разбирали, образцы взвешивали и колонки собирали заново для определения установившегося потока влаги между образцами. Время между взвешиваниями составляло не менее суток, а общее время эксперимента – не менее трех суток.

Крутилин А.Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В.В. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий

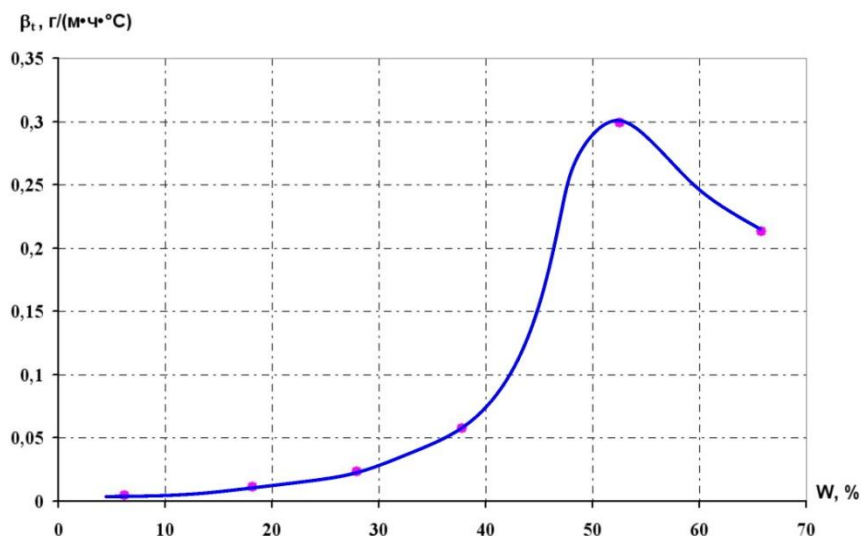
Определение перепадов температур по длине разрезной колонки выполнялось методом последовательного приближения по известным массовым влажностям образцов и известным температурам на «теплой» и «холодной» плитах прибора. Коэффициенты теплопроводности образцов ячеистого бетона колонки рассчитывали в зависимости от их средней температуры и влажности (см. рис. 1 и 2). Количество влаги за счет термовлагопроводности определяли, выделяя из общего потока влаги потоки за счет влагопроводности и паропроницаемости.

Результаты экспериментальных исследований зависимости коэффициентов термовлагопроводности ячеистого бетона от влажности при средней температуре образцов  $t \approx -5^\circ\text{C}$  приведены на рисунках 5 и 6.

Из экспериментальных зависимостей видно, что для разных значений плотности материала значительное увеличение коэффициентов термовлагопроводности происходит при влажности, превышающей 30 % по массе. При влажности менее 20 % поток влаги через единицу площади материала сопоставим с потоком водяного пара для условий выполнения эксперимента. При влажности материала более 40 % по массе и средней температуре образцов  $t \approx -5^\circ\text{C}$  коэффициенты термовлагопроводности на порядок превышают коэффициенты изотермической влагопроводности.



**Рисунок 5. Коэффициенты термовлагопроводности ячеистого бетона ( $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$ ) в зависимости от влажности при средней температуре образцов  $t \approx -5^\circ\text{C}$**



**Рисунок 6. Коэффициенты термовлагопроводности ячеистого бетона ( $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ ) в зависимости от влажности при средней температуре образцов  $t \approx -5^\circ\text{C}$**

Крутилин А.Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В.В. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий

### Влияние влажности на долговечность ячеистых бетонов

Для оценки долговечности ограждающих конструкций из ячеистых бетонов принято использовать понятие «марка по морозостойкости», которое определяется испытанием предварительно водонасыщенных образцов циклами попеременного замораживания и оттаивания. При этом циклы попеременного замораживания и оттаивания образцов ячеистого бетона происходят при определенной влажности ячеистого бетона, которая при измерении его марки по морозостойкости, как правило, неважна. В то же время остается открытым вопрос о возможности исчерпания циклов морозостойкости ячеистого бетона при эксплуатации стен, возведенных из ячеистобетонных блоков с меньшей влажностью.

Для исследований выбраны образцы двух типов: типа З и типа Г. Образцы изготовлены в виде кубов размерами 100x100x100 мм с плотностью  $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ .

Зависимости циклов морозостойкости от влажности для образцов ячеистого бетона типа Г показаны на рисунке 7, для образцов ячеистого бетона типа З – на рисунке 8. Следует отметить, что на рисунке 8 точки, обведенные красными кружками, получены не на основании опытов (по результатам двухлетнего эксперимента они не потеряли прочности и массы), а экстраполяцией с учетом результатов опытов по образцам типа Г. Вертикальными пунктирными линиями показаны граничные влажности материалов, при которых при отрицательных температурах в порах лед не образуется или его количество незначительно (из эксперимента по определению коэффициентов теплопроводности в зависимости от влажности и температуры).

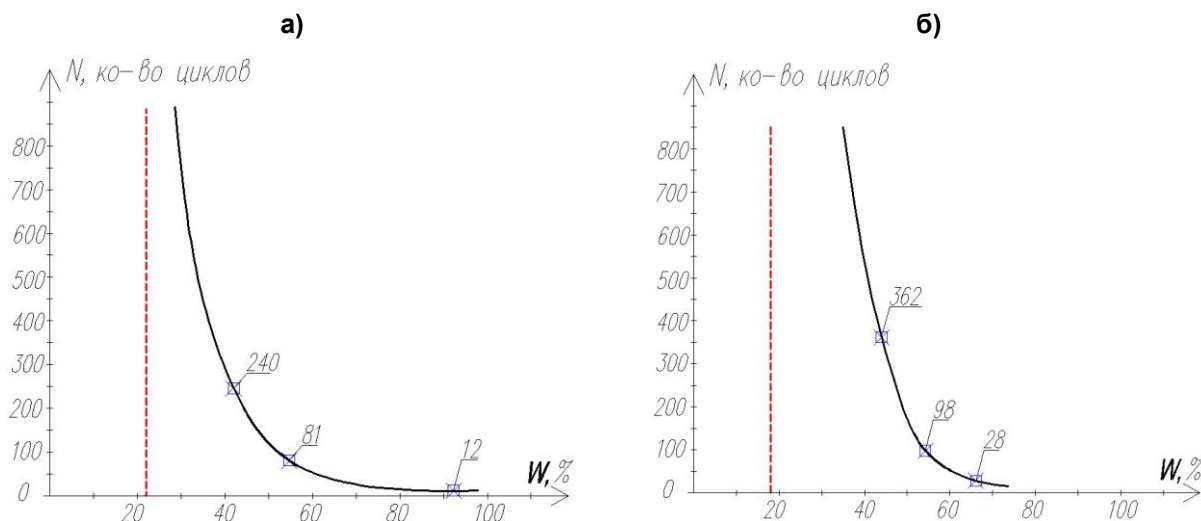


Рисунок 7. Зависимость количества циклов морозостойкости от весовой влажности образцов ячеистого бетона типа Г: а)  $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$ ; б)  $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$

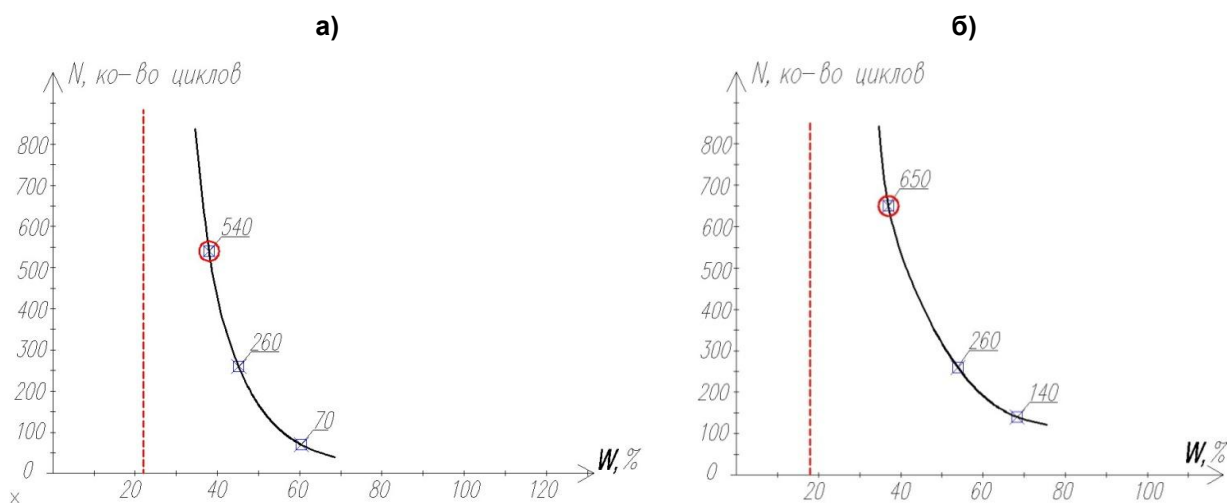


Рисунок 8. Зависимость количества циклов морозостойкости от весовой влажности образцов ячеистого бетона типа З: а)  $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$ ; б)  $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$

Крутилин А.Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В.В. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий

Сравнение образцов типа З и Г показало значительное различие в показателях морозостойкости материалов одинаковой плотности. Образцы обоих типов плотностью  $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$  имеют более высокие показатели морозостойкости в сравнении с образцами плотностью  $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$ .

По результатам испытаний в зависимости от массовой влажности определена долговечность для климатических условий Республики Беларусь в условных годах эксплуатации (см. рис. 9, 10). При этом приняты определенные (близкие к худшим) условия эксплуатации ячеистого бетона:

- ячеистый бетон в процессе эксплуатации стен зданий не изменяет влажность (в реальных конструкциях влажность изменяется с разной интенсивностью);
- коэффициенты льдистости приняты равными  $\xi(t) = 1,0$ ;
- отделка кладки снаружи выполнена тонкослойными штукатурными покрытиями с низким термическим сопротивлением ( $R < 0,2 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ );
- количество переходов через  $0 \text{ °C}$  как максимальное из областей для климатических условий Республики Беларусь.

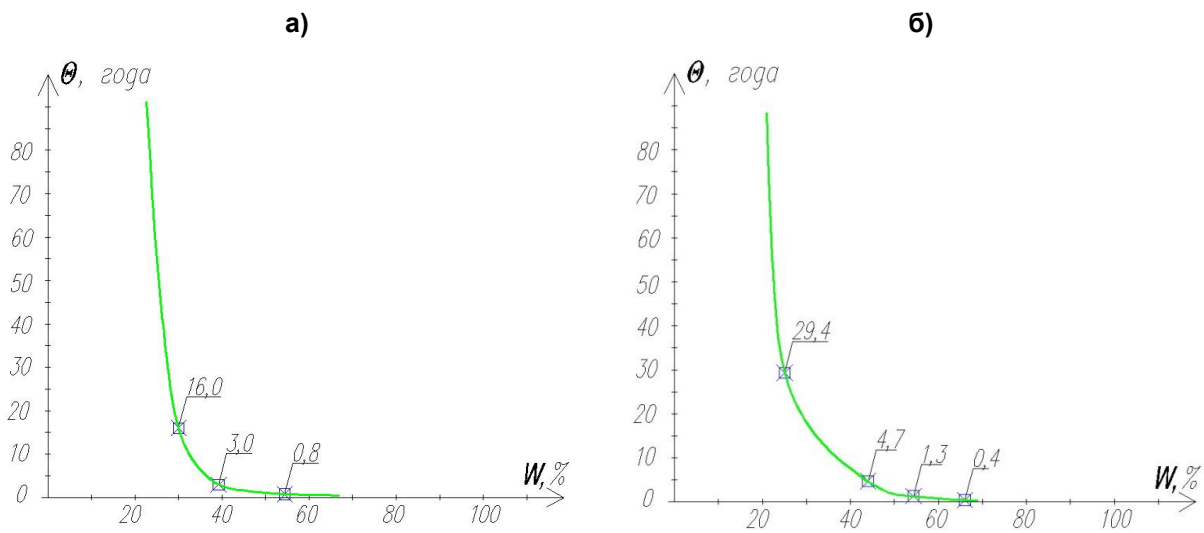


Рисунок 9. Ориентировочное количество лет эксплуатации стен из ячеистого бетона типа Г в зависимости от весовой влажности: а)  $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$ ; б)  $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$

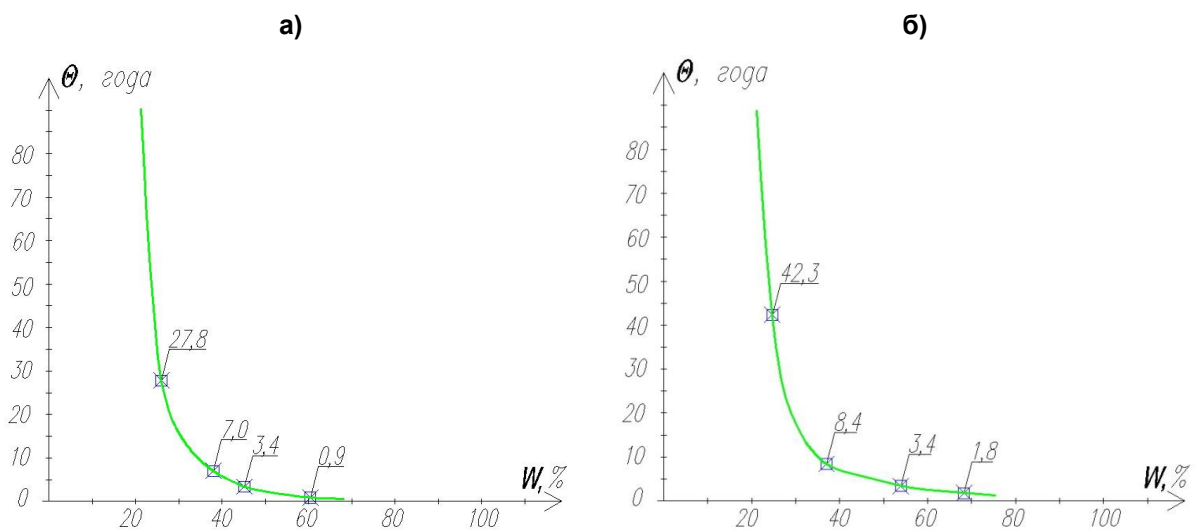


Рисунок 10. Ориентировочное количество лет эксплуатации стен из ячеистого бетона типа З в зависимости от весовой влажности: а)  $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$ ; б)  $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$

Из графиков видно, что при массовой влажности менее 25 % по массе идет резкое увеличение долговечности наружных стен из ячеистого бетона независимо от его марки по морозостойкости. Образцы с лучшей маркой по морозостойкости (образцы типа 3) имеют лучшие показатели в пределах массовой влажности 30 ... 35 %.

При больших влажностях (более 50 %) долговечность ячеистого бетона резко снижается. Определяющим фактором в таком случае становится марка по морозостойкости. Так, например, при влажности более 50 % по массе ячеистый бетон типа Г разрушается менее чем за 2 года эксплуатации, ячеистый бетон типа 3 – менее чем за 4 года эксплуатации стен. Следует отметить, что в зависимости от вида наружной отделки стены из ячеистого бетона будут иметь различный тепловлажностный режим [26, 27] и, соответственно, отличные от приведенных в данной работе показатели долговечности.

### Заключение

1. Экспериментальными исследованиями установлено влияние температуры и влажности на коэффициент теплопроводности ячеистого бетона типа 3 плотностью 400 и 500 кг/м<sup>3</sup>. На основании полученных данных предлагается определять граничные значения влажности, при которых при отрицательных температурах лед в порах материалов не образуется или его количество незначительно.

2. Установлено, что при отрицательных температурах образцов ячеистого бетона с влажностью более 30 % по массе одним из основных механизмов перемещения влаги является термовлагопроводность. В реальных условиях эксплуатации наружных стен здания, выполненных кладкой из ячеистобетонных блоков с влажностью более 30 %, в зимний период года возможно значительное увеличение влажности материалов наружных защитно-отделочных слоев и снижение долговечности за счет более интенсивного исчерпания ресурса морозостойкости.

3. Результаты исследований морозостойкости ячеистого бетона показали, что количество циклов замораживания – оттаивания зависит от плотности и влажности образцов. При больших влажностях (более 50 % по массе) долговечность стен из ячеистого бетона резко снижается. Определяющим фактором для данных влажностей материала становится марка по морозостойкости ячеистого бетона. При массовых влажностях менее 25 % по массе идет резкое увеличение долговечности наружных стен из ячеистого бетона независимо от его марки по морозостойкости.

### Литература

1. Власов О.Е. Долговечность ограждающих и строительных конструкций (физические основы). М.: Госстройиздат, 1963. 115 с.
2. Силаенков Е.С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.
3. Александровский С.В. Долговечность наружных ограждающих конструкций. М.: НИИСФ РААСН, 2003. 332 с.
4. Колотилкин Б.М., Долговечность жилых зданий. М.: Издательство литературы по строительству, 1965. 250 с.
5. Горшков А.С. Оценка долговечности стеновой конструкции на основании лабораторных и натурных испытаний // Строительные материалы. 2008. №8. С. 12–16.
6. Лобов О.И., Ананьев А.И. Долговечность облицовочных слоев наружных стен многоэтажных зданий с повышенным уровнем теплоизоляции // Строительные материалы. 2008. №4. С. 56–59.
7. Ананьев А.А., Козлов В.В., Дуденкова Г.Я., Ананьев А.И. Долговечность лицевого керамического кирпича и камня в наружных стенах зданий // Строительные материалы. 2007. №2. С. 56–58.
8. Низовцев М.И. Тепло- и массоперенос в энергоэффективных ограждающих конструкциях и климатическом оборудовании зданий. Автореф. дисс.... докт. техн. наук. Новосибирск, 2011. 39 с.
9. Бове Г. [и др.] Автоклавный ячеистый бетон. Пер. с англ. М.: Стройиздат, 1981. 87 с.
10. Кауфман Б.Н. Теплопроводность строительных материалов. М.: Государственное изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1955. 161 с.
11. Кривицкий М.Я., Левин Н.И., Макаричев В.В. Ячеистые бетоны. Технология, свойства и конструкции. М.: Издательство литературы по строительству, 1972. 137 с.

Крутилин А.Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В.В. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий

12. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. М.: Научно-исследовательский институт строительной физики Госстроя СССР, 1969. 142 с.
13. Виноградский В.М., Репьев Э.Н., Свейда Я.В. Теплопроводность силикатных ячеистых бетонов при низких отрицательных температурах // Труды института. Выпуск 22. Строительная теплофизика. / НИИСФ Госстроя СССР. М., 1979.С. 103–107.
14. Abid M. Thermophysical Properties of a Moist Porous Material: doctoral dissertation. Von der Fakultat fur Maschinenbau der Technischen Universitat Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig [Электронный ресурс]. URL: [http://digisrv-1.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal\\_derivate\\_00022493/Dissertation\\_Abid.pdf;jsessionid=8FCCAF02C37AFB4231357C0B8B004F32](http://digisrv-1.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00022493/Dissertation_Abid.pdf;jsessionid=8FCCAF02C37AFB4231357C0B8B004F32). (дата обращения: 29.12.2014).
15. Hugo H. Applied Building Physics. Boundary Conditions, Building Performance and Material Properties. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2011. 308 p.
16. Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики. Минск: Изд-во АН БССР, 1961. 519 с.
17. Дмитриевич А.Д. Теплозащитные свойства строительных материалов и конструкций. Минск: Беларусь, 1963. 212 с.
18. Trabelsi A., Belarbi R., Abahri K., Qin M. Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient. // Building Simulation. 2012. No.3. Pp. 107–115.
19. Ruut P. Moisture Dynamics in Building Envelopes. PhD Thesis Report R-071. 2003. 239 p.
20. Janssen H. A comment to “Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient” // Building Simulation. 2013. No.6. Pp. 103–108.
21. Janssen H. Thermal Diffusion of Water Vapour in Porous Materials: a Critical Review // International Conference on Durability of Building Materials and Components [Электронный ресурс]. Porto, Portugal, April 12-15, 2011. URL: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB22318.pdf>. (дата обращения: 28.01.2015).
22. Künzel H.M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters: doctoral dissertation Universität Stuttgart. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/Dissertationen/hk\\_dissertation\\_etcm45-30731.pdf](http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/Dissertationen/hk_dissertation_etcm45-30731.pdf). (дата обращения: 25.02.2015).
23. Krus M. Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials - Theoretical Principles and New Test Methods: doctoral dissertation. Universität Stuttgart. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/Dissertationen/mk\\_dissertation\\_etcm45-30730.pdf](http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/Dissertationen/mk_dissertation_etcm45-30730.pdf). (дата обращения: 25.02.2015).
24. Descamps F. Continuum and discrete modelling of isothermal water and air flow in porous media: doctoral dissertation. KU Leuven/ [Электронный ресурс]. URL: <http://bwk.kuleuven.be/bwf/PhDs/PhDDescamps>. (дата обращения: 25.02.2015).
25. Janssen H. The Influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground: doctoral dissertation. KU Leuven. [Электронный ресурс]. URL: <http://bwk.kuleuven.be/bwf/PhDs/PhDJanssen>. (дата обращения: 25.02.2015).
26. Гринфельд Г.И., Инженерные решения обеспечения энергоэффективности зданий. Отделка кладки из автоклавного газобетона: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 130 с.
27. Гринфельд Г.И., Морозов С.А., Согомонян И.А., Зырянов П.С. Влажностное состояние современных конструкций из автоклавного газобетона в условиях эксплуатации // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2. С. 33–38.

*Антон Борисович Крутилин, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел. моб.: +375297540567; эл. почта: ankr@tut.by*

*Юлия Анатольевна Рыхленок, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел. моб.: +375291558602; эл. почта: office\_3.1@tut.by*

*Владимир Владимирович Лешкевич, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел. моб.: +375295772657; эл. почта: leszkiewiczvv@gmail.com*

© Крутилин А.Б., Рыхленок Ю.А., Лешкевич В.В., 2015

doi: 10.5862/MCE.54.5

# Thermophysical characteristics of low density autoclaved aerated concrete and their influence on durability of exterior walls of buildings

**A.B. Krutilin***Republican Unitary Research Enterprise for Construction "Institute BelNIIS", Minsk, Belarus  
+375297540567; e-mail: ankr@tut.by***Y.A. Rykhlionak***Republican Unitary Research Enterprise for Construction "Institute BelNIIS", Minsk, Belarus  
+375291558602; e-mail: office\_3.1@tut.by***V.V. Liashkevich***Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus  
+375295772657; e-mail: leszkiewiczvv@gmail.com*

## Key words

aerated concrete; thermal conductivity; non-isothermal liquid transport; durability

## Abstract

The paper presents the results of experimental studies of thermophysical characteristics of autoclaved aerated concrete with density of 400 and 500 kg/m<sup>3</sup>.

The dependence of thermal conductivity on temperature and humidity was determined. The boundary humidities were set for which ice is either not formed or its amount is negligible in the pores of the materials at the temperature below zero. The new method of non-isothermal liquid transport coefficient determination was suggested. It was found that one of the basic mechanisms of moving water for cellular concrete samples with a moisture content over 30 % by weight is non-isothermal liquid transport.

The effect of humidity on durability of exterior walls is estimated according to cellular concrete frost-resistance tests.

## References

1. Vlasov O.Ye. *Dolgovechnost ograzhdayushchikh i stroitelnykh konstruktsiy (fizicheskiye osnovy)* [Durability of protecting and building structures (physical foundations)]. Moscow: Gosstroyizdat, 1963. 115 p. (rus)
2. Silayenkov Ye.S. *Dolgovechnost izdeliy iz yacheistyykh betonov* [Durability of products from cellular concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1986. 176 p. (rus)
3. Aleksandrovskiy S.V. *Dolgovechnost naruzhnykh ograzhdayushchikh konstruktsiy* [Durability of external wallings]. Moscow: NIISF RAASN, 2003. 332 p. (rus)
4. Kolotilkin B.M., *Dolgovechnost zhilykh zdaniy* [Durability of residential buildings]. Moscow: Izdatelstvo literatury po stroitelstvu, 1965. 250 p. (rus)
5. Gorshkov A.S. Otsenka dolgovechnosti stenovoy konstruktsii na osnovanii laboratornykh i naturnykh ispytaniy [Assessment of the durability of the wall structure on the basis of laboratory and field tests]. *Construction materials*. 2008. No. 8. Pp. 12–16. (rus)
6. Lobov O.I., Ananyev A.I. *Dolgovechnost oblitsovochnykh sloyev naruzhnykh sten mnogoetazhnykh zdaniy s povyshennym urovnem teploizolyatsii* [Durability of facing layers of multistory buildings external walls with increased insulation]. *Construction materials*. 2008. No.4. Pp. 56–59. (rus)
7. Ananyev A.A., Kozlov V.V., Dudenkova G.Ya., Ananyev A.I. *Dolgovechnost litsevogo keramicheskogo kirpicha i kamnya v naruzhnykh stenakh zdaniy* [The durability of ceramic facing bricks and stones within exterior walls of buildings]. *Construction materials*. 2007. No. 2. Pp. 56–58. (rus)
8. Nizovtsev M.I. *Teplo- i massoperenos v energoefektivnykh ograzhdayushchikh konstruktsiyakh i klimaticheskoy oborudovaniy zdaniy* [Heat and mass transfer in energy-efficient wallings and HVAC equipment of buildings]. Doctoral dissertation abstract. Novosibirsk, 2011. 39 p. (rus)
9. Bove G. [et al.]. *Avtoklavnyy yacheisty beton* [Autoclaved aerated concrete]. Translated from English. Moscow: Stroyizdat, 1981. 87 p. (rus)
10. Kaufman B.N. *Teploprovodnost stroitelnykh materialov* [The thermal conductivity of building materials]. Moscow: Gosudarstvennoye izd-vo literatury po stroitelstvu i arkhitekture, 1955. 161 p. (rus)

Krutilin A.B., Rykhlionak Y.A., Liashkevich V.V. Thermophysical characteristics of low density autoclaved aerated concrete and their influence on durability of exterior walls of buildings

11. Krivitskiy M.Ya., Levin N.I., Makarichev V.V. *Yacheistyye betony. Tekhnologiya, svoystva i konstruksii* [Cellular concrete. Technology, properties and structures]. Moscow: Izdatelstvo literatury po stroitelstvu, 1972. 137 p. (rus)
12. Franchuk A.U. *Tablitsy teplotekhnicheskikh pokazateley stroitelnykh materialov* [Tables of thermal performance of building materials]. Moscow: Nauchno- issledovatel'skiy institut stroitel'noy fiziki Gosstroya SSSR, 1969. 142 p. (rus)
13. Vinogradskiy V.M., Repyev E.N., Sveyda Ya.V. Teploprovodnost silikatnykh yacheistyykh betonov pri nizkikh otritsatelnykh temperaturakh [The thermal conductivity of silicate porous concrete at low temperatures below zero]. *Trudy instituta. Vypusk 22. Stroitel'naya teplofizika* [Proceedings of the Institute. Issue 22. Building Thermal Physics]. / NIISF Gosstroya SSSR. Moscow, 1979. Pp. 103–107. (rus)
14. Abid M. *Thermophysical Properties of a Moist Porous Material: doctoral dissertation. Von der Fakultat fur Maschinenbau der Technischen Universitat Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig* [Online resource]. URL: [http://digisrv-1.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal\\_derivate\\_00022493/Dissertation\\_Abid.pdf;jsessionid=8FCCAF02C37AFB4231357C0B8B004F32](http://digisrv-1.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00022493/Dissertation_Abid.pdf;jsessionid=8FCCAF02C37AFB4231357C0B8B004F32). (accessed: December 29, 2014).
15. Hugo H. *Applied Building Physics. Boundary Conditions, Building Performance and Material Properties*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2011. 308 p.
16. Lykov A.V. *Teoreticheskiye osnovy stroitel'noy teplofiziki* [Theoretical Foundations of Building Thermal Physics]. Minsk: Izd-vo AN BSSR, 1961. 519 p.
17. Dmitrovich A.D. *Teplozashchitnyye svoystva stroitelnykh materialov i konstruksiy* [Thermal insulation properties of building materials and structures]. Minsk: Belarus, 1963. 212 p. (rus)
18. Trabelsi A., Belarbi R., Abahri K., Qin M. Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient. *Building Simulation*. 2012. No.3. Pp. 107–115.
19. Ruut P. *Moisture Dynamics in Building Envelopes*. PhD Thesis Report R-071. 2003. 239 p.
20. Janssen H. A comment to "Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient". *Building Simulation*. 2013. No.6. Pp. 103–108.
21. Janssen H. Thermal Diffusion of Water Vapour in Porous Materials: a Critical Review. *International Conference on Durability of Building Materials and Components* [Online resource]. Porto, Portugal, April 12-15, 2011. URL: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB22318.pdf>. (accessed: January 28, 2015).
22. Künzel H.M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. *One- and twodimensional calculation using simple parameters: doctoral dissertation Universität Stuttgart* [Online resource]. URL: [http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/Dissertationen/hk\\_dissertation\\_etc45-30731.pdf](http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/Dissertationen/hk_dissertation_etc45-30731.pdf). (accessed: February 25, 2015).
23. Krus M. *Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials – Theoretical Principles and New Test Methods: doctoral dissertation. Universität Stuttgart* [Online resource]. URL: [http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/Dissertationen/mk\\_dissertation\\_etc45-30730.pdf](http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/Dissertationen/mk_dissertation_etc45-30730.pdf). (accessed: February 25, 2015).
24. Descamps F. *Continuum and discrete modelling of isothermal water and air flow in porous media: doctoral dissertation. KU Leuven/* [Online resource]. URL: <http://bwk.kuleuven.be/bwf/PhDs/PhDDescamps>. (accessed: February 25, 2015).
25. Janssen H. *The Influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground: doctoral dissertation. KU Leuven.* [Online resource]. URL: <http://bwk.kuleuven.be/bwf/PhDs/PhDJanssen>. (accessed: February 25, 2015).
26. Grinfeld G.I. *Inzhenernyye resheniya obespecheniya energoeffektivnosti zdaniy. Otdelka kladki iz avtoklavnogo gazobetona: ucheb. posobiye* [Engineering solutions for energy efficiency of buildings. Finishing of autoclaved aerated concrete masonry: tutorial]. Saint-Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011. 130 p. (rus)
27. Grinfeld G.I., Morozov P.A., Sogomonyan I.A., Zyryanov P.S. Vlazhnostnoye sostoyaniye sovremennykh konstruksiy iz avtoklavnogo gazobetona v usloviyakh ekspluatatsii [Moisture conditions of modern structures made of autoclaved aerated concrete in operation period]. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 2(20). Pp. 33–38. (rus)

**Full text of this article in Russian: pp. 46–55**