

## **ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ ГИПСОВЫХ ПЛИТ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ПОЛУЧЕННЫХ В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА ТЕРМИЧЕСКИХ ПОРАЖЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ**

**Суриков А.В., Зайнудинова Н.В., Бойко В.П., Гараев Ю.В.**

*Цель.* Определить применимость динамического индентирования гипсовых плит для оценки степени полученных в условиях пожара термических поражений конструкций. Выделить основные характеристики оборудования для индентирования гипсовых плит, использованных в качестве огнезащиты строительных конструкций.

*Методы.* Лабораторные исследования образцов гипсовых плит в камерной электропечи при температурном воздействии. Динамическое индентирование. Полный факторный эксперимент.

*Результаты.* Установлена возможность применения динамического индентирования гипсовых плит для оценки степени полученных в условиях пожара термических поражений конструкций, выполненных с их применением. Показано, что для определения изменения динамической твердости, обусловленного термическим поражением указанного материала, применение инденторов цилиндрической формы является более предпочтительным в сравнении с коническими инденторами. На основании результатов полного факторного эксперимента получена математическая модель, описывающая изменение глубины вдавливания стального цилиндрического индентора в гипсовую плиту в зависимости от его площади поперечного сечения, силы сжатия пружины разгонного устройства, значения температуры и времени нагрева материала. Определены технические характеристики оборудования, предназначенного для внедрения индентора в исследуемый материал путем создания ударного импульса (площадь поперечного сечения цилиндрического индентора 12,6 мм<sup>2</sup>; сила сжатия пружины разгонного устройства 130 Н).

*Область применения исследований.* Полученные результаты исследований могут быть применены при разработке технических средств для определения степени полученных в условиях пожара термических поражений конструкций, выполненных из гипсовых плит.

*Ключевые слова:* осмотр места пожара, гипсовая плита, термическое повреждение, ударно-импульсный метод, очаг пожара.

(Поступила в редакцию 24 февраля 2023 г.)

### **Введение**

Выявление очага пожара является одной из задач, решаемых работниками органов государственного пожарного надзора либо другими специалистами на месте пожара. Решение данной задачи реализуется как по результатам визуальной фиксации очаговых признаков и признаков направленности распространения горения, так и с применением при необходимости различных инструментальных методов исследования [1]. Последние, в свою очередь, проводятся в лабораторных либо полевых условиях, а результаты исследований с их применением позволяют произвести оценку степени термических поражений конструкций и изделий, выполненных из различных материалов, а также определить расчетные температурно-временные параметры теплового воздействия на указанные объекты. Среди полевых методов наибольшее распространение получили: измерение глубины обугливания древесины и электрорезистивные исследования ее обугленных остатков, магнитный метод исследования холоднодеформированных и каленых стальных изделий, ультразвуковой метод исследования бетонных и железобетонных конструкций и ряд

других<sup>1</sup>. Известны работы, направленные на разработку новых методов исследований, а также на совершенствование существующих<sup>2</sup> (например, [2–3]).

Проведенный в работе [4] анализ научных работ, выполненных на постсоветском пространстве, показал, что исследований, направленных на разработку методов определения термических поражений и методов определения расчетных температурно-временных параметров теплового воздействия на конструкции, выполненные с применением гипсовых плит, не проводится. Показано, что визуальная оценка термического поражения гипсовых плит имеет низкую степень информативности при достаточно невысоких температурах воздействия на материал (для листов гипсовых стандартных и влагостойких до 300 °С, для листов гипсовых с повышенной стойкостью гипсового сердечника при воздействии открытого пламени – до 400 °С). Это определяет перспективность применения инструментальных методов исследования. За рубежом применяются методы, суть которых сводится к измерению глубины прокалывания слоя гипса, образованного в результате термического воздействия в условиях пожара. При этом для измерения используются либо штангенциркуль, либо динамометр сжатия с присоединенным измерительным зондом (индентором), либо специально разработанные устройства [4]. Фактически указанные методы базируются на фиксации изменения твердости материала (за счет протекания процесса дегидратации гипса) с применением метода статического индентирования, при котором вдавливание индентора происходит при постоянной нагрузке.

Предпосылками для настоящих исследований послужили проанализированные в статье [4] работы, посвященные определению глубины прокалывания гипсовых плит, а также результаты работы [2], в которой исследована зависимость изменения поверхностной твердости ячеистых бетонов от предшествующего воздействия высоких температур с применением динамического индентирования. Последнее представляет собой ударное внедрение индентора в испытуемый материал под действием однократного ударного импульса, создаваемого посредством специального разгонного устройства или силы тяжести<sup>3</sup>. В работе [2] проводилось измерение глубины вдавливания стальных инденторов конусной формы с различными углами раствора в зависимости от значения температур, при которых выдерживали образцы. Для обеспечения сообщения ударно-поступательного движения индентору и необходимой силы удара применялось специальное разгонное устройство. Таким образом, авторами настоящей работы была поставлена цель по определению применимости динамического индентирования гипсовых плит для проведения в полевых условиях оценки степени полученных в условиях пожара термических поражений конструкций, выполненных с их применением, с использованием разгонного устройства и инденторов, примененных в работе [2], а также основных характеристик указанного оборудования.

### Основная часть

**Экспериментальные исследования динамического индентирования гипсовых плит.** Исследования проводились в лабораторных условиях и сводились к определению изменения динамической твердости (твердости, определяемой при ударном нагружении) гипсовой плиты путем измерения глубины вдавливания индентора в ее поверхность по аналогии с известным методом динамического индентирования по ГОСТ Р 56474-2015<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Методология судебной пожарно-технической экспертизы: основные принципы. – М.: ФГУ ВНИИПО, 2013. – 23 с.

<sup>2</sup> Сысоева, Т.П. Комплексная методика исследования металлических изделий с целью установления очаговых признаков и причин пожаров автомобилей: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Т.П. Сысоева. – СПб., 2015. – 152 л.

<sup>3</sup> Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования: ГОСТ Р 56474-2015. – Введ. 01.01.16. – М.: Стандартинформ, 2019. – 22 с.

<sup>4</sup> См. сноску 3.

Искомая величина устанавливалась в зависимости от температуры и времени нагрева исследуемых образцов гипсовой плиты.

Для обеспечения сообщения индентору ударно-поступательного движения с заданным усилием использовалось разгонное устройство, описанное в работе [2].

С учетом работы [5] измерения проводились с применением конусного и цилиндрического инденторов. Угол раствора конусного индентора составлял  $55^\circ$  при диаметре основания конуса 7 мм. Площадь поперечного сечения цилиндрического индентора и сила сжатия пружины разгонного устройства подбирались максимально близко к значениям площадей инденторов и прикладываемых усилий (прилагаемое давление около  $9 \text{ Н/мм}^2$ ), приведенным в работах [6] и [7], и составляли  $12,6 \text{ мм}^2$  и  $130 \text{ Н}$  соответственно.

Измерение глубины вдавливания проводилось цифровым глубиномером с диапазоном измерений от 0 до  $25,00 \text{ мм}$ , ценой деления и погрешностью  $0,01 \text{ мм}$ .

В качестве исследуемого материала была принята наиболее востребованная на рынке Республики Беларусь гипсовая плита влагостойкая типа Н (далее – ГКЛВ). Исследуемые образцы изготавливали одинаковых размеров ( $140 \times 100 \text{ мм}$ ) и нагревали в муфельной электропечи ЭКПС-10/1300 с открытыми нагревательными элементами (далее – печь). Размещение и крепление исследуемых образцов, измерение температуры на их обогреваемой и необогреваемой стороне, а также внутри печи проводилось по аналогии с исследованиями, приведенными в работе [8]:

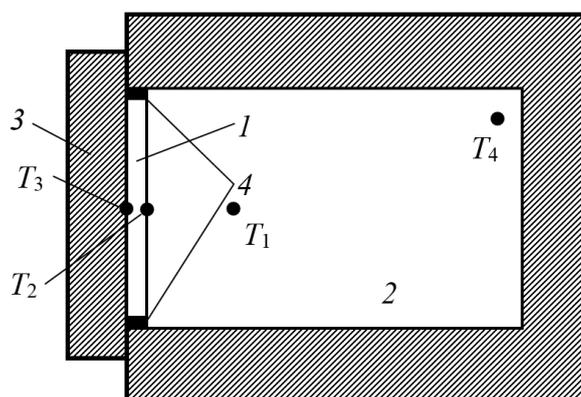
– образцы крепили к стальной пластине толщиной 1 мм, размерами ( $50 \times 80 \text{ мм}$ ) посредством винтового соединения (винты диаметром 4 мм);

– стальную пластину с закрепленным образцом устанавливали вплотную на дверцу печи с помощью стальной шпильки, приваренной к пластине;

– зазоры и неплотности, образующиеся по периметру исследуемого образца и теплоизоляции дверцы печи, уплотняли мягким огнеупорным рулонным волокном;

– для измерения температуры использовались термоэлектрические преобразователи с диапазоном измерения до  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ , диаметром не более  $0,75 \text{ мм}$  и изолированным слоем не менее  $300 \text{ мм}$ .

Измерительная схема приведена на рисунке 1.



1 – исследуемый образец; 2 – рабочая камера печи; 3 – дверца печи; 4 – уплотнение из огнеупорного материала;  $T_1$  – точка установки термоэлектрического преобразователя внутри рабочей камеры печи (расстояние до плоскости образца  $100 \text{ мм}$ );  $T_2$  – точка установки термоэлектрического преобразователя на обогреваемой стороне исследуемого образца (в геометрическом центре);  $T_3$  – точка установки термоэлектрического преобразователя на необогреваемой стороне исследуемого образца (в геометрическом центре);  $T_4$  – точка датчика контроля температуры в печи, предусмотренного его конструкцией (расстояние до плоскости образца  $260 \text{ мм}$ )

**Рисунок 1. – Измерительная схема экспериментальных исследований**

Глубину вдавливания инденторов определяли при температуре в печи (показания индикатора)  $150, 250$  и  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  (далее – целевые температуры) в течение 1, 10 и 15 мин.

Значения температуры принимались на основании известных значений температур, при которых происходит дегидратация гипса ( $80\text{--}250 \text{ }^\circ\text{C}$ ) [9], а также с учетом работы [4]

(температура, при которой происходит механическое разрушение ГКЛВ, – 400–500 °С). Время нагрева определялось исходя из необходимости выявления различий глубины вдавливания индентора при целевых температурах при малом по длительности нагреве и изменения измеряемого параметра с увеличением времени.

Для проведения исследований закрытую специальной заглушкой рабочую камеру печи разогревали до целевой температуры по заданной программе нагрева. При ее достижении заглушку извлекали, закрывали дверцу печи и нагревали исследуемый образец в течение заданного времени, после чего испытания прекращались и образец доставался.

Охлаждение образцов осуществлялось без дополнительного обдува. Известно, что при измерении глубины прокалывания гипсовых плит существенное влияние оказывает влажность исследуемого материала [10, п. 18.4.4]. Смачивание выполненных с применением данного материала конструкций, подвергшихся термическому воздействию в условиях пожара, прежде всего может быть обусловлено проведением работ по его тушению. В настоящей работе указанный фактор не учитывался, а его влияние может быть исследовано в дальнейшем.

При проведении измерений авторы руководствовались требованиями к проведению испытаний при применении метода динамического индентирования, установленными ГОСТ Р 56474-2015<sup>5</sup>: разгонное устройство располагалось так, чтобы усилие прикладывалось строго перпендикулярно испытываемой поверхности; расстояние от края образца, а также между центрами двух соседних отпечатков составляло не менее трех их диаметров; при проведении испытаний образцы помещались на жесткое основание, а разгонное устройство плотно прижималось к их поверхности; за результат испытаний принималось среднее значение, полученное при проведении 5 измерений. Оценка погрешностей измерений проводилась согласно ГОСТ 8.207-76<sup>6</sup>.

На рисунке 2 для примера приведены образцы ГКЛВ, нагретые при целевых температурах в печи в течение 10 мин, после измерения глубины вдавливания инденторов.



а – температура в печи 150 °С

б – температура в печи 250 °С

в – температура в печи 400 °С

**Рисунок 2. – Внешний вид образцов со следами воздействия инденторов**

Результаты измерений глубины вдавливания инденторов, а также зависимости температур, полученные в ходе исследования, приведены на рисунках 3 и 4 соответственно.

По представленным данным видно, что в заданных временных условиях при температуре нагрева в печи 150 °С глубина вдавливания не изменилась как при применении конусного, так и при применении цилиндрического инденторов. Это обусловлено достаточно низкими температурами непосредственно на поверхности образцов (рис. 4 а, б, в). Так,

<sup>5</sup> См. сноску 3.

<sup>6</sup> Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения: ГОСТ 8.207-76. – Введ. 15.03.76. – М.: Стандартинформ, 2006. – 7 с.

температура на поверхности образцов достигала 80 °С при нагреве в течение первых двух минут, а в течение 10–15 мин составляла 100–110 °С. Указанные условия не позволили сформироваться достаточному слою прокаленного гипса, и, как следствие, существенных изменений в динамической твердости материала не произошло.

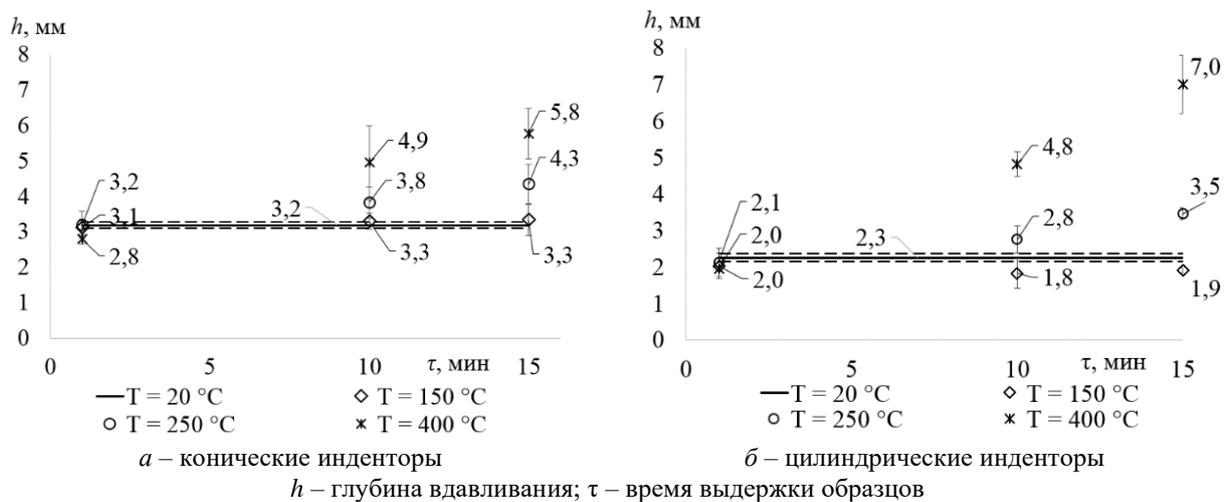


Рисунок 3. – Результаты измерений глубины вдавливания инденторов

При температуре в печи, равной 250 °С, по истечении первой минуты температура на поверхности образцов составляла около 130 °С. При дальнейшем нагреве в течение 5–15 мин указанный показатель составлял 200–210 °С (рисунок 4 г, д, е). При этом температура на необогреваемой поверхности достигала 80–85 °С после 12 мин с момента начала температурного воздействия, т.е. образец нагревался до температур, достаточных для процесса дегидратации гипса по всему сечению.

При нагреве образцов в течение 1 мин при температуре в печи, равной 400 °С, температура на их поверхности составляла 230–240 °С, а при нагреве в течение 5–15 мин 335–370 °С (рис. 4 г, д, е). Температура на необогреваемой поверхности превышала 80 °С после 6 мин с момента начала нагрева.

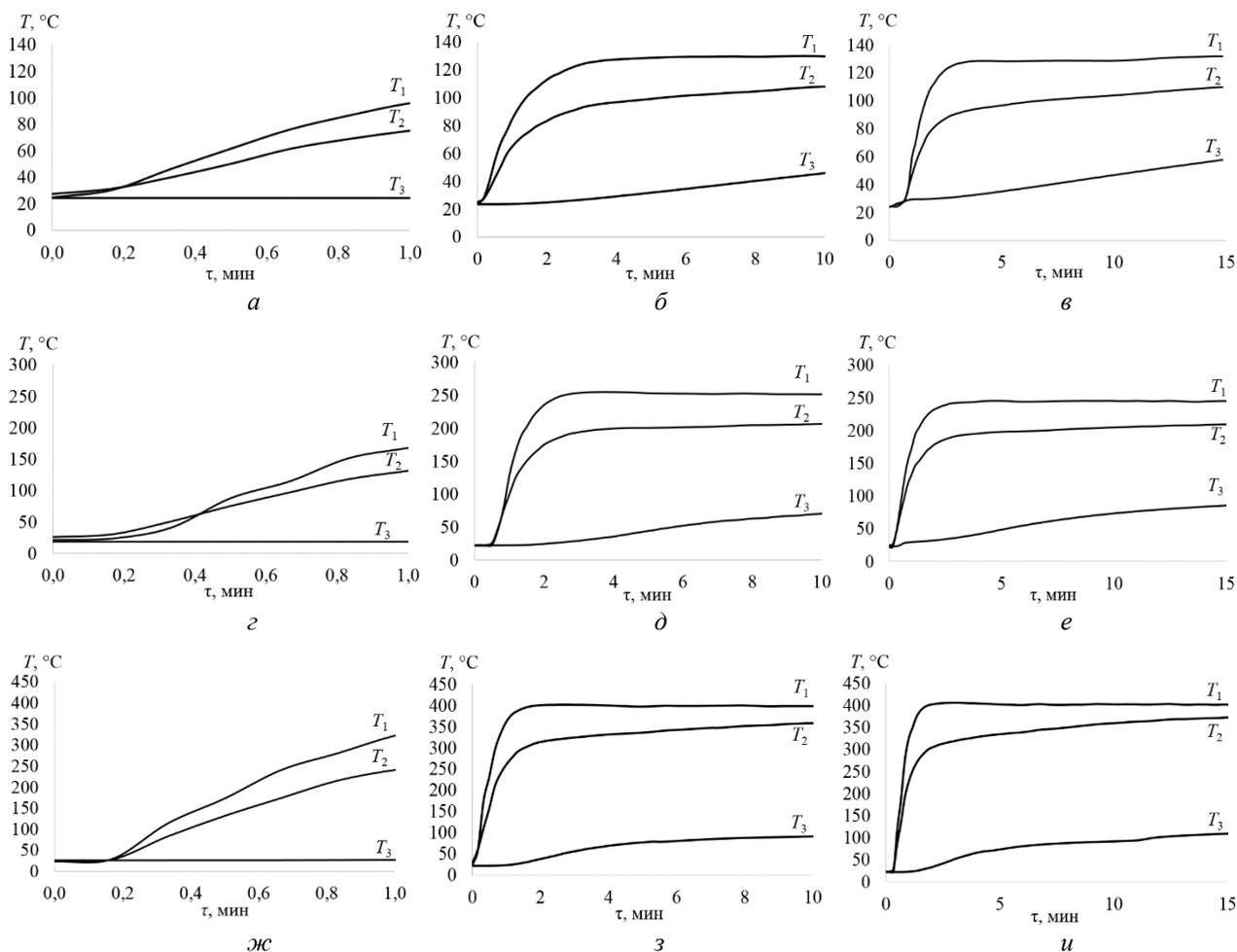
Таким образом, в заданных временных условиях при увеличении температуры в печи до 250 и 400 °С наблюдается устойчивая тенденция к увеличению глубины вдавливания инденторов, что связано с процессом дегидратации гипса, обусловленным значением температуры на поверхности исследуемых образцов и их нагревом по всему сечению. Указанный эффект проявляется уже при 10 мин воздействия целевых температур.

При этом рассеяние результатов измерения при использовании конического индентора значительно превышает его значение при применении индентора цилиндрической формы. Указанное согласуется с результатами, полученными в работе [5] относительно предпочтительности выбора цилиндрической формы индентора при статическом индентировании гипсовых плит. По указанной причине при дальнейших исследованиях применялись инденторы цилиндрической формы.

Следует отметить, что условия, при которых проводились исследования ГКЛВ, нельзя непосредственно экстраполировать на условия, характерные для реальных пожаров. Прежде всего это связано с режимом нагрева образцов.

Как известно, любой пожар характеризуется определенным температурным режимом. Очевидно, что на значение глубины вдавливания индентора помимо непосредственно прикладываемого ударного воздействия будет влиять и температурно-временной режим нагрева материала, т.е. скорость нарастания температуры на поверхности плиты до ее целевого значения. Последнее связано с тем, что в зависимости от скорости нагрева будет определяться и глубина прокалывания гипса. Иными словами, при достижении на поверхности плиты температуры, при которой начинается процесс дегидратации, глубина прокалывания

гипса будет зависеть от времени, в течение которого материал был подвержен воздействию температуры, превышающей минимальную температуру начала указанной химической реакции. Следовательно, чем интенсивнее будет нарастать температура, тем меньше будет глубина прокаливания при достижении ее целевого назначения.



*a, б, в* – целевая температура – 150 °С, время выдержки образцов – 1, 10 и 15 мин соответственно;  
*г, д, е* – целевая температура – 250 °С, время выдержки образцов – 1, 10 и 15 мин соответственно;  
*ж, з, и* – целевая температура – 400 °С, время выдержки образцов – 1, 10 и 15 мин соответственно;  
 $T_1$  – температура внутри рабочей камеры печи;  $T_2$  – температура на обогреваемой стороне исследуемого образца;  $T_3$  – температура на необогреваемой стороне исследуемого образца  
**Рисунок 4. – Результаты измерений температуры при проведении исследований**

Это означает, что для оценки термических поражений гипсовых плит, полученных в результате пожара, необходимо определить зависимости глубины прокаливания (глубины вдавливания индентора) от температурно-временного режима нагрева материала, в том числе для различных его типов. Указанное может быть одним из направлений дальнейших исследований.

Полученные результаты свидетельствуют, что воздействие высоких температур значительно влияет на динамическую твердость ГКЛВ, что подтверждает перспективность применения динамического индентирования для проведения оценки термического поражения конструкций, выполненных с применением гипсовых плит. Для получения более однозначных результатов определения глубины вдавливания инденторов в зависимости от температуры и времени ее воздействия авторами была проведена дальнейшая серия исследований, направленных на изучение характеристик использованного оборудования, обеспечивающего ударное воздействие, – силы сжатия пружины разгонного устройства и размеров инденторов.

**Экспериментальные исследования по определению технических характеристик разгонного устройства.** Для определения оптимальных технических характеристик разгонного устройства исследования проводились с использованием цилиндрических инденторов различного поперечного сечения при варьировании силы сжатия пружины устройства, температуры и времени нагрева образцов гипсовых плит. С учетом результатов работы [2] применялись стальные цилиндрические инденторы с площадью поперечного сечения 0,8; 3,1; 7,1 и 12,6 мм<sup>2</sup> (рис. 5).

С целью исследования влияния площади поперечного сечения инденторов разгонного устройства и условий нагрева гипсовой плиты на глубину вдавливания применен метод полного факторного эксперимента (далее – ПФЭ). В качестве главных факторов были приняты: площадь поперечного сечения индентора  $S$ , сила сжатия пружины разгонного устройства  $F$ ; температура в печи  $T$ ; время нагрева  $t$ ; в качестве отклика – глубина вдавливания  $h$ .

Значения уровней и интервалов факторов приведены в таблице 1. Количество уровней факторов определялось исходя из того, что глубина прокаливания гипсовой плиты и, следовательно, глубина вдавливания нелинейно зависит от варьируемых факторов [5; 7]. В связи с этим для описания искомой зависимости необходимо как минимум 3 уровня. Для реализации ПФЭ с количеством факторов, равным 4, и количеством уровней, равным 3, проведена 81 серия опытов.



Рисунок 5. – Внешний вид инденторов

Таблица 1. – Уровни и интервалы факторов при применении цилиндрических инденторов

№	Факторы	Уровни факторов		
		нижний (-1)	основной (0)	верхний (+1)
1	Площадь поперечного сечения индентора $S$ , мм	3,1	7,1	12,6
2	Сила сжатия пружины $F$ , Н	130	145	160
3	Температура в печи $T$ , °С	150	250	400
4	Время нагрева $t$ , мин	1	10	15

Интервалы факторов определялись исходя из цели настоящей работы, а также на основании проведенных предварительных экспериментов и с учетом имеющегося оборудования:

– интервалы значений силы сжатия пружины разгонного устройства определялись его техническими возможностями (регулировка в диапазоне 130–160 Н);

– интервалы площади поперечного сечения цилиндрических инденторов принимались с учетом результатов работ [6; 7], а также предварительных экспериментов, которые показали неинформативность результатов измерений при применении инденторов площадью поперечного сечения 0,8 мм<sup>2</sup> (явных изменений глубины вдавливания при воздействии различных температур выявлено не было);

– интервалы значений температуры и времени нагрева принимались по аналогии с первым блоком исследований, представленных в основной части настоящей работы.

Анализ ПФЭ проводился с помощью программного обеспечения STATISTICA компании StatSoft, Inc. (США). Результаты измерений глубины вдавливания конических инденторов, полученные в ходе ПФЭ, приведены в таблице 2.

Анализ ПФЭ показал, что наиболее точной моделью, описывающей изменчивость отклика, является модель, учитывающая взаимодействие главных факторов и квадратов главных факторов 2-го порядка (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,92$ ):

$$h = h_0 + k_1S + k_2S^2 + k_3T + k_4T^2 + k_5F + k_6F^2 + k_7\tau + k_8\tau^2 + k_9ST + k_{10}ST^2 + k_{11}S^2T + k_{12}S^2T^2 + k_{13}SF + k_{14}SF^2 + k_{15}S^2F + k_{16}S^2F^2 + k_{17}S\tau + k_{18}S\tau^2 + k_{19}S^2\tau + k_{20}S^2\tau^2 + k_{21}TF + k_{22}TF^2 + k_{23}T^2F + k_{24}T^2F^2 + k_{25}T\tau + k_{26}T\tau^2 + k_{27}T^2\tau + k_{28}T^2\tau^2 + k_{29}F\tau + k_{30}F\tau^2 + k_{31}F^2\tau + k_{32}F^2\tau^2, \quad (1)$$

где  $h_0, k_1, k_2, k_3, \dots, k_{32}$  – коэффициенты уравнения регрессии в натуральном масштабе переменных, имеющие размерность, обратную размерности переменных / произведению переменных при них.

Таблица 2. – Результаты измерений глубины вдавливания инденторов

№ серии	Факторы в натуральном масштабе				Среднее $h_{ср.}$	№ серии	Факторы в натуральном масштабе				Среднее $h_{ср.}$	№ серии	Факторы в натуральном масштабе				Среднее $h_{ср.}$
	S	T	F	$\tau$			S	T	F	$\tau$			S	T	F	$\tau$	
1	3,1	150	160	15	<b>9,8</b>	28	12,6	150	160	1	<b>3,0</b>	55	12,6	250	145	1	<b>2,9</b>
2	7,1	250	130	1	<b>3,6</b>	29	7,1	150	160	1	<b>4,5</b>	56	12,6	400	160	1	<b>3,2</b>
3	7,1	250	130	15	<b>4,7</b>	30	12,6	150	160	15	<b>2,6</b>	57	3,1	250	160	15	<b>9,9</b>
4	12,6	400	130	15	<b>7,0</b>	31	7,1	400	130	15	<b>7,6</b>	58	3,1	250	145	1	<b>7,8</b>
5	12,6	250	160	1	<b>3,4</b>	32	3,1	400	130	1	<b>6,9</b>	59	3,1	150	145	1	<b>7,3</b>
6	3,1	150	160	1	<b>8,8</b>	33	12,6	400	160	10	<b>6,8</b>	60	7,1	250	145	10	<b>5,4</b>
7	7,1	400	130	10	<b>2,9</b>	34	12,6	400	130	10	<b>4,8</b>	61	12,6	250	145	15	<b>4,2</b>
8	3,1	150	160	10	<b>10,0</b>	35	3,1	250	160	1	<b>9,8</b>	62	3,1	400	145	1	<b>8,2</b>
9	12,6	400	160	15	<b>8,7</b>	36	7,1	400	145	1	<b>3,3</b>	63	3,1	150	130	1	<b>6,0</b>
10	3,1	250	130	15	<b>8,0</b>	37	12,6	400	145	15	<b>8,8</b>	64	3,1	150	145	15	<b>7,9</b>
11	12,6	400	145	1	<b>2,9</b>	38	12,6	150	130	10	<b>1,8</b>	65	7,1	400	145	10	<b>9,4</b>
12	7,1	150	160	10	<b>4,5</b>	39	12,6	150	130	1	<b>2,0</b>	66	12,6	250	160	15	<b>4,6</b>
13	12,6	400	145	10	<b>6,0</b>	40	3,1	250	130	10	<b>7,2</b>	67	7,1	150	160	15	<b>4,6</b>
14	3,1	400	145	10	<b>10,2</b>	41	3,1	400	160	1	<b>9,5</b>	68	3,1	400	145	15	<b>12,5</b>
15	7,1	250	145	1	<b>4,3</b>	42	3,1	150	130	10	<b>7,1</b>	69	7,1	400	160	10	<b>10,0</b>
16	7,1	250	160	1	<b>5,0</b>	43	7,1	250	160	15	<b>6,5</b>	70	12,6	150	145	15	<b>2,2</b>
17	12,6	150	145	1	<b>2,5</b>	44	12,6	250	130	1	<b>2,1</b>	71	7,1	150	145	15	<b>4,4</b>
18	3,1	250	130	1	<b>6,8</b>	45	12,6	250	160	10	<b>4,0</b>	72	12,6	400	130	1	<b>2,0</b>
19	12,6	150	145	10	<b>2,8</b>	46	7,1	150	130	15	<b>3,2</b>	73	7,1	400	160	15	<b>9,9</b>
20	7,1	250	160	10	<b>5,6</b>	47	7,1	150	145	1	<b>4,0</b>	74	12,6	250	130	10	<b>2,8</b>
21	7,1	250	130	10	<b>5,2</b>	48	7,1	400	160	1	<b>4,8</b>	75	3,1	150	145	10	<b>8,3</b>
22	12,6	150	160	10	<b>3,4</b>	49	7,1	400	130	1	<b>9,4</b>	76	12,6	250	145	10	<b>3,6</b>
23	3,1	250	145	10	<b>8,1</b>	50	3,1	400	130	15	<b>10,3</b>	77	7,1	400	145	15	<b>9,9</b>
24	12,6	150	130	15	<b>1,9</b>	51	3,1	150	130	15	<b>6,2</b>	78	3,1	400	130	10	<b>7,7</b>
25	3,1	400	160	10	<b>12,5</b>	52	3,1	250	145	15	<b>8,4</b>	79	3,1	400	160	15	<b>12,5</b>
26	7,1	250	145	15	<b>4,8</b>	53	7,1	150	145	10	<b>3,9</b>	80	3,1	250	160	10	<b>9,6</b>
27	7,1	150	130	1	<b>3,6</b>	54	7,1	150	130	10	<b>3,4</b>	81	12,6	250	130	15	<b>3,5</b>

Проведенные корреляционный и дисперсионные анализы позволили сделать выводы о наличии главных факторов, между которыми имеется сильная корреляционная связь, корреляции главных факторов с откликом, а также о факторах, оказывающих наибольшее влияние на изменение глубины вдавливания инденторов. Дополнительно были отсеяны незначимые факторы ( $p > 0,05$ ). В итоге была получена следующая искомая зависимость:

$$h = h_0 + k_1S + k_2S^2 + k_3T + k_5F + k_7\tau + k_{13}SF + k_{25}T\tau = -3,57750 - 0,65665S + 0,56971S^2 + 0,00187T + 0,10133F - 0,17996\tau - 0,00527SF + 0,00114T\tau. \quad (1)$$

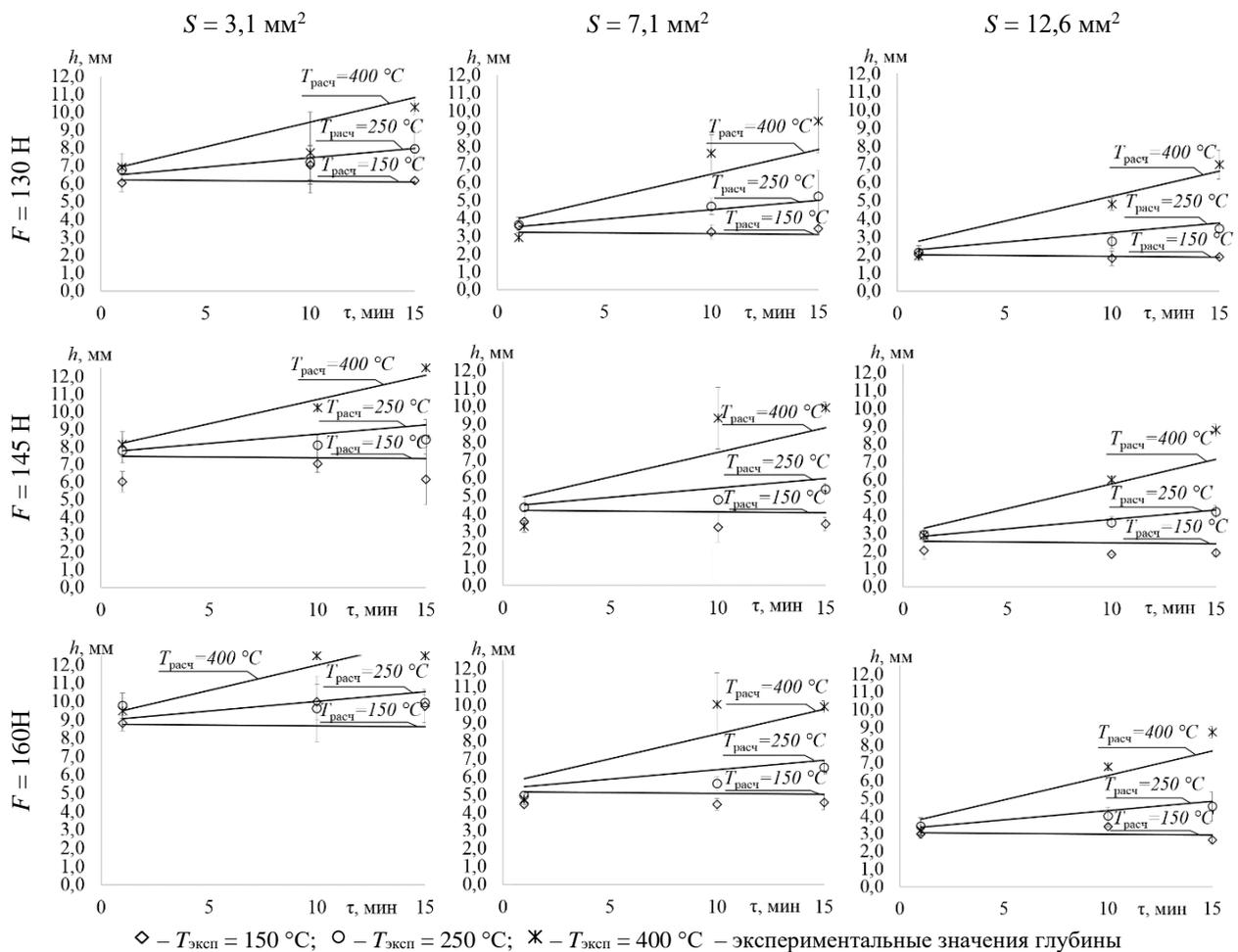
Коэффициент детерминации  $R^2$  для упрощенной модели составил 0,88.

Корреляционный анализ показал, что максимальная корреляция между главными факторами  $|r|$  составляет 0,18, что свидетельствует об отсутствии сильной корреляционной

связи между ними. По результатам анализа степени корреляции главных факторов с откликом «глубина вдавливания» установлено, что имеется умеренная корреляционная связь ( $0,25 \leq |r| \leq 0,75$ ): между откликом и фактором «площадь» ( $|r| = 0,69$ ), фактором «температура» ( $|r| = 0,42$ ), «усилие» ( $|r| = 0,26$ ) и «время» ( $|r| = 0,25$ ).

Наибольшая изменчивость объясняется факторами «площадь» – 49,5 % от общей суммы квадратов отклонений и «температура» – 15,2 %. Влияние остальных факторов на глубину вдавливания значительно меньше, т.к. отношение квадратов отклонений остальных факторов к общей сумме квадратов отклонений не превышает 10 % («время» – 7,1 %; «усилие» – 6,5 % «температура × время» – 5,5 %; «квадрат площади» – 4 %; «площадь × усилие» – 0,8 %). Указанные результаты согласуются с результатами корреляционного анализа.

Зависимости глубины вдавливания при заданных значениях уровней температуры в печи и силы сжатия пружины для исследованных площадей поперечного сечения инденторов, полученные по формуле (2), в сравнении с экспериментальными результатами приведены на рисунке 6.



$S$  – площадь поперечного сечения инденторов;  $F$  – сила сжатия пружины;  $h$  – глубина вдавливания;  $T_{\text{расч}}$  – заданное значение температуры в печи;  $\tau$  – время выдержки образцов

**Рисунок 6. – Расчетные зависимости глубины вдавливания инденторов в сравнении с экспериментальными результатами**

Анализ экспериментальных результатов показал, что при площади поперечного сечения индентора  $S = 3,1 \text{ мм}^2$  при принятых значениях силы сжатия пружины  $F$  не выявляется значимых различий по глубине вдавливания индентора  $h$  на всем принятом временном

интервале. При этом измеренные значения  $h$  не всегда согласуются с полученными по формуле (2) расчетными зависимостями. Аналогичные эффекты выявлены при  $S = 7,1 \text{ мм}^2$ .

При применении индентора с площадью поперечного сечения  $S = 12,6 \text{ мм}^2$  наблюдается значительное изменение глубины его вдавливания  $h$  в зависимости как от температуры в печи, так и от длительности ее воздействия. Данное изменение становится более характерным с увеличением времени нагрева образцов. Расчетные зависимости хорошо согласуются с экспериментальными данными на всем исследованном временном интервале при целевых температурах 150 и 250 °С. Однако при значении температуры в печи 400 °С при значениях силы сжатия пружины 145 и 160 Н наблюдается расхождение расчетных и измеренных значений, которое возрастает с увеличением времени нагрева. При указанных условиях измерения в ряде случаев происходило механическое разрушение образцов, подверженных нагреву при температуре в печи, равной 400 °С.

Вместе с тем при  $F = 130 \text{ Н}$  глубина вдавливания индентора при более высоких температурах и времени воздействия значительно увеличивается, а расчетные значения хорошо согласуются с экспериментальными.

Исходя из анализа полученных в результате ПФЭ данных оптимальным для установления температурно-временных зависимостей изменения динамической твердости гипсовых плит является применение цилиндрических инденторов с площадью поперечного сечения  $12,6 \text{ мм}^2$  при силе сжатия пружины разгонного устройства, равной 130 Н. Следует отметить, что указанное соотношение согласуется с параметрами оборудования, примененного в работах [6] и [7] при измерении глубины прокаливания гипсовых плит с применением статического индентирования.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что воздействие высоких температур значительно влияет на динамическую твердость гипсовых плит. Указанное определяет перспективность применения динамического индентирования для проведения оценки термического поражения конструкций, выполненных с применением данного материала.

Результаты измерений глубины вдавливания инденторов в поверхность предварительно нагретых образцов гипсовых плит типа ГКЛВ показали, что использование цилиндрических инденторов является более предпочтительным в сравнении с инденторами конусной формы.

На основании результатов проведенного ПФЭ получена математическая модель, описывающая изменение глубины вдавливания стального цилиндрического индентора в гипсовую плиту в зависимости от площади его поперечного сечения, силы сжатия пружины разгонного устройства, значения температуры и времени нагрева материала в течение 1–15 мин. Проведенные расчеты глубины вдавливания индентора по полученной зависимости свидетельствуют, что наиболее точно экспериментальные результаты описываются при значении его поперечного сечения  $12,6 \text{ мм}^2$  и силе сжатия пружины разгонного устройства, равной 130 Н.

Для оценки термических поражений гипсовых плит, полученных в результате пожара, путем измерения изменения их динамической твердости в дальнейшем необходимо определение зависимости глубины вдавливания индентора от температурно-временного режима нагрева материала (скорости нарастания температуры, ее значения и времени воздействия), в том числе для различных типов гипсовых плит, а также в условиях их смачивания после термического воздействия.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чешко, И.Д. Технические основы расследования пожаров: метод. пособие / И.Д. Чешко. – М.: ВНИИПО, 2002. – 330 с.

2. 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 // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 1. – С. 13–22. – DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-1.13. – EDN: YZVGBF.
3. Таубкин, И.С. Определение температуры и длительности горения древесины на пожаре по параметрам обугленного слоя: методические рекомендации / И.С. Таубкин // Теория и практика судебной экспертизы. – 2017. – Т. 12, № 4. – С. 37–47. – DOI: 10.30764/1819-2785-2017-12-4-37-47. – EDN: YLXHSK.
4. Суриков, А.В. Перспективные методы оценки степени полученных в условиях пожара термических повреждений конструкций, выполненных с применением гипсовых плит / А.В. Суриков, Н.В. Зайнудинова, В.П. Бойко // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т. 6, № 4. – С. 400–414. – DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-4.400
5. Ngu, Chu Nguong. Calcination of gypsum plasterboard under fire exposure: fire engineering research report 04/6 may 2004 / Chu Nguong, Ngu; Department of Civil Engineering University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2004. – 127 p. – DOI: 10.26021/1689.
6. Mann, D.C. Studies of the Dehydration / Calcination of Gypsum Wallboard / D.C. Mann, N.D. Putaansuu // Proceeding of the 11th Conference and Exhibition «Fire and Materials 2009», San Francisco, California, USA, January 26–28, 2009. – UK, London: Interscience Communications Ltd, 2009. – Pp. 827–838.
7. Mealy, Ch.L. A Study of Calcination of Gypsum Wallboard / Ch.L. Mealy, D.T. Gottuk // Proceedings of the 5th International Symposium on Fire Investigation Science and Technology. – USA, Sarasota, 2012. – Pp. 427–438.
8. Ботян, С.С. Экспериментально-расчетная методика оценки теплофизических характеристик строительных материалов с использованием камерной электропечи для решения задач огнестойкости / С.С. Ботян [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 1. – С. 5–19. – DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.5. – EDN: BNQIRI.
9. Zehfub, J. Gypsum plasterboards under natural fire – Experimental investigations of thermal properties / J. Zehfub, L. Sander // Civil Engineering Design. – 2021. – Vol. 3, № 3. – P. 62–72. – DOI: 10.1002/cend.202100002.
10. Guide for Fire and Explosion Investigations: NFPA 921 / The Technical Committee on Fire Investigations. – Massachusetts, Quincy: National Fire Protection Association, 2017. – 426 p.

**Оценка возможности применения динамического индентирования гипсовых плит для установления степени полученных в условиях пожара термических поражений конструкций**

**Evaluation of the possibility of using dynamic indentation of gypsum boards to determine the degree of thermal damage to structures received under fire conditions**

**Суриков Андрей Валерьевич**

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра организации надзорной и профилактической деятельности, начальник кафедры

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь

Email: shurikoff@bk.ru

ORCID: 0000-0002-3659-7297

**Andrey V. Surikov**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Organization of Supervisory and Preventive Activities, Head of the Chair

Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus

Email: shurikoff@bk.ru

ORCID: 0000-0002-3659-7297

**Зайнудинова Наталья Владимировна**

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра промышленной безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь

Email: Zainudzinava@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1848-1562

**Natal'ya V. Zaynudinova**

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Industrial Safety, Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus

Email: Zainudzinava@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1848-1562

**Бойко Василий Павлович**

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра организации надзорной и профилактической деятельности, старший преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь

Email: pojarnik@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8032-2792

**Vasiliy P. Boyko**

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Organization of Supervisory and Preventive Activities, Senior Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus

Email: pojarnik@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8032-2792

**Гараев Юрий Владимирович**

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра организации надзорной и профилактической деятельности, начальник кабинета

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь

Email: y.garaev@icloud.com

ORCID: 0000-0002-4980-2712

**Yuriy V. Garaev**

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Organization of Supervisory and Preventive Activities, Office Manager

Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus

Email: y.garaev@icloud.com

ORCID: 0000-0002-4980-2712

## EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF USING DYNAMIC INDENTATION OF GYPSUM BOARDS TO DETERMINE THE DEGREE OF THERMAL DAMAGE TO STRUCTURES RECEIVED UNDER FIRE CONDITIONS

Surikov A.V., Zaynudinova N.V., Boyko V.P., Garaev Yu.V.

*Purpose.* To determine the applicability of dynamic indentation of gypsum boards to assess the degree of thermal damage to structures under fire conditions. To highlight the main characteristics of equipment for indentation of gypsum boards used as fire protection of building structures.

*Methods.* Laboratory studies of samples of gypsum boards in the chamber electric furnace under temperature exposure. Dynamic indentation. Full factorial experiment.

*Findings.* The possibility of using dynamic indentation of gypsum boards to assess the degree of thermal damage to structures made with their use. It is shown that to determine the change in dynamic hardness due to thermal damage to the specified material, the use of cylindrical indenters is more preferable than conical indenters. Based on the results of a full factorial experiment, the mathematical model was obtained that describes the change in the depth of indentation of a steel cylindrical indenter into a gypsum board depending on its cross-sectional area, the compression force of the spring of the accelerator, the temperature value and the heating time of the material. The technical characteristics of the equipment intended for the introduction of the indenter into the researched material by creating a shock pulse (the cross-sectional area of the cylindrical indenter 12.6 mm<sup>2</sup>; the compression force of the accelerating device spring 130 N) were determined.

*Application field of research.* The obtained research results can be applied in the development of technical means for determining the degree of thermal damage to structures made of gypsum boards obtained under fire conditions.

*Keywords:* inspection of the fire site, gypsum board, thermal damage, shock-pulse method, seat of fire.

(The date of submitting: February 24, 2023)

### REFERENCES

1. Cheshko I.D. *Tekhnicheskie osnovy rassledovaniya pozharov* [Technical basis of fire investigation]: methodical manual. Moscow: VNIPO EMERCOM of Russia, 2002. 330 p. (rus)
2. Volosach A. V., Gorovykh O. G. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy poverkhnostnoy tverdsti yacheistykh betonov, podvergshikhsya temperaturnomu vozdeystviyu, indentorami s uglami rastvora konusa 20–55° [Results of experimental researches of surface hardness of cellular concretes exposed to temperature by indentors having 20–55° angles of cone opening]. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No. 1. Pp. 13–22. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-1.13. EDN: YZVGBF.
3. Taubkin I.S., Opređenje temperatury i dlitel'nosti goreniya drevesiny na pozhare po parametram obuglennogo sloya: metodicheskie rekomendatsii [Determining the temperature and time of wood combustion from char layer parameters: methodological guidelines for fire investigators]. *Theory and Practice of Forensic Science*, 2017. Vol. 12, No. 4. Pp. 37–43. (rus). DOI: 10.30764/1819-2785-2017-12-4-37-47. EDN: YLXHSK.
4. Surikov A.V., Zaynudinova N.V., Boyko V.P. Perspektivnye metody otsenki stepeni poluchennykh v usloviyakh pozhara termicheskikh povrezhdeniy konstruktsiy, vpolnennykh s primeneniem gipsovykh plit [Promising methods for assessing the degree of thermal damage obtained under fire conditions made with the application of gypsum boards]. *Journal of Civil Protection*, 2022. Vol. 6, No. 4. Pp. 400–414. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-4.400. EDN: ZYWQWU.
5. Ngu, Chu Nguong. Calcination of gypsum plasterboard under fire exposure: fire engineering research report 04/6 May, 2004. Department of Civil Engineering of University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. 127 p. DOI: 10.26021/1689.
6. Mann D.C., Putaansuu N.D. Studies of the Dehydration / Calcination of Gypsum Wallboard. *Proc. 11th Conference and Exhibition «Fire and Materials 2009»*, San Francisco, California, USA, January 26–28, 2009. UK, London: Interscience Communications Ltd, 2009. Pp. 827–838.

7. Mealy Ch.L., Gottuk D.T. A Study of Calcination of Gypsum Wallboard. *Proc. 5th International Symposium on Fire Investigation Science and Technology*. USA, Sarasota, 2012. Pp. 427–438. Url: <https://www.nafi.org/blog/a-study-of-calcination-of-gypsum-wallboard/>.
8. Botyan S.S., Zhamoydik S.M., Kudryashov V.A., Nguen T.K. Eksperimental'no-raschetnaya metodika otsenki teplofizicheskikh kharakteristik stroitel'nykh materialov s ispol'zovaniem kamernoy elektropechi dlya resheniya zadach ognestoykosti [Experimental-computing technique of evaluating thermophysical properties of building materials with a muffle electric furnace for solving fire resistance problems]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 1. Pp. 5–19. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.5. EDN: BNQIRI.
9. Zehfub J., Sander L. Gypsum plasterboards under natural fire – Experimental investigations of thermal properties. *Civil Engineering Design*, 2021. Vol. 3, Iss 3. Pp. 62–72. DOI: 10.1002/cend.202100002.
10. Guide for Fire and Explosion Investigations: NFPA 921. The Technical Committee on Fire Investigations. Massachusetts, Quincy: National Fire Protection Association, 2017. 426 p.