

УДК 614.841.11: 666.973.6

**ИЗМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТВЕРДОСТИ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ОХЛАЖДЕНИИ ВОДОЙ**

*канд. техн. наук, доц. О.Г. ГОРОВЫХ, А.В. ВОЛОСАЧ  
(Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск)*

*В статье представлены результаты измерения поверхностной твердости образцов ячеистого газобетона (марка D500) после термического воздействия на них в интервале температур от 100 до 1000°C, охлаждения водой и последующей выдержки (сушки) при комнатной температуре в течении 10 мин, одного часа и 24 часов. Измерения поверхностной твердости образцов осуществлялись специально разработанным устройством с определенным углом заточки индентора и фиксированной ударной силой. Полученные в ходе исследований результаты изменения поверхностной твердости ячеистого газобетона после охлаждения водой и сушки в течении 24 часов имеют линейный характер, что позволяет рекомендовать к применению результаты данных измерений в качестве одного из методов установления очага пожара в практике пожарно-технических (термических) исследований.*

**Ключевые слова:** ячеистый газобетон, термическое воздействие, охлаждение, пожар, пожарно-техническая экспертиза, очаг пожара, очаговые признаки.

**Введение.** Использование ячеистого бетона в строительстве принимает во всем мире все более масштабный характер. Это один из самых востребованных строительных материалов, т.к. обладает множеством достоинств (обеспечивает снижение монтажных, эксплуатационных и экологических затрат, гарантирует долгий срок службы и качество жилья), не имеет аналогов и занимает лидирующие позиции в сфере гражданского и промышленного строительства. В настоящее время в Республике Беларусь годовой объем производства газобетонных изделий составляет 3–4 млн м<sup>3</sup> [1].

Прочностные характеристики изделий из газобетона автоклавного твердения позволяют возводить здания высотой до пяти этажей [2]. Из газобетона изготавливаются армированные изделия: плиты перекрытия, покрытия, лестничные ступени, различные перемычки, в том числе и арочные [3–6]. Конструктивно-теплоизоляционные свойства делают его универсальным материалом для использования во всех климатических зонах. Блоки из ячеистых бетонов предназначены для кладки наружных и внутренних стен, стен подвалов и перегородок зданий с относительной влажностью воздуха помещений не более 75% и при неагрессивной среде.

Ячеистый бетон не содержит токсичного наполнения и, соответственно, не выделяет токсичных для человека и окружающей среды веществ, в том числе и во время пожара.

Несмотря на то, что газобетон относится к негорючим материалам с пределом огнестойкости REI = 180...240, пожары в строениях, возведенных из газобетона, регулярно возникают, при этом горит горючая нагрузка, имеющаяся в этих помещениях. Статистические данные свидетельствуют о том, что в последние годы в Республике Беларусь сохраняется значительный уровень числа пожаров, происходящих с материальными потерями и человеческими жертвами. Так, по данным Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, в нашей стране ежегодно происходит свыше 6 тысяч пожаров, к примеру, в 2019 году произошло 6132 пожара [7]. Рассмотрение и анализ фактов, связанных с пожарами, является одним из важнейших направлений деятельности органов государственного пожарного надзора МЧС РБ. Основным источником информации о пожаре является само место его возникновения [8].

Для строений, имеющих конструкции из древесины, металла (стали), железобетона, кирпича, специалистами в области расследования пожаров предложено достаточное количество различных методик, позволяющих по степени разрушения конструкций и их физико-механическим свойствам, например, таким как скорость прохождения ультразвука через исследуемые конструкции [9], установить область наибольших разрушений в результате воздействия высокой температуры и определить место нахождения очага пожара. Для построек из газобетона таких полноценных экспертных методик на сегодняшний день не предложено. Не в последнюю очередь это связано с неоднородностью самой структуры газобетона, недостаточно равномерно распределенной мелкодисперсной ячеистой структурой, нечетко выраженными изменениями физико-механических свойств, по которым можно устанавливать температурный режим, ранее воздействовавший на объекты из газобетона.

**Основная часть.** Для большинства пожаров при производстве пожарно-технической экспертизы и формировании вывода о месте нахождения очага инспектору вполне достаточно результатов визуального осмотра строительных конструкций и предметов, составляющих окружающую обстановку места происшествия. Однако в случае наличия таких факторов, как: а) архитектурные особенности отдельных

помещений или здания в целом; б) распространение пожара на большие площади; в) практически полное выгорание пожарной нагрузки; г) изменение либо нивелирование визуальных признаков очага, одним из основных источников информации становятся строительные конструкции и ограждения как наиболее сохраняемые после пожара. Для установления температурного поля пожара, имеющего связь с термическими поражениями конструкций, необходимо использовать инструментальные методы исследования подвергшихся тепловому воздействию конструкций [10].

При пожарах возникают и дополнительные воздействия на строительные конструкции, которые вместе с температурным воздействием оказывают на них значительное влияние. Один из таких факторов – резкое колебание температуры, вызванное условиями охлаждения при выполнении аварийно-спасательных работ на пожаре.

Так как по разным объективным и субъективным причинам осмотр места пожара проводится в разное время после ликвидации, пожара важно знать, какие признаки очага пожара даже при резком температурном перепаде и воздействии струй воды будут сохраняться на всем том возможном временном интервале, когда обычно проводится осмотр места пожара.

**Постановка проблемы.** Известно, что в результате воздействия высоких температур на пожаре, происходит изменение физико-механических свойств строительных конструкций [11]. При производстве пожарно-технической экспертизы (или при осмотре места пожара) зачастую необходимо определить температуру на участках строительных конструкций, поврежденных в результате теплового воздействия пожара. Закономерности изменения физико-механических свойств ячеистого бетона при длительном или кратковременном высокотемпературном воздействии, которые могут быть использованы при определении очага пожара (изменение цвета, количества и вида трещин, отслаивание и т.д.), описаны в работах [4; 5; 12].

Однако влияние условий охлаждения на прочностные характеристики (физико-механические свойства) газобетонов, ранее подвергшихся термическому воздействию, в данных работах и работах других авторов не отражены. При тушении пожара конструкции горящего строения подвергаются резкому охлаждению, причем при достаточно низкой температуре внешней среды высыхание конструкций, выполненных из ячеистого бетона, может продолжаться достаточно длительное время, достигающее до суток и более. Для выявления возможности определения очага пожара в зданиях, выполненных из ячеистого бетона, когда на строительные конструкции воздействовала сначала высокая температура, а затем интенсивное охлаждение, и посвящено данное исследование.

Газобетон является композиционным материалом, поэтому наблюдаемое изменение его физико-механических свойств, его поведение при нагреве на пожаре зависит как от поведения его отдельных компонентов (гидроксида кальция, оксида кремния, оксидов алюминия и железа и их гидратных и силикатных форм), так и от силы и вида их взаимодействия между собой.

**Методика экспериментальных исследований.** Для исследований было подготовлено 20 образцов призм из ячеистого газобетона марки по средней плотности D500 согласно [6] с усредненными размерами 100×100×120 мм. Размеры образцов были обусловлены ограничениями оборудования – внутреннего пространства муфельной печи SNOL-8,2/1100 с цифровым терморегулятором.

План проведения подготовки образцов предусматривал 10 серий термического воздействия и включал нагревание образцов от 100 до 1000 °С (с шагом в 100 °С) в течение 20 минут. Для каждой температуры было взято по два образца. Образцы помещали в муфельную печь, заранее разогретую до соответствующей температуры. После загрузки образцов в печь дополнительно повышали температуру до требуемого значения, так как при открывании печи для загрузки образцов она снижалась. Скорость подогрева от момента помещения образцов в печь до достижения требуемой температуры составляла 1 градус за 4–5 секунд. После достижения в печи соответствующей температуры выдерживали в ней образцы в течение 20 минут.

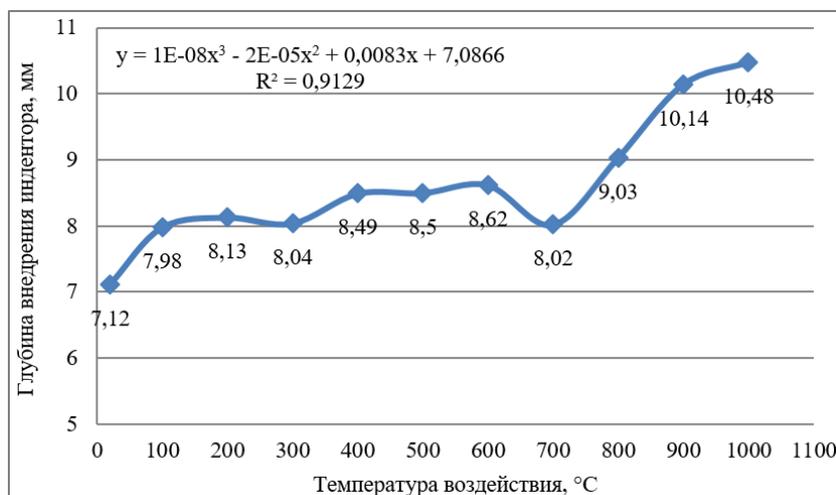
Затем образцы из ячеистого газобетона извлекали из печи. Охлаждение образцов проводили в водной среде, имеющей температуру 10 °С, хотя в отдельных случаях на пожаре возможно и более интенсивное охлаждение конструкций. Охлаждение осуществлялось в течение 10 минут.

Для определения поверхностной твердости ячеистого газобетона, подвергшегося воздействию высоких температур, применялся метод измерения глубины (мм) погружения индентора в образец по аналогии с известным методом определения твердости по Роквеллу. Для сообщения индентору ударно-поступательного движения было использовано специально разработанное для этих целей приспособление с индентором из инструментальной стали твердостью 217 МПа (НВ), имеющим угол раствора конуса 30° и шероховатость поверхности конуса Ra = 12,5 [5].

Поверхность для испытаний выбирали так, чтобы она была ровной и плоской, не имела грубых рифов, выбоин, царапин. Поверхность перед испытанием очищали от пыли мягкой кисточкой. Толщина контролируемого образца была как минимум больше 12-кратной глубины внедрения индентора.

Измерения проводились по методике, изложенной в [5]. Было проведено 600 измерений для образцов, охлаждаемых в воде (для каждого образца измерения проводились с интервалами 10 минут, 1 час и 1 сутки после извлечения из водной среды), а также 200 измерений для образцов, охлаждаемых без дополнительного обдува в температурных условиях помещения лаборатории.

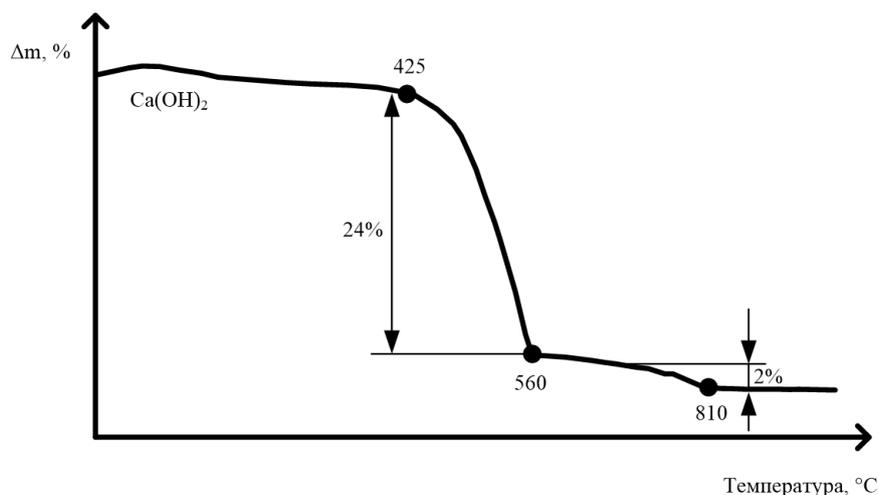
**Результаты экспериментальных исследований.** На рисунках 1 и 3–6 показаны графики, отражающие глубину погружения индентора в образцы в зависимости от воздействующей на них температуры и условий охлаждения. Точка на графике отображает среднее значение, полученное от проведения 10 измерений.



**Рисунок 1.** – Глубина внедрения индентора в образцы ячеистого газобетона через 10 минут после извлечения из водной среды

Из представленного на рисунке 1 графика видно, что при повышении температуры происходит постепенное увеличение глубины погружения индентора в исследуемые образцы (снижение поверхностных прочностных характеристик). Это можно объяснить тем, что при нагреве выше 100 °C начинает происходить постепенная дегидратация имеющихся соединений, и чем выше температура, тем больше степень дегидратации и наблюдаемые при этом разрушения. Исключение составляет температура воздействия 700 °C. При этой температуре фиксируется anomalно малое снижение поверхностной твердости исследуемого материала по сравнению с образцами, обработанными при рядом находящихся температурах, что выражается в снижении глубины внедрения индентора в образцы.

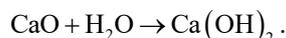
Объяснить упрочнение, возникающее при температуре 700 °C можно исходя из кривой убыли массы (рисунок 2) для гидроксида кальция (одного из компонентов газобетонов) [13]. Из кривой убыли массы видно, что начало разложения гидроксида кальция начинается при температуре 425 °C и разлагается с потерей 24% массы до температуры 560 °C, что при теоретическом расчете по уравнению разложения составляет 98,6%.



**Рисунок 2** – Кривая убыли массы гидроксида кальция при воздействии температуры

Так как газобетон включает гидроксид кальция как компонент, то, вероятно, его окончательное разложение под влиянием имеющихся рядом соединений происходит при более высокой температуре,

достигающей 700 °С. Контакт с водой обеспечивает поверхностную гидратацию образовавшегося оксида кальция, а высыхание образцов в последующие 10 минут, в свою очередь, вызывает образование иной структуры, имеющей повышенную твердость по сравнению с образцами, имеющими меньшую воздействующую температуру и не полностью до этого подвергшихся дегидратации.



Исключая область с температурой воздействия около 700 °С, измерение глубины внедрения индентора непосредственно после окончания тушения пожара (10 мин контакта с водой) позволяет четко выделить области с температурой воздействия на них более 800 °С. Кроме того, даже при наличии слоя сажи в области дымового воздействия, можно четко установить области, подвергшиеся низкотемпературному воздействию (до 100 °С).

Из графика на рисунке 3 видно, что при проведении исследований конструкций через час после окончания тушения, все также легко определяемы области с наибольшим и наименьшим температурным воздействием. При этом исчезает область с аномально высокой твердостью, имеющая место на рисунке 1 ( $t_{\text{воз}} = 700^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{высых}} = 10$  минут). Наиболее равномерное (линейное) изменение поверхностной твердости наблюдается в интервале температур 300–800 °С.

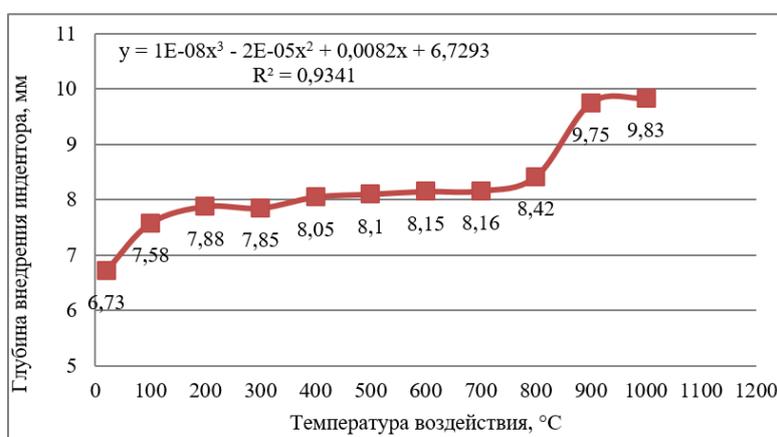


Рисунок 3. – Глубина внедрения индентора в образцы через 1 час после извлечения из водной среды

При проведении исследований через сутки (24 часа высыхания) можно с высокой степенью вероятности установить области, на которые воздействовали различные температуры. Однако наблюдается аномальное снижение твердости у обработанных при 200 °С образцов, которое соизмеримо с температурой воздействия примерно 350 °С (рисунок 4). Возможно, потеря гидратной воды у гидроалюминатов, происходящая при температуре 200 °С, не привела к их регенерации за 1 час, что определило заниженную твердость у этих образцов (хотя объяснить данное снижение твердости достаточно трудно).

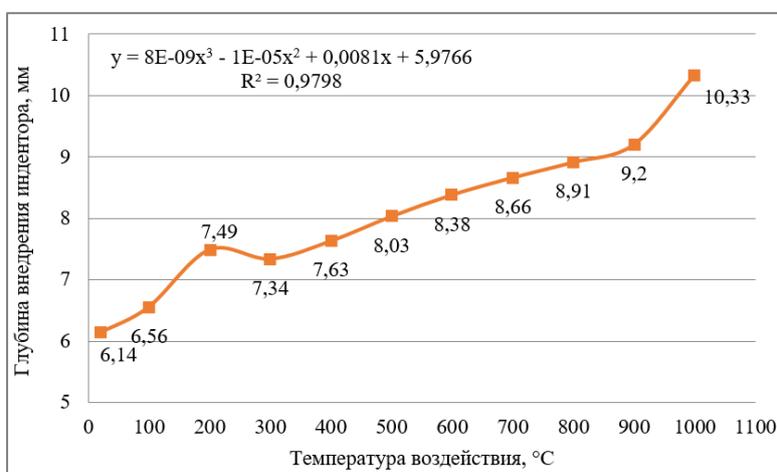


Рисунок 4. – Глубина внедрения индентора в образцы через 1 сутки после извлечения из водной среды

Из представленного на рисунке 5 графика видно, что мягкие условия охлаждения (воздушное охлаждение) не дают такой четко выраженной закономерности изменения поверхностной твердости, как при быстром охлаждении водой.

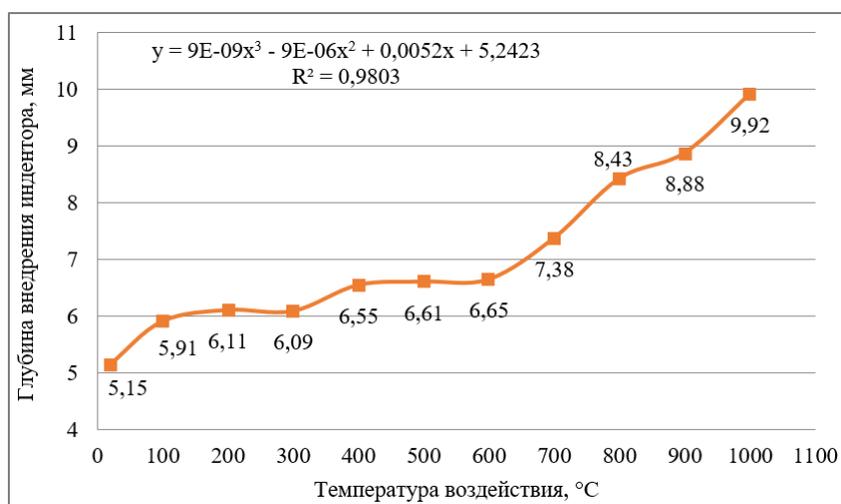


Рисунок 5. – Глубина внедрения индентора в образцы, охлаждаемые в температурных условиях помещения лаборатории (без воздействия воды)

Из графиков на рисунке 6 видно, что наибольшая потеря прочности наблюдается при охлаждении водой и исследовании образцов через 10 минут после охлаждения во всем исследованном интервале температур, anomalно низкое снижение твердости наблюдается при температуре 700 °C.

Затем по мере высыхания образцов происходит нарастание поверхностной твердости, что говорит о том, что при этом происходит восстановление ранее разрушенных связей между компонентами газобетона и их гидратация.

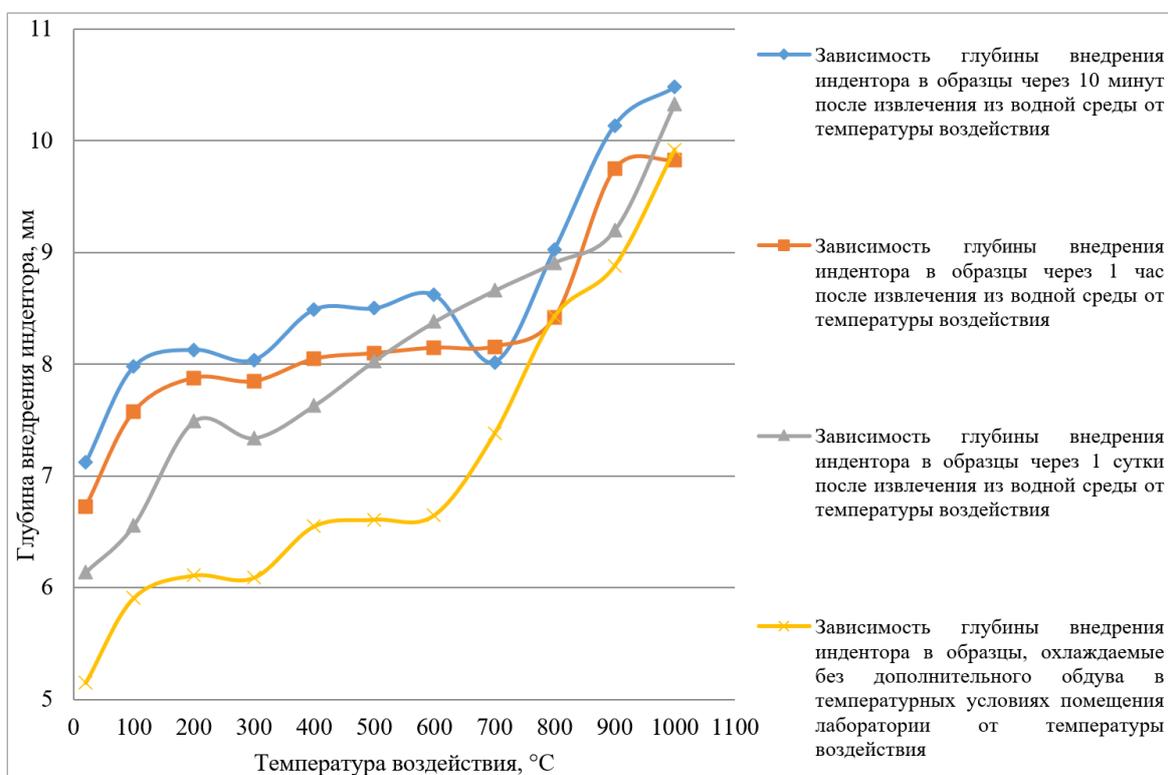


Рисунок 6. – Сводный график изменения поверхностной твердости через различные промежутки времени после охлаждения образцов

Снижение твердости по мере высыхания образцов, обработанных при температуре 700 °С говорит о том, что образовавшиеся при гидратации соединения термодинамически неустойчивы и разрушаются с образованием более устойчивых, но менее твердых соединений.

Можно видеть, что поверхностная твердость у образцов, высушенных в течение суток, имеет линейный характер за исключением образцов, обработанных при 200 °С.

Воздушное охлаждение незакономерно влияет на изменение поверхностной твердости, что связано, возможно с различной теплопроводностью, полученных на поверхности образцов соединений и разными процессами при гидратации образовавшихся оксидов, на которые влияет в том числе и влажность в помещении и иные неучтенные факторы.

На основании полученных значений поверхностной твердости можно утверждать, что если у образцов непосредственно после тушения, через 1 час и через сутки твердость увеличивается, то можно легко разграничить температуры воздействия от 100 до 500 °С.

Для установления температурного поля на месте пожара для более высоких температур (начиная с 500 °С) достаточно опереться только на измерения, осуществленные через 1 сутки высыхания после тушения пожара.

Для получения достоверных данных при проведении изменений непосредственно на конструкциях на месте пожара предлагается предварительно выделенные места, дополнительно обработать водой из пульверизатора, отметить их на карте места пожара, и затем произвести измерение через 1 сутки.

**Заключение.** Одним из востребованных на сегодняшний день направлений при производстве пожарно-технической экспертизы является исследование воздействия высоких температур на строительные конструкции, в частности, изготовленные на основе ячеистых бетонов.

Процесс разрушения газобетона хорошо заметен визуально при температурах более 900 °С, когда газобетон начинает разрушаться, в том числе и из-за полной дегидратации составляющих компонентов.

Результаты проведенных исследований показывают, что поверхностная прочность газобетона достаточно плавно изменяется при воздействии высоких температур.

Можно делать вывод о том, что данный метод исследования образцов на месте пожара может быть успешно применен для обнаружения очага пожара, причем замеры поверхностной твердости наиболее целесообразно проводить через сутки после проведения работ по тушению пожара.

Данную методику можно использовать для выявления области наибольшего воздействия температуры при одновременном подтверждении результатов и другими методами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сахаров, Г.П. Развитие производства и повышение конструктивных свойств автоклавного ячеистого бетона и изделий на его основе / Г.П. Сахаров // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 7 Междунар. науч.-практ. конф., Брест, Малорита, 22–24 мая 2012 г. / Редкол.: Н.П. Сажнев (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Стринко, 2012. – С. 32–36.
2. Мартыненко, В.А. Теоретические и структурные свойства ячеистого бетона / В.А. Мартыненко // Theoretical Foundations of Civil Engineering : Збірник наук. праць ПДАБА і Варшавського техн. універ. – Dnepropetrovsk-Warsaw, 2003. – С. 177–186.
3. Волосач, А.В. Изменение величины сорбции ячеистых бетонов после термического воздействия / А.В. Волосач, О.Г. Горовых // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2018. – № 1 (43). – С. 57–64.
4. Горовых, О.Г. Определение очага пожара по визуально наблюдаемым изменениям ячеистого бетона после термического воздействия / О.Г. Горовых, А.В. Волосач // Судебная экспертиза Беларуси. – 2017. – № 1. – С. 59–62.
5. Волосач, А.В. Результаты экспериментальных исследований поверхностной твердости ячеистых бетонов, подвергшихся температурному воздействию, инденторами с углами раствора конуса 20–55 / А.В. Волосач, О.Г. Горовых // Вестн. ун-та гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 1. – С. 13–22.
6. Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия : ГОСТ 31359-2007. – Введ. 1.01.2009. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2009. – 9 с.
7. Информация о чрезвычайных ситуациях [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://mchs.gov.by/operativnaya-informatsiya/sutochnye-svodki-mchs/v-rb/292675/>. – Дата доступа: 22.04.2020.
8. Чешко, И.Д. Анализ экспертных версий возникновения пожара / Чешко И.Д., Плотников В.Г. – СПб. : филиал ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2010. – 708 с.
9. Применение инструментальных методов и технических средств в экспертизе пожаров : сб. метод. рек. / под ред. И.Д. Чешко и А.Н. Соколовой. – СПб. : СПбФ ВНИИПО, 2008. – 279 с.
10. Пахомов, М.Е. Техничко-криминалистическое обеспечение раскрытия и расследования преступлений, связанных с пожарами / М.Е. Пахомов // Вестн. Волгоград. акад. МВД России. – 2015. – № 1. – С. 112–115.

11. Дашков, Л.В. Экспертные пожарно-технические исследования строительных материалов зданий при установлении очага пожара / Л.В. Дашков, Г.В. Плотникова, В.Ф. Гольчевский // Вестн. Восточ.-Сиб. ин-та МВД России, № 4 (71). – 2014. – С. 61–67.
12. Горовых, О.Г. Исследование поверхностной твердости ячеистых бетонов, подвергшихся температурному воздействию / О.Г. Горовых, А.В. Волосач // Судебная экспертиза Беларуси. – 2019. – №. 1. – С. 54–58.
13. Шаяхметов, А.У. Особенности термического разложения оксида, пероксида, гидроксида и карбоната кальция / А.У. Шаяхметов, А.Г. Мустафин, И.А. Массалимов // Вестн. Башкир. ун-та. – 2011. – Т. 16. – № 1. – С. 29–32.

Поступила 14.05.2020

## CHANGE IN THE SUPERFICIAL HARDNESS OF CELLULAR CONCRETES UNDER THERMAL ACTION AND FOLLOWING COOLING WITH WATER

**O. GOROVYKH, A. VOLOSACH**

*The article presents the results of measuring the surface hardness of aerated concrete samples (grade D500) after thermal exposure to them in the temperature range from 100 to 1000 °C, cooling with water and subsequent exposure (drying) at room temperature for 10 minutes, one hour and 24 hours. Measurements of the surface hardness of the samples were carried out by a specially developed device with a definite indenter sharpening angle and a fixed impact force. The results of studies of the changes in the surface hardness of aerated concrete after cooling with water and drying for 24 hours are linear in nature, which allows us to recommend the use of the measurement data as one of the methods for establishing the fire source in the practice of fire-technical (thermal) research.*

**Keywords:** *cellular aerated concrete, thermal effects, cooling, fire, fire-technical expertise, fire center, focal signs.*