

УДК 614.841

urpch.urigps@bk.ru

**ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ СВОЙСТВ  
БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА МЕСТЕ ПОЖАРА**

**APPLICATION OF STATISTICAL CRITERIA TO EVALUATE  
THE RESULTS OF MEASURING THE PROPERTIES  
OF CONCRETE STRUCTURES AT THE FIRE SITE**

*Дементьев Ф. А., кандидат технических наук, доцент,  
Шарапов В. С.,  
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России имени Героя Российской  
Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева, Санкт-Петербург  
Ожегов Э. А., кандидат технических наук, доцент,  
Мухтаров А. А., Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург*

*Dementiev F., Sharapov V.,  
Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia named after the  
Hero of the Russian Federation General of the Army E. N. Zinichev, Saint Petersburg  
Ozhegov E., Mukhtarov A.,  
Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg*

В статье предлагается проводить оценку результатов, получаемых с помощью методик пожарно-технической экспертизы, с помощью статистических критериев. Такой подход позволяет подтвердить достоверность получаемой информации и возможность применения различных методов для выявления на пожаре зон разного термического воздействия. При проведении измерений скорости прохождения ультразвуковой волны с помощью тестера для контроля бетона, а также измерений твердости бетонных блоков с помощью портативного твердомера выявлено, что разрушение материала не позволяет проводить исследование акустическим методом при высоких температурах, но именно в этой области результаты исследования твердости могут быть использованы для дальнейшего исследования образцов. Оценка качества результатов измерений проводилась по данным, полученным в ходе исследования выбранных блоков, подвергнутых воздействию высоких температур в лабораторных условиях. На примере расчета критериев Кохрена и Стьюдента по результатам исследования бетонных блоков методом ультразвукового анализа и измерения твердости доказана эффективность данного подхода. Результаты позволяют рекомендовать последовательное использование данных методов для расширения температурного диапазона информативности изучения бетонных блоков для точных заключений пожарно-технических экспертов и специалистов.

*Ключевые слова:* оценка качества результатов исследования, пожарно-техническая экспертиза, статистические критерии, полевые и лабораторные методы, скорости прохождения ультразвуковой волны.

The article proposes to evaluate the results obtained using fire-technical expertise techniques using statistical criteria. This approach allows us to confirm the reliability of the information received and the possibility of using various methods to identify areas of different thermal effects in a fire. When measuring the speed of passage of an ultrasonic

wave using a tester for concrete control, as well as measurements of the hardness of concrete blocks using a portable hardness tester, it was revealed that the destruction of the material does not allow the study to be carried out by acoustic method at high temperatures, but it is in this area that the results of the hardness study can be used for further study of samples. The quality of the measurement results was assessed based on the data obtained during the study of selected blocks exposed to high temperatures in the laboratory. The effectiveness of this approach is proved by the example of the calculation of the Kohren and Student criteria based on the results of the study of concrete blocks by ultrasound analysis and hardness measurement. The results allow us to recommend the consistent use of these methods to expand the temperature range of the informative study of concrete blocks for accurate conclusions of fire-technical experts and specialists.

*Keywords:* assessment of the quality of research results, fire-technical expertise, statistical criteria field and laboratory methods, ultrasonic wave measurement speed.

Установление очага пожаров базируется на двух основных блоках информации. В первую очередь рассматривается субъективная информация, которая содержится в описательной части протокола осмотра места пожара и объяснений, получаемых дознавателями в рамках предварительной проверки по факту пожара. Данная информация не может считаться объективной, так как основана на суждениях субъектов, оценивающих информацию о возникновении и развитии пожара, а также картину, формируемую на месте пожара после его ликвидации. Принимая во внимание то, что закон Российской Федерации «О государственной судебно-экспертной деятельности» требует формирования экспертных выводов на принципах объективности и строгой научности, заключение эксперта должно давать возможность проверить обоснованность и достоверность сделанных выводов на базе общепринятых научных и практических данных, можно сказать, что выводы об очаге пожара часто не соответствуют данным требованиям. Основная причина этого состоит в сложности оценки достоверности используемых экспертами методик.

Второй блок информации, рассматриваемый пожарно-техническим экспертом или специалистом, – это результаты исследования материальных объектов, в том числе данные инструментального исследования материалов и конструкций непосредственно на месте пожара [1–5].

В криминалистической методике экспертные исследования предполагают проведение предварительного исследования и последующего детального лабораторного анализа образцов с помощью методов криминалистической техники. В пожарно-технической экспертизе принято разделять используемые методы на полевые и лабораторные [1]. К первой группе относятся методы, позволяющие с помощью портативного оборудования оценивать свойства материалов и конструкций, поврежденных пожаром, непосредственно на месте. Если в криминалистике предварительное исследование регламентирует применение неразрушающих методов, не требующих пробоотбора и повреждения исходного образца, то полевые методы, применяемые в пожарно-технической экспертизе, часто требуют предварительной зачистки поверхностного слоя или отбора проб. Например, использование при исследовании металлических изделий и конструкций коэрцитиметра поверхность исследуемого объекта предварительно зачищается [2], а при исследовании электросопротивления угля метод предусматривает отбор пробы для использования портативного прибора [3].

Также необходимо отметить, что современные методики пожарно-технической экспертизы базируются на сравнительном анализе, не требующем количественного определения конкретных

свойств материалов, что говорит об отсутствии необходимости оценки результатов измерения и характеристики реализуемых методик с точки зрения правильности, точности и прецизионности, что обязательно предусмотрено для методик количественного определения свойств различных объектов, применяемых в экспертных исследованиях в других областях. Для подтверждения достоверности результатов, получаемых при исследовании материальных объектов на месте пожара, необходимо проведение большого количества измерений для возможности оценки получаемой информации с помощью статистических критериев.

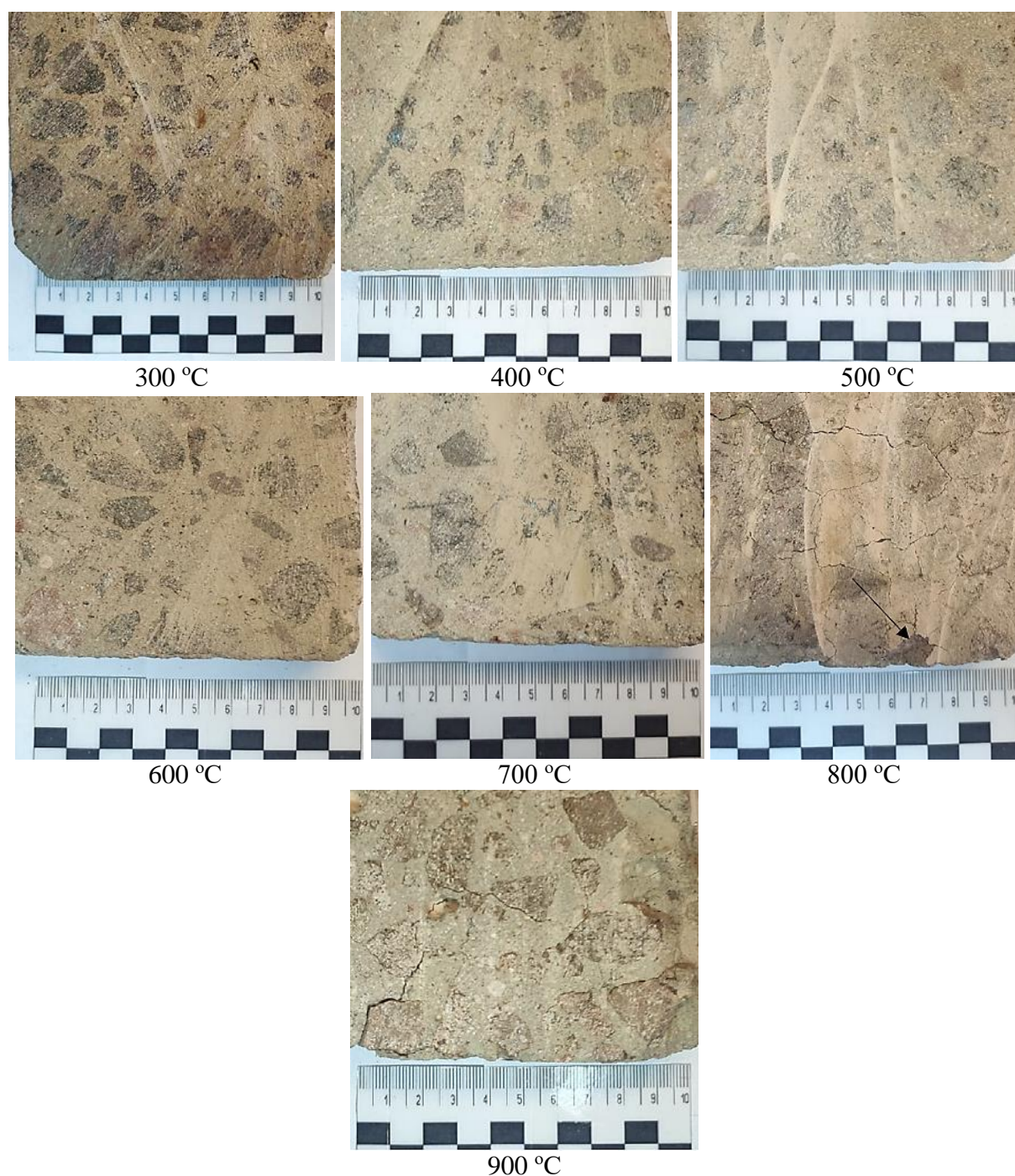
Рассмотрим пример использования методов математической статистики для оценки результатов измерения скорости прохождения ультразвуковой волны и твердости фундаментных блоков ФБС 2-2-4 (класс – В7,5; марка – М100) размерами 200×200×400 мм. Выбор данных объектов исследования был обусловлен тем, что использование ультразвуковых приборов позволяет получить результаты достаточной сходимости только в том случае, если проводится исследование однотипных объектов, изготовленных в заводских условиях. Метод измерения твердости поверхности с помощью портативного твердомера в рамках пожарно-технической экспертизы не использовался ранее.

Измерение скорости прохождения ультразвуковой волны проводили с помощью тестера для контроля бетона УК1401М, твердость измеряли с помощью портативного твердомера ТЭМП-4 по шкале Бринелля (НВ).

Оценку качества результатов измерений проводили по данным, получаемым при исследовании выбранных блоков, подвергнутых воздействию высоких температур в лабораторных условиях. Для этого блок распиливали на образцы размером 20×10×10 см. Время выдержки образцов составляло 30 и 60 минут для обеспечения их термостатирования. Для получения достаточного массива данных были проведены изменения скорости ультразвуковой волны и твердости с разных граней каждого из образцов, в общей совокупности по 40 параллельных измерений.

По мере увеличения температуры нагрева образцов было замечено изменение цвета наполнителя (щебня). Наличие большого количества наполнителя не позволяет в полной мере оценить изменение цвета самого бетонного камня, было замечено, что вначале происходит его осветление, при температурах выше 500 °С можно заметить появление розового оттенка, что часто упоминается в литературных источниках. Заметное невооруженным взглядом растрескивание материала начинается только при нагреве образцов выше 700 °С (рис. 1).





*Рисунок 1. Визуальный вид образцов при термическом воздействии в лабораторных условиях (время выдержки при высоких температурах – 60 минут)*

Образцы при нагреве существенно разрушаются как вследствие процессов дегидратации, так и под воздействием внутренних напряжений, возникающих из-за разных характеристик температурного расширения цементного камня и щебня, играющего роль наполнителя. Данное обстоятельство приводит к тому, что при нагреве выше 800 °C с помощью ультразвукового тестера скорость прохождения поверхностной волны зафиксировать не удастся. На степень разрушения материала влияние оказывает в том числе и время, в течение которого образцы находились в муфельной печи, после 60 минут выдержки зафиксировать скорость прохождения ультразвука не удастся уже при нагреве выше 700 °C (табл. 1).

Таблица 1

Результаты измерения скорости прохождения ультразвуковой волны образцов

| Температура, °С | Средняя скорость прохождения ультразвука, м/с |                        |
|-----------------|---|------------------------|
|                 | время нагрева 30 минут                        | время нагрева 60 минут |
| 20              | 4210  |                        |
| 300             | 3842  | 4365                   |
| 400             | 3346  | 2546                   |
| 500             | 2647  | 1957                   |
| 600             | 1957  | 1320                   |
| 700             | 1407  | –                      |
| 800             | –   | –                      |
| 900             | –   | –                      |

По экспериментальным данным были получены регрессионные зависимости, наглядно демонстрирующие влияние температуры и времени нагрева на результаты применения акустического метода исследования. В диапазоне температур от 300 до 700 °С зависимости имеют линейный характер, достоверность аппроксимации достигает 0,99 (рис. 2).

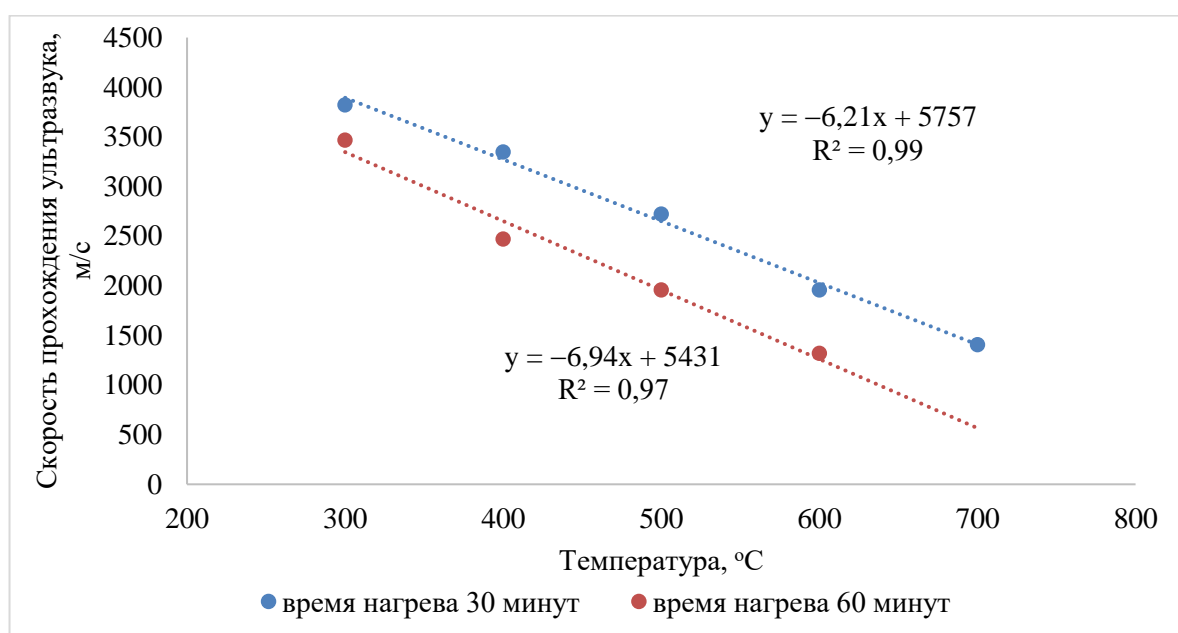


Рисунок 2. Зависимости скорости прохождения ультразвуковой волны от температуры нагрева образцов

Результаты позволили получить эмпирические уравнения, по которым можно оценить температуру нагрева блоков для времени нагрева 30 минут в диапазоне от 300 до 700 °С, а также для времени нагрева образцов 60 минут в диапазоне от 300 до 600 °С.

$$t = -0,16 \cdot C + 924, \quad (1)$$

$$t = -0,14 \cdot C + 777, \quad (2)$$

где  $t$  – температура нагрева бетонного блока, °С;  $C$  – скорость прохождения УЗ-волны, м/с.

Результаты исследования поверхности блоков твердомером показали, что данный прибор позволяет оценить свойства

образцов во всем выбранном в работе температурном диапазоне, независимо от времени выдержки (табл. 2). При измерении

твердости особое внимание обращалось на попадание детектора прибора в цементный камень, а не в наполнитель.

Таблица 2  
Результаты измерения твердости образцов твердости (НВ) от температуры прогрева (°С) бетонного образца

| Температура нагрева образцов, °С | Среднее значения по 40 измерениям твердости образцов |                        |
|----------------------------------|--|------------------------|
|                                  | время нагрева 30 минут                               | время нагрева 60 минут |
| 20                               | 183  |                        |
| 300                              | 157  | 188                    |
| 400                              | 149  | 163                    |
| 500                              | 144  | 166                    |
| 600                              | 140  | 151                    |
| 700                              | 126  | 104                    |
| 800                              | 92   | 66                     |
| 900                              | 44   | 42                     |

Анализ полученных результатов показал, что наибольшие изменения твердости наблюдаются при нагреве образцов выше 600 °С, в этом диапазоне зависимость

твердости от температуры нагрева носит линейный характер, достоверность аппроксимации полученных регрессионных зависимостей составляет 0,94 и 0,97 (рис. 3).

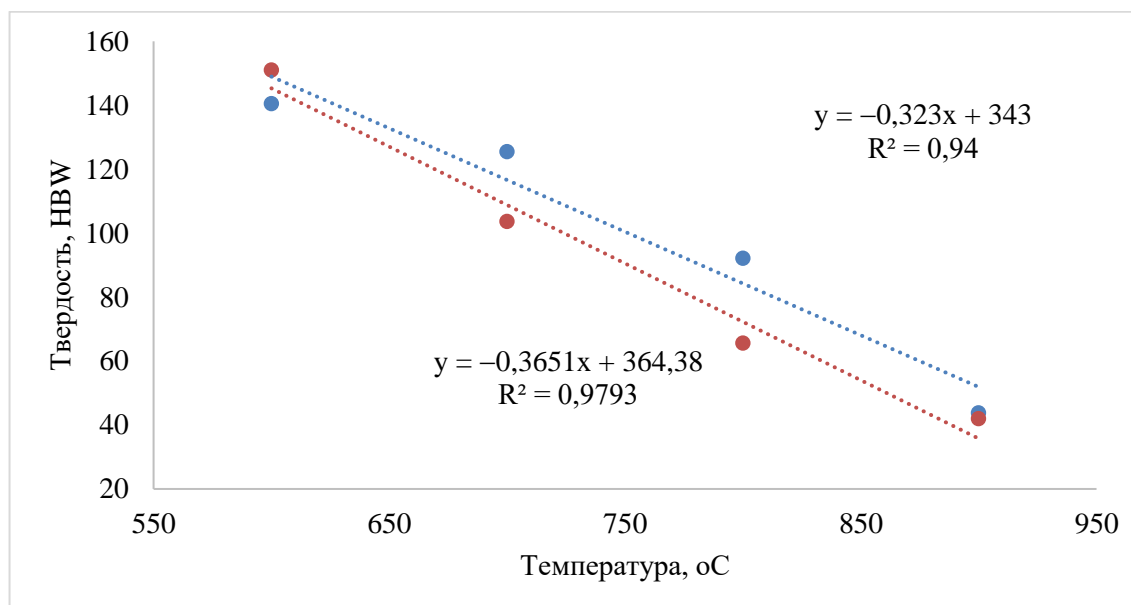


Рисунок 3. Зависимости твердости от температуры нагрева образцов в диапазоне 600–900 °С

По полученным данным также были получены уравнения, позволяющие оценить температуру нагрева блока в зависимости от измеренных значений твердости для

времени выдержки при температуре от 300 до 900 °С в течение 30 минут и 60 минут, соответственно.

$$t = -4,77 \cdot \text{НВ} + 1166, \quad (3)$$

$$t = -3,73 \cdot НВ + 1068, \quad (4)$$

где  $t$  – температура нагрева, °С;

НВ – твердость по шкале Бринелля.

Использование подобных эмпирических уравнений в пожарно-технической экспертизе позволяет делать оценку температурных характеристик нагрева на основе данных, полученных несколькими методами. Чаще всего сравнительную оценку степени термического поражения материалов делают непосредственно по результатам, полученным с помощью средств измерения. Такой подход не позволяет использовать получаемые данные в полной мере, поскольку различные методы, как показывают представленные выше результаты, работают в разных температурных диапазонах. Оптимальным вариантом стало бы получение уравнений, основанных на результатах измерения, полученных несколькими методами исследования, но в этом случае требуется обоснованное доказательство независимости измеряемых свойств материалов и анализ получаемых выборок результатов измерения на равномерность. В тоже время можно предложить методику, последовательно сочетающую выбранные методы исследования, например, на первом этапе можно проводить исследование с помощью ультразвукового тестера, в тех зонах, где метод не работает, прибегать к использованию твердомера.

Прежде чем предложить данный подход необходимо убедиться в достоверности получаемых значений. В количественном анализе для этих случаев исполь-

зуют определенные в соответствии с нормативными документами показатели повторяемости, воспроизводимости, правильности и точности. Но в методиках пожарно-технической экспертизы, основанных на сравнительном анализе результатов измерения, полученных в разных зонах пожара, такой подход не применим. Поэтому предлагается использовать для этих целей статистические критерии, позволяющие доказать допустимость применения отдельных методов при исследовании после пожара бетонных конструкций.

Разрушение образцов при нагреве не позволяет однозначно утверждать, что получаемые массивы можно отнести к равномерным выборкам, даже относительно измерений для образцов, выдержанных при одинаковых температурах. Для оценки достоверности результатов, определенных выбранными в работе методами на первом этапе, было проведено сравнение данных, снятых при исследовании образцов полученных в аналогичных температурно-временных условиях, анализ приводился по 10 параллельным измерениям. Для этих целей был использован критерий Кохрена ( $G$ ), который позволяет проводить сравнение выборок с целью установления сравнимости случайных ошибок. Для выбранных в работе условий критическое значение критерия  $G$  составляет 0,62 для доверительной вероятности  $P = 0,95$  [6]. Полученные значения критерия  $G$  на основе результатов измерения скорости прохождения ультразвуковой волны и твердости представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3  
Значения критерия  $G$  при оценке выборок, полученных при изменении скорости прохождения ультразвуковой волны

| Температура нагрева образцов, °С | Критерий $G$           |                        |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|
|                                  | Время нагрева 30 минут | Время нагрева 60 минут |
| 20                               | 0,42                   | 0,42                   |
| 300                              | 0,47                   | 0,73                   |
| 400                              | 0,53                   | 0,99                   |
| 500                              | 0,66                   | 0,33                   |
| 600                              | 0,61                   | 0,79                   |
| 700                              | 0,55                   | –                      |



Таблица 4  
Значения критерия G при оценке выборок, полученных при изменении твердости

| Температура нагрева образцов, °С | Критерий G             |                        |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|
|                                  | Время нагрева 30 минут | Время нагрева 60 минут |
| 20                               | 0,56                   | 0,56                   |
| 300                              | 0,75                   | 0,58                   |
| 400                              | 0,59                   | 0,35                   |
| 500                              | 0,55                   | 0,45                   |
| 600                              | 0,39                   | 0,39                   |
| 700                              | 0,65                   | 0,42                   |
| 800                              | 0,40                   | 0,42                   |
| 900                              | 0,50                   | 0,52                   |

Полученные значения выбранного статистического критерия позволяют отнести результаты измерений образцов к относительно равномерным выборкам, в ряде случаев фиксируется превышение критического значения. Это можно объяснить влиянием на результат условий проведения экспериментов, прогрев образцов в муфельной печи недостаточно равномерный со всех четырех сторон образца. В целом можно сказать, что результаты оценки полученных экспериментальных данных позволяют использовать их для построения регрессионных зависимостей, что подтверждает достоверность выводов на их основе.

Вторым этапом работы стало изучение возможности применения результатов

измерения данного параметра для оценки температуры нагрева. Для этого результаты исследования образцов нагреваемых при разных температурах, отличающихся на 100 °С, необходимо сравнить между собой для подтверждения значимости различий между ними. Для этих целей в работе использован расчет критерия Стьюдента (t), его критическое значение составляет 2,26. Результаты сравнения измерения скорости прохождения ультразвуковой волны для образцов, нагретых до разных температур приведены в табл. 5–6. За положительный результат считается превышение критического значения критерия, в этом случае разница является значимой.

Таблица 5  
Значения t-критерия, полученные при сравнении результатов измерения скорости прохождения УЗ-волны образцов, подвергнутых нагреву до разных температур (время выдержки образцов – 30 мин)

| Температура, °С | 300  | 400   | 500   | 600   | 700   |
|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|
| 20              | 7,06 | 11,52 | 18,89 | 25,39 | 45,78 |
| 300             | –    | 5,97  | 13,25 | 20,16 | 36,31 |
| 400             | –    | –     | 6,43  | 13,17 | 23,19 |
| 500             | –    | –     | –     | 7,06  | 15,10 |
| 600             | –    | –     | –     | –     | 5,72  |



Таблица 6  
Значения *t*-критерия, полученные при сравнении результатов измерения скорости прохождения УЗ-волны образцов, подвергнутых нагреву до разных температур (время выдержки образцов – 60 мин)

| Температура, °С | 300   | 400   | 500   | 600   |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| 20              | 14,34 | 17,35 | 39,48 | 70,30 |
| 300             | –     | 9,43  | 25,26 | 48,01 |
| 400             | –     | –     | 5,87  | 13,30 |
| 500             | –     | –     | –     | 12,60 |

Анализ полученных данных показывает, что во всех случаях рассчитанные критерии, полученные при анализе результатов измерения образцов, температура предварительного нагрева которых отличается на 100 °С, превышают критическое значение, что подтверждает возможность использования данного метода при оценке степени термического воздействия на образцы бетонных блоков в целях пожарно-технической экспертизы.

Аналогичные данные, полученные при оценке результатов измерения твердости образцов, показали, что данный метод может быть использован для оценки температуры нагрева образцов только если ее значение превышает 700 °С (табл. 7–8).

Таблица 7  
Значения *t*-критерия, полученные при сравнении результатов измерения твердости образцов, подвергнутых нагреву до разных температур (время выдержки образцов – 30 мин)

| Температура, °С | 300  | 400  | 500  | 600  | 700  | 800  | 900   |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 20              | 1,36 | 3,01 | 2,18 | 2,66 | 3,22 | 5,38 | 9,08  |
| 300             | –    | 1,68 | 0,80 | 1,14 | 1,89 | 4,15 | 8,11  |
| 400             | –    | –    | 0,94 | 0,87 | 0,21 | 2,56 | 6,80  |
| 500             | –    | –    | –    | 0,24 | 1,17 | 3,57 | 7,94  |
| 600             | –    | –    | –    | –    | 1,13 | 4,09 | 10,19 |
| 700             | –    | –    | –    | –    | –    | 2,35 | 6,61  |
| 800             | –    | –    | –    | –    | –    | –    | 4,42  |

Таблица 8  
Значения *t*-критерия, полученные при сравнении результатов измерения твердости образцов, подвергнутых нагреву до разных температур (время выдержки образцов – 60 мин)

| Температура, °С | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8     |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 20              | 0,26 | 1,03 | 0,83 | 1,96 | 4,92 | 7,58 | 9,22  |
| 300             | –    | 1,27 | 1,06 | 2,18 | 4,99 | 7,51 | 9,05  |
| 400             | –    | –    | 0,14 | 0,83 | 4,05 | 6,95 | 8,76  |
| 500             | –    | –    | –    | 0,90 | 3,78 | 6,32 | 7,89  |
| 600             | –    | –    | –    | –    | 4,26 | 8,40 | 11,02 |
| 700             | –    | –    | –    | –    | –    | 3,85 | 6,42  |
| 800             | –    | –    | –    | –    | –    | –    | 2,77  |

Проведенные исследования показали эффективность использования статистических критериев для подтверждения достоверности результатов исследования бетонных блоков с помощью акустического тестера и твердомера. Разрушение материала не позволяет проводить исследование акустическим методом при высоких температурах (выше 700 °С), но

именно в этой области результаты исследования твердости могут быть использованы для дальнейшего исследования образцов, что подтверждено статистическими критериями. Данный подход может применяться для оценки результатов, получаемых при исследовании других материалов на месте пожаров в ходе установления очаговой зоны и условий развития пожара.

#### Литература

1. Чешко И. Д., Плотников В. Г. Анализ экспертных версий возникновения пожара: в 2 кн. СПб., 2010. Кн. 1. 708 с.
2. Моторыгин Ю. Д., Сикорова Г. А. Комплексная методика исследования степени термического поражения стальных элементов транспортных средств с помощью полевых методов // Технологии техносферной безопасности. 2021. № 3 (93). С. 137–151.
3. Ловчиков В. А., Лебедев А. Ю. Исследование электросопротивления углей в пожарно-технической экспертизе // Судебная экспертиза. 2011. № 3 (27). С. 10–16.
4. Лебедев А. Ю., Бельшина Ю. Н., Черушов И. В. Исследование акустических свойств природных каменных материалов в целях установления очага пожара // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10, № 3 (55). С. 164–168.
5. Абразумов О. В., Лебедев А. Ю. Определение степени термической деструкции бетонных материалов методом акустического анализа // Проблемы управления рисками в техносфере. 2021. № 3 (59). С. 109–115.
6. Дерффель К. Статистика в аналитической химии. М., 1994. С. 268.

#### References

1. Cheshko I. D., Plotnikov V. G. Analysis of expert versions of fire occurrence. In 2 books. St. Petersburg, 2010. Book 1. 708 p.
2. Motorygin Yu. D., Sikorova G. A. Complex methodology for studying the degree of thermal damage to steel elements of vehicles using field methods // Technosphere security technologies. 2021. No. 3 (93). Pp. 137–151.
3. Lovchikov V. A., Lebedev A. Yu. Study of electrical resistance of coals in fire-technical expertise // Forensic examination. 2011. No. 3 (27). Pp. 10–16.
4. Lebedev A. Yu., Belshina Yu. N., Cherushov I. V. Investigation of acoustic properties of natural stone materials in order to establish a fire source // XXI century: results of the past and problems of the present plus. 2021 Vol. 10, No. 3 (55). Pp. 164–168.
5. Abrazumov O. V., Lebedev A. Yu. Determination of the degree of thermal destruction of concrete materials by acoustic analysis // Problems of risk management in the technosphere. 2021. No. 3 (59). Pp. 109–115.
6. Derffel K. Statistics in analytical chemistry. M., 1994. P. 268.