РАЗРАБОТКА ОГНЕЗАЩИТНЫХ ГИПСОВЕРМИКУЛИТОБЕТОННЫХ КОМПОЗИТОВ И РАСЧЕТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОГНЕСТОЙКОСТИ ДВУХСЛОЙНЫХ АРМОЦЕМЕНТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

© Т. А. Хежев

КБГУ им. Х. М. Бербекова, г. Нальчик, Россия

Приведены результаты исследований составов гипсоизвестковоцементовермикулитотуфобетонных композитов. Расширение сырьевой базы, повышение прочности и огнезащитных свойств, а также снижение стоимости композита решается за счет использования в сырьевой смеси отходов пиления вулканического туфа.

Приведены результаты экспериментальных исследований огнестойкости двухслойных армоцементных элементов. Разработан алгоритм теплотехнического расчета предела огнестойкости многослойных строительных конструкций, обеспечивающий приемлемое совпадение расчетных значений с экспериментальными данными. Разработано программное обеспечение теплотехнического расчета предела огнестойкости армоцементных конструкций с огнезащитным слоем из гипсовермикулитобетона, получены выражения для коэффициентов теплопроводности и теплоемкости разработанных композитов.

Ключевые слова: огнестойкость, способы огнезащиты, гипсовермикулитотуфобетонные композиты, коэффициенты теплопроводности и теплоемкости гипсобетонов, численный метод расчета огнестойкости.

За последнее десятилетие отмечается рост количества пожаров. С января по сентябрь 2012 года в РФ произошло 115713 пожаров, при которых погибли 7709 человек и получили травмы 9038 человек. Прямой материальный ущерб от пожаров составил 1045712000 рублей.

Обрушение строительных конструкций является главной причиной гибели людей и ущерба от пожаров. Существующие на данный момент способы огнезащиты строительных конструкций можно разделить на несколько типов (табл. 1).

К числу наиболее эффективных средств огнезащиты строительных конструкций следует отнести плиты и огнезащитные штукатурки на основе вспученного вермикулита, наиболее термостойкого из легких заполнителей, и минеральных вяжущих (гипс, портландцемент) [1, 2]. Составы на гипсе широко применяются для внутренней отделки помещений, выполняющие одновременно и огнезащитные

функции. Благодаря высокой температуре плавления (1380 °С) и низкому коэффициенту теплопроводности (0,04-0,06 Вт/(м·К), вспученный вермикулит нашел широкое применение в жаростойких бетонах и для специальной теплоизоляции.

С применением гипса с заполнителями из перлита и вермикулита производят огнезащитные штукатурки с плотностью от 300 кг/м³, теплопроводностью от 0,08-0,09 Вт/(м·К), обеспечивающие предел огнестойкости строительным конструкциям до 3 часов. Из-за невысокой влагостойкости гипсовые штукатурки применяются только внутри помещений с относительной влажностью воздуха не более 70%.

Эффективность применения туфового песка (отходов пиления вулканического туфа) в качестве заполнителя теплоогнезащитного раствора и бетона обусловлена высокой огнеупорностью 1200-1280 °С, пористостью, кроме того, пылевидные фракции отходов пиления туфа являются активной гидравлической до-

Таблица 1 – Способы огнезащиты строительных конструкций

Название способа	Преимущества	Недостатки
Бетонирование, оштукатуривание, обкладка кирпичом	Относительно низкая стоимость материалов	Большая масса. Необходимость применения стальной сетки или анкеров. Большая трудоемкость работ. Сложность восстановления и ремонта
Установка облицовок или экранов из плитных или листовых материалов	Повышенная вибростойкость и долговечность за счет механического крепления к конструкциям. Возможность демонтажа и ремонтпригодность. Высокая производительность работ при установке огнезащиты. Хорошие защитно-декоративные качества	Большие толщины огнезащитных материалов (в случае волокнистых материалов). Высокий уровень паропроницаемости. Перерасход материала при низком уровне требуемых пределов огнестойкости.
Нанесение методами набрызга или полусухого торкретирования составов на минеральном вяжущем	Относительно низкая трудоемкость. Возможность эксплуатации в атмосферных условиях (для составов на основе портландцемента)	Низкая вибростойкость и долговечность покрытия при больших толщинах слоев. Большая продолжительность нанесения и невозможность проведения других работ. Сложность восстановления и ремонта. Трудность обеспечения и контроля заданных толщин покрытия
Нанесение напылением вспучивающихся покрытий	Относительно низкая трудоемкость. Малая толщина покрытия	Низкий уровень достигаемых пределов огнестойкости (до 45-60 мин). Трудность обеспечения и контроля заданных толщин

бавкой, снижающей расход вяжущего. Кроме того, известно, что относительная линейная деформация цементного камня с добавкой тонкомолотого пепла в соотношении 60:40 при нагревании до 800-900 °С снижается почти в два раза, уменьшается также температурный коэффициент расширения цементного камня на 50% [3].

Исходя из результатов ранее проведенных экспериментов, в дальнейших исследованиях для разработки огнезащитных вермикулитобетонов в качестве заполнителей применялись отходы пиления вулканического туфа фракции 0-0,14 мм, вспученный вермикулит фракции 0,16-5 мм с насыпной плотностью 150 кг/м³.

Приготовление гипсовермикулитотуфобетонной смеси осуществляли в смесителе

принудительного действия, в который после подачи воды с добавкой СДО последовательно загружали смесь гипса, извести и туфового песка, затем – вспученного вермикулита или предварительно перемешанную всухую смесь гипса, негашеной извести, туфового песка и вспученного вермикулита. Перемешивание всех компонентов продолжали до получения однородной огнезащитной сырьевой смеси. Продолжительность перемешивания смеси составляла 1,5-2 мин. Образцы-балочки размером 4х4х16 см из гипсовермикулитотуфобетонных составов формовались литьевым способом.

Ранее проведенные исследования показали, что для огнезащиты строительных конструкций эффективны вермикулитобетоны со средней плотностью 500-800 кг/м³ составов

Таблица 2 – Соотношение компонентов в смеси и основные физико-механические свойства гипсоизвесткововермикулитотуфобетонного композита

№№ составов	Соотношение компонентов в смеси, мас. %				Количество СДО в % от массы вяжущего	Вода / вяжущее	Средняя плотность ρ , кг/м ³	Предел прочности, МПа	
	гипс	известь	туфовый песок	вермикулит				на сжатие	на изгиб
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	41,3	13,7	15,2	29,8	–	1,25	760	1,55	1,1
2	41,3	13,7	15,2	29,8	0,05	1,2	750	1,55	1,1
3	41,3	13,7	15,2	29,8	0,1	1,15	740	1,6	1,05
4	41,3	13,7	15,2	29,8	0,15	1,1	725	1,65	1,1
5	41,3	13,7	15,2	29,8	0,2	1,1	720	1,65	1,1
6	41,3	13,7	15,2	29,8	0,25	1,08	715	1,6	1,05
7	41,3	13,7	15,2	29,8	0,3	1,08	715	1,60	1,05
8	35,8	11,9	13,2	39,1	–	1,55	570	0,75	0,55
9	35,8	11,9	13,2	39,1	0,05	1,5	570	0,75	0,55
10	35,8	11,9	13,2	39,1	0,1	1,45	560	0,8	0,55
11	35,8	11,9	13,2	39,1	0,15	1,35	540	0,85	0,6
12	35,8	11,9	13,2	39,1	0,2	1,3	540	0,85	0,6
13	35,8	11,9	13,2	39,1	0,25	1,25	535	0,85	0,55
14	35,8	11,9	13,2	39,1	0,3	1,25	535	0,8	0,55

(вяжущее: вермикулит) 1:2, 1:3 и 1:4 по объему [4]. Дальнейшее уменьшение средней плотности не приводит к повышению огнезащитных свойств и не достигается требуемая прочность вермикулитобетона.

Нами разработаны эффективные огнезащитные гипсобетонные композиты с применением следующих материалов: гипс полуводный; известь воздушная кальциевая; вспученный вермикулит; отходы пиления вулканического туфа Заюковского месторождения; поверхностно-активная воздухововлекающая добавка СДО (табл. 2).

Из табл. 2 следует, что предлагаемые составы при одинаковой плотности и прочности на сжатие и изгиб огнезащитных бетонов позволяют существенно сократить расход гипса. Использование негашеной извести в качестве возбудителя скрытой гидравлической активности туфового песка позволяет уменьшить

расход гипса на 26,3-30,6% без снижения прочности огнезащитного бетона. Кроме того, замедляются сроки схватывания и повышается коэффициент водостойкости гипсобетонных композитов. Эксперименты показали, что при содержании поверхностно-активной добавки СДО 0,15-0,2% от массы вяжущего расход воды для смеси существенно уменьшается, средняя плотность бетонного композита снижается на 30-40 кг/м³. Прочностные характеристики гипсоизвесткововермикулитотуфобетона с добавкой и без нее на 28-е сутки остаются практически неизменными.

Исследования огнезащитных свойств гипсобетонных композитов проводили испытанием на огнестойкость образцов размерами 190×190 мм на электрической печи в горизонтальном положении по температурному режиму «стандартного» пожара, регламентированному ГОСТ 30247.1-94. Предел огнестойкости

Рис. 1. Экспериментальные кривые изменения температуры на необогреваемой поверхности (а) и на уровне тканой сетки (б) двухслойных армоцементных образцов:

- 1, 3 – гипсовермикулитобетонные композиты со средней плотностью 750 кг/м^3 и 560 кг/м^3 соответственно толщиной слоя 15 мм; 1*, 3* – то же толщиной 25 мм;
2, 4 – гипсоизвесткововермикулитотуфобетонные композиты со средней плотностью 720 кг/м^3 и 540 кг/м^3 соответственно толщиной слоя 15 мм; 2*, 4* – то же толщиной 25 мм

по несущей способности (R) армоцементных плит оценивали по прогреву тканой сетки в конструктивном слое (на границе слоев) до 300°C . Влажности мелкозернистого бетона армоцементного слоя и огнезащитного состава к моменту испытаний составляли соответственно 3-4% и 8-10%. Во время огневых испытаний двухслойных элементов нарушений их целостности не обнаружено.

Результаты испытаний на огнестойкость армоцементных плит с огнезащитным слоем представлены на рис. 1.

Из рис. 1 следует, что разработанные гипсоизвесткововермикулитотуфобетонные композиты обеспечивают более высокие пределы огнестойкости армоцементных плит по сравнению с гипсовермикулитобетонными. Это объясняется образованием гидросиликатов тоберморитовой группы, железистого волластонита и аллофана, обладающих более высокими жаростойкими свойствами по сравнению с двуводным гипсом. Кроме того, добавка СДО дополнительно поризует гипсоизвесткововермикулитотуфобетонный композит, что способствует повышению огнезащитных свойств. Наиболее высокими огнезащитными свойствами обладают составы со средней плотностью 540 кг/м^3 .

Изучение огнестойкости строительных конструкций испытаниями по «стандартному» температурному режиму представляет собой трудоемкую задачу, для решения которой требуется дорогостоящее оборудование. В этой связи большое значение имеют расчетные методы определения пределов огнестойкости конструкций.

Для расчета огнестойкости строительных конструкций в нашей стране разработаны численные и аналитические методы. Наибольшее предпочтение отдается численным методам ввиду их несложной реализации с помощью современной вычислительной техники. Большой вклад в развитие этих методов внесли А. Ф. Милованов, И. Г. Романенков, А. И. Яковлев, Х. П. Культербаев, Т. А. Хежев и др. [4, 5]. Начинают развиваться методы расчета температурных полей в условиях пожара с использованием теории возмущения по малому параметру.

Нами разработан алгоритм теплотехнического расчета предела огнестойкости многослойных строительных конструкций, обеспечивающий приемлемое совпадение расчетных значений с экспериментальными данными. Алгоритм расчета предела огнестойкости строительных конструкций с огнезащитным слоем

сводится к решению теплофизической задачи. Распределение температуры $t(x, \tau)$ по толщине многослойной конструкции описывается уравнением Фурье:

$$\rho(x) c(t, x) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(t, x) \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$(x, \tau) \in Q \equiv \{(x, \tau) : x \in (0, l) \quad \tau \in (0, T)\},$$

где x, τ – координаты в пространстве и времени; $c(t, x), \lambda(t, x), \rho(x)$ – удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и плотность материала; l – толщина конструкции; T – некоторое конечное значение времени. Неоднослойность конструкции обуславливает зависимость c и λ от пространственной координаты x , кроме того, они являются еще функциями времени косвенно через $t(x, \tau)$. Плотность вермикулитобетона принимается неизменной, так как во время пожара существенно не изменится. Из-за многослойности конструкции плотность материала зависит от пространственной координаты.

Для решения вышеприведенной задачи в работе использованы численные методы, нашедшие применение в различных областях науки и техники [6, 7].

Для решения теплофизической задачи огнестойкости двухслойной строительной конструкции из огнезащитного и армоцементного слоев к уравнению (1) присоединяются начальные и граничные условия. Начальные условия заданы формулой:

$$t(x, 0) = \varphi(x) \quad x \in [0, l] \quad (2)$$

где $\varphi(x)$ – функция распределения температуры по толщине конструкции. Через наружные поверхности конструкции осуществляется теплообмен с окружающими средами, температуры которых: $T_{\text{п}}(t)$ – температура пожара, $T_c(t)$ – температура наружного воздуха, известны. Тогда граничные условия примут вид [8]:

$$\lambda_b(t) \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_b(t) [t(0, \tau) - T_{\text{п}}(\tau)], \quad \tau > 0, \quad (3)$$

$$-\lambda_a(t) \frac{\partial t(l, \tau)}{\partial x} = \alpha_a(t) [t(l, \tau) - T_c(\tau)], \quad \tau > 0. \quad (4)$$

Здесь $\lambda_b(t) = \lambda(t, 0), \lambda_a(t) = \lambda(t, l)$ – коэффициенты теплопроводности вермикулитобетона и армоцемента соответственно; α_b – коэффициент теплопередачи от нагреваемой среды (огневой камеры) к поверхности конструкции (вермикулитобетонному слою); α_a – коэффициент теплопередачи от необогреваемой поверхности (армоцементного слоя) в окружающую среду. В такой модели $T_c(\tau)$ и $\varphi(x)$, как правило, в практических расчетах оказываются постоянными величинами.

Уравнение (1), начальные и граничные условия (2) – (4) образуют задачу о распределении температуры по толщине конструкции. Коэффициенты, входящие в уравнение и дополнительные условия, определяются по известным формулам для двухслойной конструкции [5, 9]:

$$\lambda_b(t) = \lambda_1 + k_1 t, \quad c_b(t) = c_1 + k_2 t, \quad \lambda_a(t) = \lambda_2 + k_3 t, \quad c_a(t) = c_2 + k_4 t, \quad (5)$$

$$\alpha_b(t) = 29 + \frac{5,77 \varepsilon_b}{t(0, \tau) - T_{\text{п}}} \left[\left(\frac{T_{\text{п}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t(0, \tau) + 273}{100} \right)^4 \right],$$

$$\alpha_a = 1,5 \sqrt{t(l, \tau) - T_c} + \frac{5,77 \varepsilon_a}{t(l, \tau) - T_c} \left[\left(\frac{t(l, \tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 \right],$$

где $\lambda_1, \lambda_2, c_1, c_2$ – начальные характеристики коэффициентов теплопроводности и теплоемкости соответственно вермикулитобетона и армоцемента; k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты, численные

Рис. 2. Зависимость предела огнестойкости двухслойных армоцементных элементов по признаку потери теплоизолирующей способности (а) и потери несущей способности (б) от толщины и состава гипсобетонного слоя (1, 2, 3, 4 – смотри рис. 1)

Рис. 3. Зависимость предела огнестойкости гипсобетонных плит по признаку потери теплоизолирующей способности от толщины и состава гипсобетона (1, 2, 3, 4 – смотри рис. 1)

значения которых определяются из критерия удовлетворительного совпадения экспериментальных и расчетных кривых прогрева плит; ε_b , ε_a – степени черноты соответственно вермикулитобетона и армоцемента.

Вследствие зависимости удельных теплоемкостей и коэффициентов теплопроводности от температуры уравнение (1) и граничные условия (3) – (4) являются нелинейными. Поэтому для решения задачи (1) – (4) применяют численные методы. В работе использована конечноразностная неявная двухслойная схема вычислений в сочетании с методом прогонки и итерации. При этом производные, входящие в уравнение теплопроводности и граничные условия, заменяются известными разностными соотношениями.

Затем решается система алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей коэффициентов на каждом верхнем слое по времени. Нелинейность алгебраических уравнений преодолевается с помощью метода итерации и прогонки [10].

Нами разработано программное обеспечение теплотехнического расчета предела огнестойкости армоцементных конструкций с огнезащитным слоем из гипсовермикулитобетона. С использованием ПЭВМ проведены вычисления с погрешностью равной 0,001 и определены коэффициенты k_1 , k_2 , k_3 , k_4 формул (5), обеспечивающих приемлемое совпадение теоретических и экспериментальных кривых, в результате которых получены выражения для коэффициентов теплопроводности и теплоемкости:

армоцемент –

$$\lambda_a(t) = 0,83 - 0,0004t, \quad c_a(t) = 770 + 0,8t;$$

гипсовермикулитобетонный композит плотностью 750 кг/м³ –

$$\lambda_o(t) = 0,12 + 0,00012t, \quad c_o(t) = 748 + 0,63t;$$

гипсоизвесткововермикулитотуфобетонный композит плотностью 720 кг/м³ –

$$\lambda_o(t) = 0,115 + 0,0001t, \quad c_o(t) = 748 + 0,63t;$$

гипсовермикулитобетонный композит плотностью 560 кг/м³ –

$$\lambda_o(t) = 0,102 + 0,00007t, \quad c_o(t) = 748 + 0,63t;$$

гипсоизвесткововермикулитотуфобетонный композит плотностью 540 кг/м³ –

$$\lambda_o(t) = 0,098 + 0,00064t, \quad c_o(t) = 748 + 0,63t.$$

Зависимость предела огнестойкости армоцементных конструкций от толщины и состава гипсобетонного слоя, полученная расчетным методом с использованием алгоритма и программного обеспечения теплотехнического расчета предела огнестойкости многослойных строительных конструкций, приведена на рис. 2.

Расчетная зависимость предела огнестойкости гипсобетонных плит по признаку потери теплоизолирующей способности от толщины и

состава вермикулитобетона показана на рис. 3.

Таким образом, применение разработанных огнезащитных гипсоизвесткововермикулитотуфобетонных композитов позволяет существенно сократить расход гипса при одновременном повышении их огнезащитных свойств. Используя полученные выражения для коэффициентов теплопроводности и теплоемкости гипсобетонов, можно рассчитывать огнестойкость двухслойных конструкций численными методами с применением разработанного программного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахтямов Р. Я. «Вермивол» – новое огнезащитное покрытие на основе вспученного вермикулита // Строительные материалы. 2002. №6. С. 6-7.
2. Дубенецкий К. Н., Пожнин А. П. Вермикулит. Л.: Стройиздат, 1971. 175 с.
3. Мириев И. М., Дубашинский Л. Б., Гусейнова Л. Г. Влияние микронаполнителей из местных материалов на прочностные и жароупорные свойства цементного камня // Жаростойкие бетон и железобетон в строительстве. М.: Стройиздат, 1966. С. 110-115.
4. Хежев Т. А. Технология армоцементных конструкций высокой огнестойкости с теплозащитным слоем из эффективного легкого бетона: дисс... 05.23.05, д. т. н. Ростов-на-Дону, 2007. 304 с.
5. Яковлев А. И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1888. 142 с.
6. Калиткин Н. Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
7. Самарский А. А., Гулин А. В. Устойчивость разностных схем. М.: Наука, 1973. 416 с.
8. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1971. 736 с.
9. Романенков И. Г., Зигерн-Корн В. Н. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов. М.: Стройиздат, 1984. 240 с.
10. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971. 552 с.

DEVELOPMENT OF FIRE-PROTECTIVE PLASTER SURFACES COMPOSITES AND DESIGN METHOD FOR DETERMINING THE FIRE RESISTANCE OF TWO-LAYER ARMOCEMENT ELEMENTS

© T. A. Khezhev

KBSU named after H. M. Berbekov, Nalchik, Russia

The results of studies of gypsum-limestone cement-vermiculite and concrete composites are given. Expanded resource base, increased strength and flame retardant properties, as well as reduced cost of the composite. using volcanic tuff in the raw mix.

The results of experimental studies of the fire resistance of two-layer cement-containing elements are given. An algorithm for heat engineering calculation of the fire resistance limit of multi-layer building structures has been developed, which ensures acceptable agreement between the calculated values and experimental data. The software for the heat engineering calculation of the fire resistance limit of cement-cement constructions with a fireproof layer made of gypsum vermiculite concrete has been developed, expressions for the thermal conductivity and heat capacity of the developed composites have been obtained.

Key words: fire resistance, fire protection methods, gypsum vermiculite phobic-ton composites, heat conductivity and heat capacity coefficients of gypsum concrete, numerical method for calculating fire resistance.

REFERENCES

1. Akhtyamov, R. Ya. (2002) '«Vermivol» – novoe ognезashchitnoe pokrytie na osnove vspuchennogo vermikulita' // Stroitel'nye materialy. ["Vermivol" – a new fire-retardant coating based on expanded vermiculite // *Construction materials*]. №6. Pp. 6-7.
2. Dubenetskii, K. N. and Pozhnin, A. P. (1971) Vermikulit. L.: Stroiizdat. 175 p.
3. Miriev, I. M., Dubashinskii, L. B. and Guseinova, L. G. (1966) Vliyanie mikronapolnitelei iz mestnykh materialov na prochnostnye i zharoupornye svoistva tsementnogo kamnya // Zharo-stoikie beton i zhelezobeton v stroitel'stve. [The effect of microfillers from local materials on the strength and heat-resistant properties of cement stone // *Heat-resistant concrete and reinforced concrete in construction*]. M.: Stroiizdat. Pp. 110-115.
4. Khezhev, T. A. (2007) Tekhnologiya armotsementnykh konstrukttsii vysokoi ognestoikosti s teplo-zashchitnym sloem iz effektivnogo legkogo betona: diss...05.23.05 d. t. n. [Technology of high-fire resistance cement-cement structures with a heat-protective layer of effective lightweight concrete: the dissert. doctor of technical sciences]. Rostov-on-Don. 304 p.
5. Yakovlev, A. I. (1988) Stroiizdat. Raschet ognestoikosti stroitel'nykh konstrukttsii. [Calculation of fire resistance of building structures]. Moscow. 142 p.
6. Kalitkin, N. N. (1978) Chislennyye metody. [Numerical methods]. Science. M. 512 p.
7. Samarskii A. A. and Gulin, A. V. (1973) Ustoichivost' raznostnykh skhem. [Stability of difference schemes]. Science. M. 416 p.
8. Tikhonov, A. N., Samarskii A. A. (1971) Uravneniya matematicheskoi fiziki. [Equations of mathematical physics]. Science. M. 736 p.
9. Romanenkov, I. G. and Zigern-Korn, V. N. (1984) Ognestoikost' stroitel'nykh konstrukttsii iz ef-fektivnykh materialov. [Fire resistance of building structures from effective materials]. Stroyizdat. M. 240 p.
10. Samarskii, A. A. (1971) Vvedenie v teoriyu raznostnykh skhem. [Introduction to the theory of difference schemes]. Science. M. 552 p.