

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Кандидат техн. наук, доцент **Адамия А. М.**,  
кандидат техн. наук, доцент **Кохреидзе М. В.**,  
доктор техн. наук, профессор **Лозовецкий В. В.**  
(МГТУ имени Н.Э. Баумана - Мытищинский филиал))

Кандидат техн. наук, доцент **Лебедев В.В.**  
(Российский технологический университет. МИРЭА)

## THE STUDY OF FIRE RESISTANCE OF THERMAL INSULATION MATERIALS FOR VEHICLES

Ph. D. (Tech.), Assistant Professor **Adamiya A.M.**,  
Ph. D. (Tech.), Assistant Professor **Kochreidze M.V.**,  
Doctor (Tech.), Professor **Lozovetsky V.V.**  
(Moscow state technical university named after N. Bauman, Mytishchi branch)

Ph. D. (Tech.), Assistant Professor **Lebedev V.V.**  
(Moscow technology university – MIREA)

*Теплоизоляционный материал, панель, поризованный арболит, структура, фрагмент, огневое воздействие, поле, температура.*

*Thermal insulation material, panel, porous arbolite, structure, fragment, fire effect, field, temperature.*

*Представлены результаты опытно-аналитических исследований фрагментов панелей, изготовленных из поризованного арболита, с улучшенными структурой и физико-механическими свойствами за счёт применения вспученного полистирольного гравия (ПАГ) с соответствующим размером пор. Описана экспериментальная установка, методика проведения опытов и используемая аппаратура. Опытные кривые прогрева фрагментов панелей показали, что процесс завершается в течение 2,5 и 3 час. 45 мин. Предложены схемы их разрушения после огневого воздействия. Получена аналитическая зависимость температуры в исследуемой панели от времени и расстояния от её нагреваемой поверхности применительно к условиям эксперимента. Результаты расчётов согласуются с экспериментальными данными, что позволяет использовать эту зависимость для расчёта поля температуры в более широком диапазоне, чем в эксперименте.*

*The results of experimental and analytical studies of fragments of panels made of porous arbolite with improved structure and PHY-Zico-mechanical properties due to the use of expanded polystyrene gravel (PAG) with the appropriate pore size are presented. The experimental setup, the technique of experiments and the equipment used are described. Experimental heating curves of the panel fragments showed that the process is completed within 2.5 and 3 hours. 45 minutes of the proposed scheme of their destruction after fire exposure. The analytical dependence of the temperature in the studied panel on the time and distance from its heated surface in relation to the experimental conditions is obtained. The results of the calculations are consistent with the experimental data, which makes it possible to use this dependence for the calculation of the temperature field in a wider range than in the experiment.*

Тепловая защита различных видов транспортных средств является важнейшей задачей, решение которой обеспечивает их надёжность и безопасность для персонала, пассажиров и окружающей среды.

В Мытищинском филиале МГТУ имени Н.Э. Баумана были проведены испытания на огнестойкость панелей, изготовленных из поризованного арболита с древесной дробленкой, содержащего вспученный полистирольный гравий (ПАГ). Испытания показали, что предел их огнестойкости по потере несущей огнеограждающей теплоизолирующей способности составляет не менее 2,5 часов.

С целью улучшения структуры и физико-механических свойств, в составе смеси объём древесной дробленки частично (до 35%) заменили лёгким менее водопоглощающим материалом – вспученным полистироль-

ным гравием с размером пор, соответствующим крупности пор бетона. Такая частичная замена дроблёнки полистирольным гравием позволила уменьшить влажность, снизить среднюю плотность и увеличить термическое сопротивление изделий при сохранении прочности на сжатие, что особенно важно для транспортных средств, т.к. позволяет при одинаковой мощности двигательной установки увеличить массу полезного груза.

Образцы панелей, предназначенные для испытания на огнестойкость, представляют собой половины одной теплозащитной панели размером 2580x1180x300 мм, разделённой в процессе изготовления с помощью деревянной рейки. Схема конструкции фрагмента панели и расположения термодатчиков по сечению образца представлена на рис. 1.

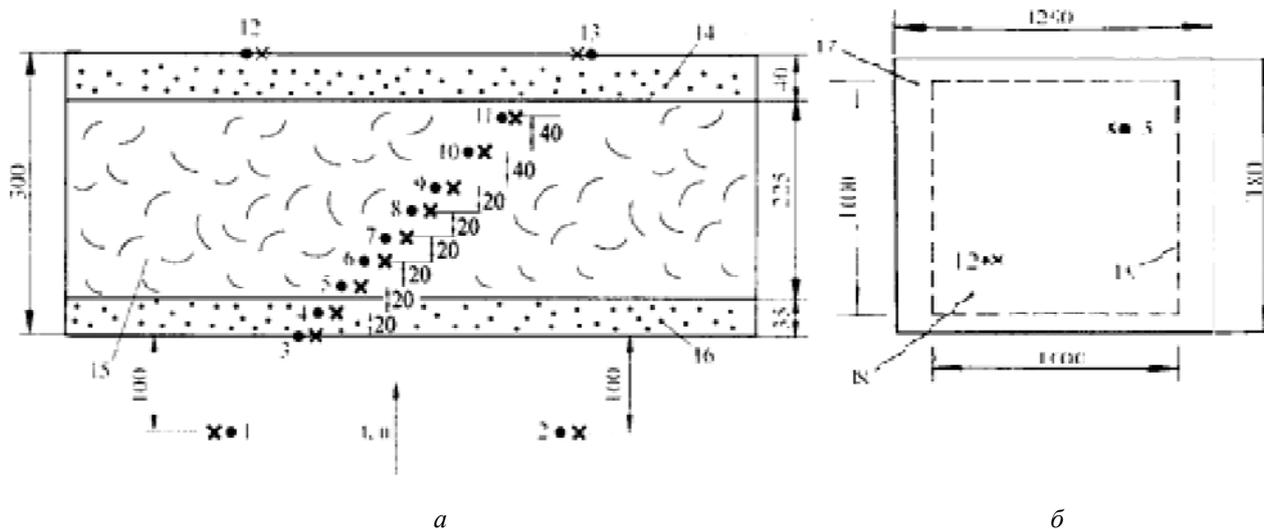


Рис. 1. Схемы расположения термопар по сечению образцов огнезащитных панелей из ПАГ на испытательной установке:  
*а* – 1, 2 – печные термопары; 12, 13 – на не обогреваемой поверхности; 14 – защитный бетонный слой на не обогреваемой поверхности; 15 – внутренний слой панели из ПАГ; 16 – защитный бетонный слой обогреваемой поверхности;  
*б* – 17 – зона размещения на установке панели; 18 – рабочий проём печи;  
 19 – граница обогреваемой поверхности панели

Ограждающие (фактурные) слои образца толщиной 30 и 35 мм выполнены из цементно-песчаного раствора марки М100. Внутренний слой образца толщиной 235 мм изготовлен из ПАГ прочностью на сжатие 3,4 МПа, средней плотностью в сухом состоянии  $600 \text{ кг/м}^3$ .

Для приготовления ПАГ применялись следующие материалы:

- древесная дроблёнка размером фракции до 20 мм;
- цемент быстротвердеющий (БТЦ) марки М500;
- полистирол марки ПСБ-25, средняя насыпная плотность  $28,0 \text{ кг/м}^3$ , размер фракции 0...10 мм;
- стекло натриевое жидкое; хлорид кальция; смола древесная омыленная (СДО);
- вода.

Поризованную арболитную смесь готовили в соответствии с требованиями СН549-82 и [6,7]. Панели формировались в металлических формах в горизонтальном положении по поточно-агрегатной технологии [8].

Отформованные конструкции предварительно выдерживали в помещении цеха при температуре  $+20^\circ \text{C}$  в течение 4 ч, после чего их подвергали тепловой обработке в ямных камерах по следующему режиму:

- подъём температуры до  $55^\circ \text{C}$  в течение 3 ч;
- выдержка при температуре  $55^\circ \text{C}$  в течение 10 ч;
- снижение температуры в камере с  $55^\circ \text{C}$  до  $20^\circ \text{C}$  в течение 3 ч.

Затем панели выгружали из камеры, выдерживали в цехе при температуре  $20^\circ \text{C}$  в течение 3 суток и производили их распалубку. До момента исследований на огнестойкость панели хранились в нормальных температурно-влажных условиях.

Для контроля прочности и средней плотности ПАГ одновременно с изготовлением опытных образцов формовали бетонные кубы размерами  $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$  для ограждающих слоёв и размерами  $150 \times 150 \times 150 \text{ мм}$  для арболита основного слоя. Прочность бетонов на

сжатие определяли по результатам испытаний данных кубов в соответствии с ГОСТ10180-2012 [9].

Данные физико-механических характеристик бетонов приведены в табл. 1.

Для предотвращения возможности взрывообразного разрушения защитного бетонного слоя образцы панелей высушивали в специальной камере в течение 5 суток при температуре воздуха в камере  $+65^\circ \text{C}$  [10].

В процессе огневого воздействия температуру нагрева бетона по сечению конструкции контролировали по показаниям термопар, которые регистрировали электронным самопишущим потенциометром типа ЭПП-09-М [11].

Для установки термопар в образцах применяли специальные каркасы из проволоки диаметром 3 мм. В процессе бетонирования эти каркасы с закреплёнными на них термопарами устанавливали на дно металлической опалубки и фиксировали.

В процессе испытаний опытный образец обогревался с одной стороны на специальной установке в соответствии с требованиями стандарта СЭВ 1000-2016 [5]. Боковые поверхности образца были изолированы от воздействия высоких температур минераловатными плитами. Температурный режим в камере печи выдерживался по «стандартной» кривой в соответствии с руководством по испытанию строительных конструкций на огнестойкость [11].

Контроль температуры в печи осуществлялся с помощью печных хромель-алюмелевых термопар, горячие спаи которых находились на расстоянии 100 мм от обогреваемой поверхности образца. Регистрация показаний печных термопар производилась на ленте электронного самопишущего потенциометра типа ЭПП-09-М. Кривые изменения температуры в огневой камере в процессе испытаний приведены на рис. 2.

**Конструктивные особенности и результаты испытаний на огнестойкость  
фрагмента огнезащитной панели из ПАГ**

Эскиз поперечного сечения фрагмента			
Фактические размеры образца, мм	h	300	
	h <sub>1</sub>	35	
	h <sub>2</sub>	30	
	b	1180	
		1290	
Панель	Необогреваемый защитный слой	Влажность, %	3,8
		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2020
	Обогреваемый защитный слой	Влажность, %	3,45
		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2020
	ПАГ	Влажность, %	5,8
		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	600
		, МПа	3,4
Продолжительность воздействия, час/мин	2/30		
Предел огнестойкости по признаку прогрева СТ СЭВ 1000-2016 п. 6.2, час	Не менее 2,5		
Предел огнестойкости по признаку целостности СТ СЭВ 1000-2016 п. 6.3, час	Не менее 2,5		
Толщина обугленного слоя, мм	95		
Скорость обугливания, мм/час	38		
Характер поведения образца во время огневого воздействия	Прогиб в сторону обогреваемой поверхности 0,5 см через 1 час 10 мин. Отслоение и обрушение части защитного слоя обогреваемой поверхности плиты 1 ч 55 мин. Обугливание поверхности арболита с образованием пустот.		

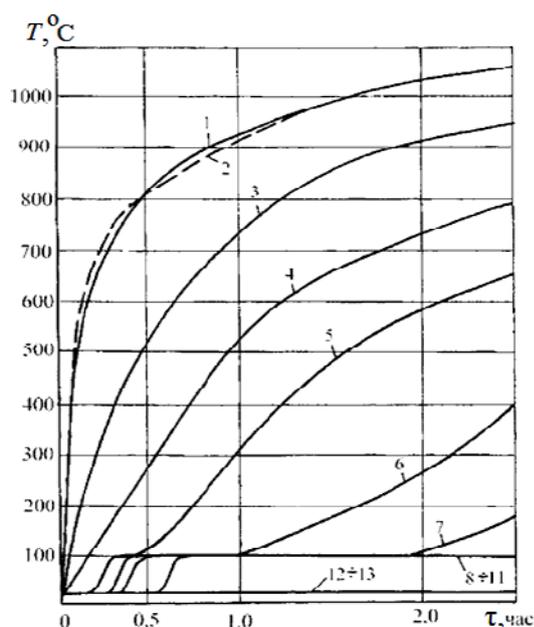


Рис. 2. Кривые прогрева фрагмента стеновой панели из ПАГ:

- 1 – кривая стандартного температурного режима пожара;
- 2 – температурный режим в огневой камере печи;
- 3 13 – показания термопар, расположенных в толще образца

Результаты, представленные на рис. 2, обработаны с использованием методов теории нестационарной теплопроводности [12, 13], согласно которой одним из решений одномерного дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности вида

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\chi} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0$$

является функция

$$\Phi(x, \tau) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{\chi \cdot \tau}}} e^{-u^2} \cdot du$$

известная как функция ошибок.

Зависимость температуры  $T$  в нагреваемой стенке от времени и расстояния от нагреваемой поверхности стенки применительно к условиям проведенного эксперимента может быть восстановлена с использованием данных измерений в следующем виде:

$$T(\tau, x) = \begin{cases} 20 + A_{11}(x) \cdot \left[ 1 + \Phi \left( \frac{x - e_{11}(x)}{\alpha_{11}(x) \cdot \tau^{1/2}} \right) \right] & \forall x \in [0; 35] \\ 20 + 100 \cdot \left[ 1 + \Phi \left( \frac{x - e_{21}(x)}{\alpha_{21}(x) \cdot \tau^{1/2}} \right) \right] + A_{22}(x) \cdot \left[ 1 + \Phi \left( \frac{x - e_{22}(x)}{\alpha_{22}(x) \cdot \tau^{1/2}} \right) \right] & \forall x \in (35; 260] \end{cases} \quad (1)$$

где  $\tau$  – время, с;  $x$  – координата, мм;

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-u^2} \cdot du \quad - \text{ функция ошибок;}$$

$A_{11}, A_{22}, e_{11}, e_{21}, e_{22}, \alpha_{11}, \alpha_{21}, \alpha_{22}$  – коэффициенты, зависящие от координаты  $\tau$  и результатов эксперимента.

Функции коэффициентов от координаты приближённо можно представить линейными регрессиями:

$$A_{11}(x) = 1238 + 3,25 \cdot x$$

$$A_{22}(x) = 1871 + 178,45 \cdot (x - 40)$$

$$e_{11}(x) = 24,95 + 0,0525 \cdot x$$

$$e_{21}(x) = 53,62 + 3,991 \cdot (x - 40)$$

$$e_{22}(x) = 48,425 + 1,3158 \cdot (x - 40)$$

$$\alpha_{11}(x) = 1,0725 - 0,0455 \cdot x$$

$$\alpha_{21}(x) = 2,345 + 0,435 \cdot (x - 40)$$

$$\alpha_{22}(x) = 0,1249 - 542,5 \cdot 10^{-6} \cdot (x - 40)$$

Предложенное решение хорошо соответствует эмпирическим данным, что наглядно подтверждается при сравнении с графиками, полученными по результатам эксперимента, и имеет прогностическое значение.

Графики зависимости (1) представлены на рис. 3. Номера представленных кривых соответствуют точкам, в которых размещались датчики измерения температуры и для которых были получены эмпирические зависимости. Средняя ошибка отклонений представленных зависимостей от экспериментальных данных не превышает 10... 20 °С.

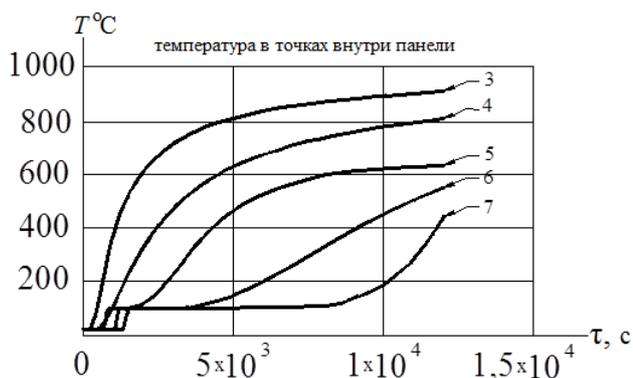


Рис. 3. Расчётная зависимость температуры  $T$  по сечению образца от времени  $\tau$

Анализ полученных данных и результаты их обработки свидетельствуют о том, что предел огнестойкости (в час) фрагментов панелей из ПАП во время непрерывного нагрева их по «стандартному» температурному режиму устанавливали только по двум признакам, изложенным в стандарте СЭВ 1000-2016 [5], а именно:

- потере теплоизолирующей способности образца (п. 6.2 стандарта);

- потере огнепреграждающей способности образца (п. 6.3 стандарта).

С момента начала опыта до 50 мин каких-либо значительных особенностей в поведении образцов не наблюдалось. Через 60... 65 мин от начала огневого воздействия у образца был отмечен небольшой 5...7 мм прогиб обогреваемой поверхности и появление на ней трещины, направленной от периферии к центру, длиной 250...300 мм. К этому времени температура на обогреваемой поверхности достигла 580 °С. Затем отслоение части защищённого слоя на 80-й мин и обрушение его на 115...117 мин огневого воздействия. Показания термомпар, расположенных на поверхности образца и в толще ПАГ, к моменту окончания опыта (через 2,5 ч) были следующие: №3 - 940°С, №4 - 790°С, №5 - 650°С, №6 - 390°С, №7 - 175°С. Термомпары, расположенные на глубине 100-120 мм от обогреваемой поверхности в толще арболита, где ещё не закончился процесс удаления влаги, показывали температуру 100°С (см. рис. 2).

Необходимо отметить, что в процессе огневого воздействия в образце происходило выплавление полистирола из объёма арболита в зоне нагрева с образованием пустот, макро- и микропор. После испытания образца через 2-е суток были сделаны замеры сохранившегося (не разрушенных и выгоревших слоёв) арболита и цементно-песчаного раствора. Как показал замер, средняя толщина обугленного слоя со стороны обгоревшей поверхности составила 95 мм (скорость обугливания 38 мм/час). Показания термомпар, расположенных на не обогреваемых поверхностях, на протяжении всего нагрева не поднимались выше 25...30 °С.

### Выводы

При воздействии огня по режиму «стандартного пожара» в течение 2 ч 30 мин на образец фрагмента панели из ПАП ни одно из двух предельных состояний (п. 6.2 и п. 6.3 СТ СЭВ 1000-2016) достигнуто не было, поэтому позволяет их использовать в качестве защитного материала в транспортных средствах различного назначения.

Сравнительный анализ результатов испытаний изолирующих панелей, проведённый во ВНИИПО [2], а также в результате данной работы позволяют сделать вывод, что по признакам теплоизолирующей и огнепреграждающей способности предел огнестойкости панели из ПАГ составит не менее 150 мин.

Область применения панелей определяется в соответствии с СП 112.13330-2012 «Пожарная безопасность зданий и сооружений» и действующими нормативными документами по согласованию с органами Госпожнадзора.

## Литература

1. Наназашвили И. Х. Арболит – эффективный строительный материал. - М.: Стройиздат. – 1984. – 125 с.
2. Огнестойкость несущих стеновых панелей из поризованного арболита / Шейнина Л. В., Ибатулин Ф. Л., Волнухин А. Ю., Колосов Г. Е. // Сб.тр. / ВНИИПО МВД СССР. - М.: – 1990. – с. 25 – 32.
3. Савин В. И., Адамия А. М., Широкова О. А. Влияние вспученного полистирола на свойства поризованной арболитной смеси и арболита // Сб. научн. тр. / Моек, лесотехн. ин - т. - М.: 1989. – Вып. 216. – с. 79 –86.
4. Адамия А. М. Оптимизация составов конструкционного арболита с заданными характеристиками по прочности и отпускной влажности. // Сборник научн. тр. / Моек, лесотехн. ин - т. - М.: 1990. – Вып. 231. – с. 29-33.
5. Стандарт СЭВ 1000-2016 (актуализированная редакция). Противопожарные нормы строительного проектирования. Метод испытания строительных конструкций на огнестойкость. - М.: Стандартинформ, 2016. – 11 с.
6. Рекомендации по расчёту и изготовлению изделий из поризованного арболита. - М.: НИИЖБ Госстроя СССР. 1983. – 62 с.
7. Рекомендации по повышению качества арболита и производительности предприятий, выпускающих изделия из этого материала / В. М. Бутерин, А. А. Гуревич, Н. В. Гренц и др. // Научн. тр. / Моск, лесотехн. ин - т.- М.: 1976. – Вып. 93. – с. 178-182.
8. Справочник по производству и применению арболита. / П. И. Крутов, И. Х. Наназашвили, Н. И. Склизов, В. И. Савин. - М.: Стройиздат, 1987. – 208 с.
9. ГОСТ 10180 - 2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: Стандартинформ, 2013. – 30 с.
10. Жуков В. В., Гуляев В. Д., Сорокин. Взрывоопасное разрушение бетона // Огнестойкость строительных конструкций. ВНИИПО. – М.: 1976. – Вып. 4. – С. 42 – 58.
11. Руководство по испытанию строительных конструкций на огнестойкость / ФБУ ВНИИПО МЧС России. – М.: 2012. – 51 с.
12. Г. Карслоу, Д. Егер. Теплопроводность твёрдых тел.// Пер. со 2-го англ. Изд. – М.: Наука, 1964. - 488 с.
13. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

## Сведения об авторах

**Адамия Анзор Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры промышленного транспорта и строительства МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал)  
E-mail: adamiya@mgul.ac.ru.

**Кохреидзе Мурман Васильевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, оборудования и безопасности производств МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал)  
E-mail: kohreidze-murman@mail.ru.

**Лозовецкий Вячеслав Владимирович** – доктор техн. наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов, оборудования и безопасности производств МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал)  
E-mail: lozovetsky@mail.ru.

**Лебедев Владимир Владимирович** – к.т.н., доцент кафедры защиты информации Российского технологического университета (МИРЭА)  
E-mail: voval matr@mai.ru.