

Михеев Е.А., канд. техн. наук Подболотов К.Б.*

О МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРЕВЕ

Учреждение «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь, г. Минск

**Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, г. Минск*

Проведен анализ применяемых при строительстве в несущих и ограждающих конструкциях зданий легких бетонов. Установлено что вопрос огнесохранности конструкций из ячеистых бетонов почти не рассматривался. Разработана методика проведения испытания изделий из керамзитобетона, силикатного бетона, пенобетона и шлакобетона для получения зависимостей кажущейся плотности, усадки и прочности на одноосное сжатие ячеистого бетона (коэффициента условий работы при пожаре) от температуры 20...1000 °С.

Ключевые слова: легкие бетоны, ячеистый бетон, огнесохранность, методика, высокотемпературный нагрев, пожар.

Mikheyev Y.A., Ph.D. in Technology Podbolotov K.B.*

ABOUT THE METHOD OF DETERMINING THE UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH OF CELLULAR CONCRETE AT HIGH TEMPERATURE HEATING

The Establishment "Research Institute of Fire Safety and Emergencies" of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk

**The State scientific institution "Physical-technical institute of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk*

An analysis of lightweight concrete used in the construction of load-bearing and enclosing structures of buildings was carried out. It was established that the issue of fire safety of structures made of cellular concrete is almost not considered. A methodology for testing products made of expanded clay concrete, silicate concrete, foam concrete and slag concrete is developed to obtain the dependences of the apparent density, shrinkage and uniaxial compressive strength of cellular concrete (coefficient of working conditions in case of fire) on temperature 20...1000 °С.

Keywords: lightweight concrete, cellular concrete, fire safety, methodology, high-temperature heating, fire.

Легкий бетон – один из наиболее распространенных материалов, широко применяемый в современное время в несущих и ограждающих конструкциях зданий. К легким относят группу бетонов с объемным весом от 800 до 1800 кг/м³ и отсутствием в структуре крупного и тяжелого заполнителя. Именно благодаря малому весу материал получил свое название. Экологич-

ность, дешевизна, низкая плотность и теплопроводность в сочетании с достаточной прочностью и легкостью в обработке обеспечили указанному строительному материалу повсеместное применение.

Легкие бетоны классифицируются по трем основным критериям:

по назначению – теплоизоляционные, конструкционные, конструкционно-теплоизоляционные;

по структуре (способу получения) – обыкновенные, крупнопористые, ячеистые;

по составу – пенобетон, керамзитобетон, опилкобетон, силикатный бетон и другие.

В строительном комплексе Республики Беларусь легкий бетон прочно занимает одно из ведущих мест, широко применяется не только в массовом строительстве, но и при сооружении уникальных объектов, таких как Национальная библиотека Беларуси, где использованы как блоки из ячеистого бетона, так и армированные стеновые панели. При наличии собственной сырьевой базы и развитого производства, оснащенного современным технологическим оборудованием, производство ячеистого бетона автоклавного твердения стало одним из самых динамично развивающихся отраслей промышленности строительных материалов Республики Беларусь [1].

В рамках изучения легких бетонов выбраны ячеистые бетоны с различными составами, а именно керамзитобетон, силикатный бетон, пенобетон и шлакобетон, которые получили наибольшее распространение среди ячеистых бетонов.

Вместе с высокими эксплуатационными характеристиками ячеистый бетон является неорганическим негорючим материалом, обладающим высокой огнестойкостью. Огнестойкость – это способность строительных конструкций выполнять несущие и ограждающие функции при пожаре. При этом номенклатура испытанных конструкций в Республике Беларусь [2], как правило, включает толстостенные конструкции толщиной 300...400 мм, испытанные под конкретной центрально приложенной нагрузкой, показывающие пределы огнестойкости 90...150 минут и более. Распространить указанные испытания на всю номенклатуру изделий, выпускаемых в Республике Беларусь, не представляется возможным.

При этом в Республике Беларусь действует ТКП EN 1996-1-2 и СТБ EN 12602 [3, 4], включающие аналитические методики по оценке огнестойкости автоклавных ячеистых бетонов. Однако данные, представленные в данных стандартах, несколько ограничены и являются по сути частным случаем теории огнестойкости железобетонных конструкций. Иные литературные источники [5] свидетельствуют о повышении прочности ячеистого бетона при повышенных температурах, а также о значительной усадке в области 700...1000 °С. Вопрос огнестойкости изделий из ячеистого бетона практически не рассматривается [6].

Так, анализ литературных источников и технических нормативных правовых актов показал, что ячеистобетонные блоки являются эффективными строи-

тельными материалами, для оценки огнестойкости и огнесохранности которых необходимо проведение лабораторных экспериментальных исследований.

Для того чтобы понять, какие изменения происходят в структуре материала, как меняются его свойства, т. е. как влияют внутренние факторы на поведение материала в условиях пожара, необходимо хорошо знать сам материал: его происхождение, сущность технологии изготовления, состав, начальную структуру и свойства. Поэтому как внешние, так и внутренние факторы определяют теоретические основы и общие закономерности поведения строительных материалов в условиях пожара [7].

Для оценки механических свойств бетона при пожаре введено понятие стойкости [3, 8]. Под стойкостью в данном контексте понимается совокупность прочностных свойств бетона, способствующих обеспечению нормируемой огнестойкости железобетонных конструкций [8]. В ходе оценки огнестойкости железобетонных конструкций для определения прочности бетона при заданной температуре следует руководствоваться следующей зависимостью:

$$f_{cd}(\theta) = f_{ck} \cdot k_c(\theta), \quad (1)$$

где f_{ck} – нормативное сопротивление бетона сжатию; $k_c(\theta)$ – коэффициент условий работы бетона при пожаре.

Коэффициент условий работы бетона при пожаре $k_c(\theta)$ учитывает изменение сопротивления бетона на осевое сжатие с увеличением температуры. Он характеризует стойкость бетона к нагреву и показывает долю оставшейся прочности бетона на сжатие при заданной температуре от начальной [9, 10]:

$$K_c(\theta) = \frac{f_c(\theta)}{f_c(20)}, \quad (2)$$

где $f_c(\theta)$, $f_c(20)$ – сопротивление бетона сжатию (прочность бетона на сжатие) при температуре нагрева θ и в нормальных (начальных) условиях (при 20 °С).

Следует отметить, что расчетные методы оценки пределов огнестойкости железобетонных конструкций базируются на использовании значений $k_c(\theta)$ для бетонов, уплотненных вибрированием.

В рамках диссертационной работы запланированы лабораторные экспериментальные исследования ячеистых бетонов при высокотемпературном нагреве.

Целью является получение зависимостей кажущейся плотности, усадки и прочности на одноосное сжатие ячеистого бетона (коэффициента условий работы при пожаре) от температуры 20... 1000 °С.

Проанализировав существующие методики по оценке механических характеристик бетона при нагреве в зависимости от последовательности проведения элементов испытаний, можно выделить три основные:

нагрев образцов до заданных температур; выдержка при этой температуре для их равномерного прогрева; охлаждение образцов до нормальной температуры; приложение к ним нагрузки до момента разрушения [3, 8, 11, 12, 13];

нагрев и выдержка образцов при заданной температуре; приложение нагрузки к образцам до момента разрушения [3, 8, 11, 12, 13];

нагружение образцов до создания требуемого уровня напряжений; нагрев их с заданной скоростью до момента разрушения [3, 8, 11, 12, 13];

Ввиду отсутствия дорогостоящего оборудования, особенностей изучаемого материала, а также с целью более подробного изучения его физико-механических характеристик после нагрева и его охлаждения (ввиду проводимых исследований материалов конструкций после пожара) испытания образцов будут проводиться с отдельным нагревом до заданной температуры, охлаждением и последующим испытанием на автоматической сжимающе-разрывной испытательной машине [14].

Проведение испытаний запланировано в следующем порядке:

1. Получение изделий из керамзитобетона, силикатного бетона, пенобетона и шлакобетона с заданными физико-механическими характеристиками и геометрическими параметрами.

2. Отбор опытных образцов изделия путем выпиливания.

3. Хранение образцов до набора марочной прочности бетона.

4. Нагрев, выдержка и охлаждение до начальной температуры по заданному режиму опытных образцов.

5. Определение кажущейся плотности и прочности бетона на одноосное сжатие на образцах, не подвергавшихся нагреву (в начальных условиях).

6. Взвешивание образцов после нагрева и оценка их плотности.

7. Определение усадки, прочности на одноосное сжатие (коэффициента условий работы бетона при пожаре) опытных образцов после нагрева (в остывшем состоянии).

8. Обработка экспериментальных данных.

Для определения коэффициента $k_c(\theta)$ в качестве опытных образцов используются фигуры, имеющие место при испытаниях в нормальных условиях. Форма образцов оказывает существенное влияние при замере деформаций, однако относительная прочность цилиндров, призм и кубов, нагруженных после нагрева до температуры 480 °С, оказывается примерно одинаковой [16]. Так, по результатам анализа и согласно [18] в качестве образцов предполагается использование цилиндров.

Нагрев образцов будет происходить до различных температур, первые 4 образца будут нагреты до температуры 200 °С и в дальнейшем охлаждены, другие 4 образца будут нагреты до температуры 400 °С и в дальнейшем охлаждены и так далее с шагом 200 °С до 1000 °С соответственно.

При испытаниях будет происходить повышение температуры в электрической печи со скоростью 120–150 °С/ч, что позволит исключить всевозможные «структурные» факторы: тепловые градиенты, растрескивание. После достижения необходимой температуры в печи образцы будут выдерживаться для равномерного прогрева бетона.

Охлаждение образцов будет проводиться в закрытой печи по инерционному режиму, но не менее 12 часов до температуры (30 ± 10) °С. Измерение массы и размеров образцов на всех этапах испытаний позволит выявить зави-

симости изменения кажущейся плотности и усадки ячеистого бетона при нагреве до высоких температур и последующего охлаждения.

Также планируется установить зависимость изменения коэффициента условия работы бетона после пожара при условии охлаждения испытуемых образцов с помощью огнетушащих веществ (вода). Это позволит максимально смоделировать ситуацию анализа конструкции после пожара.

Исследование особенностей изменения физико-механических свойств ячеистых бетонов, а также их комбинаций с отделочными и теплоизоляционными материалами при пожаре необходимо для объективной оценки возможности дальнейшей эксплуатации строительных конструкций.

Данные исследования помогут установить зависимость показателей кажущейся плотности, усадки и прочности на одноосное сжатие ячеистого бетона (коэффициента условий работы при пожаре) при температуре от 20 до 1000 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудряшов, В.А. Огнестойкость и огнесохранность сжатых конструкций с применением автоклавных ячеистобетонных блоков. Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения / В.А. Кудряшов, Нгуен Тхань Киен, Чан Чунг Хиеу, М.М. Мордич // 10-я Международная науч.-практ. конф., Минск – Могилев, 29–31 мая 2018 г. – 148 с.

2. ТКП 45-2.02-110-2008 (02250). Строительные конструкции. Порядок расчета пределов огнестойкости. – Взамен П1-02 к СНБ 2.02.01-98. – Введ. 12.06.2008. – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2008. – 126 с.

3. ТКП EN 1996-1-2-2009 (02250). Еврокод 6. Проектирование каменных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости – Введ. 01.01.2010. – Минск : Минстройархитектуры, 2010. – 100 с.

4. СТБ EN 12602-2020 Изделия армированные из автоклавного ячеистого бетона. – Введ. 06.02.2020. – Минск : Госстандарт, 2020. – 170 с.

5. Галкин, С.Л. Применение ячеистобетонных изделий. Теория и практика / С.Л. Галкин [и др.]. – Минск : Стринко, 2006. – 448 с.

6. Нгуен Тхань Киен Огнестойкость автоклавного ячеистого бетона на основе экспериментальных диаграмм деформирования после высокотемпературного нагрева / В.А. Нгуен Тхань Киен, Кудряшов // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 2 (24).

7. Свойства и поведение строительных материалов в условиях пожара : учеб. пособие / Б.Ж. Битуев [и др.]. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2016. – 148 с.

8. Полевода, И.И. Огнестойкость изгибаемых железобетонных конструкций из высокопрочного бетона : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / И. И. Полевода. – Минск, 2004. – 202 л.

9. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона : ГОСТ 24452-80. – Введ. 01.01.1982. – М. : Стандартинформ, 2005. – 14 с.

10. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования: курс лекций для студентов строительных специальностей / Н.П. Блещик [и др.] ; под ред. Т.М. Пецольда, В. В. Тура. – Брест : БГТУ, 2003. – 380 с.

11. Husem, M. The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete / M. Husem // Fire Safety Journal. – 2006. – Vol. 41 (2). – P. 155–163.

12. Нисаев, И.П. Бетон при высокотемпературном воздействии / И.П. Нисаев, А.А. Локтев // Инновационные подходы к решению технико-экономических проблем : сб. трудов Междунар. конф., Москва, 26 мая 2017 г. / Нац. исслед. ун-т «Моск. ин-т электрон. техн.» ; редкол.: В. Л. Горбунов [и др.]. – 2017. – С. 92–97.

13. Прочностные характеристики фибробетона для тоннельных сооружений в условиях высоких температур / В.И. Голованов [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2017. – № 2. – С. 63–67.

14. Нехань, Д.С. Огнестойкость центрифугированных железобетонных колонн : дис. ... канд. тех. наук : 05.-26.03 / Д.С. Нехань. – Минск, 2022. – 249 с.

REFERENCES

1. Ognestojkost' i ognesohrannost' szhatyh konstrukcij s primeneniem avtoklavnyh yacheistobetonnyh blokov. Opyt proizvodstva i primeneniya yacheistogo betona avtoklavnogo tverdeniya / Kudryashov V.A., Nguen Than' Kien, CHan CHung Hieu, Mordich M.M. // 10-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya. Minsk – Mogilev, 29–31 maya 2018 g. – 148 s.

2. ТКР 45-2.02-110-2008 (02250). Stroitel'nye konstrukcii. Poryadok rascheta predelov ognestojkosti. – Vzamen P1-02 k SNB 2.02.01-98. – Vved. 12.06.2008. – Minsk : RUP «Strojtekhnorm», 2008. – 126 s.

3. ТКР EN 1996-1-2-2009 (02250). Evrokod 6. Proektirovanie kamennyh konstrukcij. CHast' 1-2. Obshchie pravila opredeleniya ognestojkosti – Vved. 01.01.2010. – Minsk : Ministrojarhitektury, 2010. – 100 s.

4. STB EN 12602-2020 Izdeliya armirovannye iz avtoklavnogo yacheistogo betona. – Vved. 06.02.2020. – Minsk : Gosstandart, 2020. – 170 s.

5. Galkin, S.L. Primenenie yacheistobetonnyh izdelij. Teoriya i praktika / S.L. Galkin [i dr.]. – Minsk : Strinko, 2006. – 448 s.

6. Ognestojkost' avtoklavnogo yacheistogo betona na osnove eksperimental'nyh diagramm deformirovaniya posle vysokotemperaturnogo nagreva / Nguen Than' Kien, Kudryashov V.A. // Vestnik Komandno-inzhenerного института MCHS Respubliki Belarus'. – 2016. – № 2 (24).

7. Svoystva i povedenie stroitel'nyh materialov v usloviyah pozhara : ucheb. posobie / B. ZH. Bituev, V. M. Rojzman, B. B. Serkov i dr. – M. : Akademiya GPS MCHS Rossii, 2016. – 148 s.

8. Polevoda, I. I. Ognestojkost' izgibaemyh zhelezobetonnyh konstrukcij iz vysokoprochnogo betona : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.01 / I. I. Polevoda. – Minsk, 2004. – 202 l.

9. Betony. Metody opredeleniya prizmennoj prochnosti, modulya uprugosti i koefficienta Puassona : GOST 24452-80. – Vved. 01.01.1982. – M. : Standartinform, 2005. – 14 s.

10. ZHelezobetonnye konstrukcii. Osnovy teorii, rascheta i konstruiro-vaniya: kurs lekcij dlya studentov stroitel'nyh special'nostej / N. P. Bleshchik [i dr.] ; pod red. T. M. Pecol'da i V. V. Tura. – Brest : BGTU, 2003. – 380 s.

11. Husem, M. The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete / M. Husem // Fire Safety Journal. – 2006. – Vol. 41 (2). – P. 155–163.

12. Nisaev, I. P. Beton pri vysokotemperaturnom vozdejstvii / I. P. Nisaev, A. A. Loktev // Innovacionnye podhody k resheniyu tekhniko-ekonomicheskikh problem : sb. trudov Mezhdunar. konf., M., 26 maya 2017 g. / Nac. issled. un-t «Mosk. in-t elektron. tekhn.» ; redkol.: V. L. Gorbunov [i dr.]. – 2017. – S. 92–97.

13. Prochnostnye harakteristiki fibrobetona dlya tunnel'nyh sooruzhenij v usloviyah vysokih temperatur / V. I. Golovanov [i dr.] // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya. – 2017. – № 2. – S. 63–67.

14. Nekhan', D.S. Ognestojkost' centrifugirovannyh zhelezobetonnyh kolonn: dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.-26.03 / D.S. Nekhan'. – Minsk, 2022. – 249 s.

