

УДК 621.314.632.032.42

## ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ ИЗВЕСТНЯКА РЕЧНОГО НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

<sup>1</sup>Коротаев С.А., <sup>2</sup>Калашников В.И., <sup>3</sup>Ерофеева И.В., <sup>1</sup>Емельянов Д.В.,  
<sup>3</sup>Пастушков П.П., <sup>4</sup>Павленко Н.В., <sup>1</sup>Панфилов С.А., <sup>1</sup>Фомин Ю.А.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва (национальный исследовательский университет)», Саранск, e-mail: dep-general@adm.mrsu.ru;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Пенза, e-mail: office@pguas.ru;

<sup>3</sup>ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики» Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), Москва, e-mail: niisf@niisf.ru;

<sup>4</sup>Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, e-mail: common@imec.msu.ru

Наполнители различной природы и зернового состава позволяют целенаправленно регулировать структуру и свойства цементного камня бетона. В статье представлены результаты исследования влияния зернового состава наполнителя из известняка речного на теплопроводность цементных композитов. Зерновой состав наполнителя изменяли путём смешивания в заданных соотношениях трех фракций узкого зернового состава с размером зерен 0,63–0,315, 0,315–0,16 и менее 0,16 мм. При постановке опытов был реализован симплекс-решетчатый план эксперимента для системы трех фракций наполнителя. Теплопроводность образцов вычисляли по формуле, устанавливающей зависимость теплопроводности от теплоемкости, температуропроводности и плотности образца. Теплоемкость, температуропроводность и плотность образцов определяли экспериментально. Полученные результаты исследования показали, что для исследованной области варьирования зернового состава наполнителя теплопроводность наполненных цементных композитов изменяется в пределах от 0,19 до 0,31 Вт/(м·К).

**Ключевые слова:** наполнитель, известняк речной, зерновой состав, цементный композит, calorimetрия, теплопроводность

## INFLUENCE OF FILLER ON THE LIMESTONE FLUVIAL ON THERMAL CONDUCTIVITY OF CEMENT COMPOSITES

<sup>1</sup>Korotaev S.A., <sup>2</sup>Kalashnikov V.I., <sup>3</sup>Erofeeva I.V., <sup>1</sup>Emelyanov D.V.,  
<sup>3</sup>Pastushkov P.P., <sup>4</sup>Pavlenko N.V., <sup>1</sup>Panfilov S.A., <sup>1</sup>Fomin Y.A.

<sup>1</sup>Federal State Educational Institution of Higher Education Mordovia State University named after N.P. Ogarev (National Research University), Saransk, e-mail: dep-general@adm.mrsu.ru;

<sup>2</sup>Federal State Educational Institution of Higher Education Penza State University of Architecture and Construction, Penza, e-mail: office@pguas.ru;

<sup>3</sup>Federal State Institution Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, e-mail: niisf@niisf.ru;

<sup>4</sup>Research Institute of Mechanics, Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Moscow, e-mail: common@imec.msu.ru

Fillers of different nature and composition of the grain allows purposefully to adjust the structure and properties of the cement matrix of concrete. The article presents the results of research influence of grain composition of aggregate limestone river on the thermal conductivity of cement composites. Grain composition was varied by mixing filler at a predetermined ratio of three fractions narrow grain structure with a grain size 0,63–0,315, 0,315–0,16 and less than 0,16 mm. In setting up the experiments was carried simplex slatted plan of the experiment for a three fractions of filler. The thermal conductivity of the sample is calculated according to the formula, which establishes the dependence of the thermal conductivity of the heat capacity, thermal diffusivity and density of the sample. Heat capacity, thermal diffusivity and density of the samples was determined experimentally. These results showed that the study area varying grain composition of the thermal conductivity of the filler-filled cement composites varies from 0,19 to 0,31 W/(m·K).

**Keywords:** a filler, limestone fluvial, grain composition, cementitious composite, calorimetry, thermal conductivity

Для улучшения физико-механических и эксплуатационных свойств бетонов используются различные методы. Одним из таких методов является применение наполнителей. Наполнители различной природы и зернового состава позволяют целенаправ-

ленно регулировать структуру и свойства цементного камня бетона [2, 3, 4, 5, 6, 7, 10].

**Цель исследования** – изучение влияния зернового состава наполнителя из известняка речного на теплопроводность цементных композитов.

Таблица 1

Химический состав известняка речного

Наполнитель	п.п.п	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	W
Известняк речной	43,77	0,29	0,09	0,09	51,50	4,52	0,18	0	0,04	0,007	0,65

**Материалы и методы исследования**

В качестве наполнителя для получения опытных образцов цементных композитов использовался известняк речной, химический состав которого приведен в табл. 1.

Зерновой состав наполнителя варьировался путем смешивания трех фракций с размером зерен 0,63–0,315, 0,315–0,16 и менее 0,16 мм.

Методика для определения теплопроводности опытных образцов основывалась на использовании выражения

$$\lambda = a \cdot C_p \cdot \rho,$$

где  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;  $C_p$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг К);  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

На стадии подготовки к экспериментам по определению теплопроводности определялись геометрические размеры и масса образцов. В каждом образце закреплялась калиброванная термопара «медь-константан» для регистрации температуры с помощью аналого-цифрового преобразователя с записью данных в файл.

Плотность материала образцов определялась по формуле

$$\rho = \frac{m}{V},$$

где  $m$  – масса образца, кг;  $V$  – объем образца, м<sup>3</sup>.

Определение удельной теплоемкости  $C_p$  осуществлялось калориметрическим способом исходя из уравнения теплового баланса. Для получения экспериментальных данных исследуемый образец с закрепленной термопарой нагревали до 100 °С, после чего помещали в мерную емкость, заполненную жидкостью с фиксированной начальной температурой.

В экспериментах регистрировали две временные зависимости: динамику нагрева жидкости в мерной емкости (изменение температуры жидкости) и температуру образца (значение показаний термопары). Для снижения потерь, связанных с теплоотдачей в окружающую среду, мерная емкость экранировалась алюминиевой фольгой.

Уравнение теплового баланса для данной системы (мерная емкость с жидкостью и образец строительного материала) имеет вид

$$C_{p1} \cdot m_1 (t_k - \theta) = (C_{p2} \cdot m_2 + C_{p3} \cdot m_3) \Delta t,$$

где  $C_{p1}$  – определяемая удельная теплоемкость образца;  $m_1$  – масса образца;  $C_{p2}$  – теплоемкость мерной емкости (справочные данные);  $m_2$  – масса мерной емкости;  $C_{p3}$  – теплоемкость жидкости в емкости (справочные данные);  $m_3$  – масса жидкости в мерной емкости;  $\Delta t$  – перепад температуры в емкости после помещения в нее образца, нагретого предварительно до 100 °С;  $\theta = t + \Delta t$  – конечная температура образца и жидкости;  $t$  – температура жидкости в емкости до

погружения образца;  $t_k$  – температура образца до погружения в охлаждающую жидкость.

Температуропроводность определялась согласно [9, 8] с использованием выражения

$$a = K \cdot m,$$

где  $K$  – коэффициент формы при регулярном режиме охлаждения;  $m$  – темп охлаждения, 1/с.

Для образца в форме параллелепипеда со сторонами  $l_1, l_2, l_3$  величина коэффициента формы согласно [9, 8] может быть определена аналитически исходя из зависимости

$$K = \frac{1}{\left(\frac{\pi}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l_2}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l_3}\right)^2}.$$

Темп охлаждения для регулярного режима согласно [9] определялся из зависимости

$$m = \frac{\ln(t_1 + t_0) - \ln(t_2 + t_0)}{(\tau_2 - \tau_1)},$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – температура в данной точке образца в момент времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ ;  $t_0$  – температура охлаждающей среды, в качестве которой использовалось трансформаторное масло (возможной альтернативой является кремнийорганическая жидкость).

Вид теоретической кривой временной зависимости охлаждения образца, используемой для определения темпа охлаждения исследуемого образца, приведен на рис. 1.

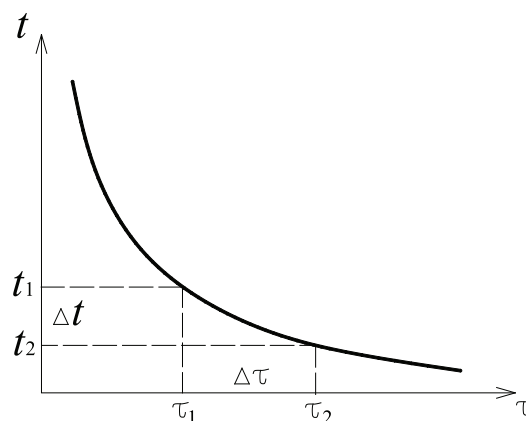


Рис. 1. Вид теоретической кривой временной зависимости охлаждения образца

Изучение влияния зернового состава наполнителя из известняка речного при возможно более полном заполнении им объема материала цементных композитов на их теплопроводность проводили методом математического планирования эксперимента с использованием симплекс-решетчатого плана Шеффе [1].

Объемные доли наполнителя и остальных компонентов цементного композита, располагающихся в пустотах между зернами наполнителя, во всех опытах оставались постоянными. В процессе экспериментов зерновой состав наполнителя изменяли путем смешивания в заданных соотношениях трех фракций  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  узкого зернового состава с размером зерен соответственно, 0,63–0,315, 0,315–0,16 и менее 0,16 мм. Изменяющаяся объемная доля каждой из смешиваемых фракций наполнителя в цементном композите принималась за контролируемую переменную. При условии, что теплопроводность наполненного композита зависит только от соотношения смешиваемых фракций наполнителя, факторное пространство представляет собой правильный 2-мерный симплекс. Для системы фракций наполнителя выполняется соотношение

$$\sum_{i=1}^3 x_i = 1,$$

где  $x_i \geq 0$  – объемная доля (концентрация) фракции наполнителя.

$$\lambda = 0,311x_1 + 0,245x_2 + 0,207x_3 + 0,025x_1x_2 - 0,11x_1x_3 + 0,072x_2x_3 + 0,277x_1x_2(x_1 - x_2) - 0,106x_1x_3(x_1 - x_3) + 0,603x_2x_3(x_2 - x_3) + 1,381x_1x_2x_3.$$

При количестве фракций равно трем правильный симплекс – равносторонний треугольник. Вершины треугольника соответствуют одной фракции, стороны – двойным системам, точка внутри треугольника отвечает одному определенному составу тройной системы.

### Результаты исследования и их обсуждение

Матрица планирования и результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Для вычисления теплопроводности наполненных композитов использовались данные, приведенные в табл. 3.

Статистическая обработка результатов эксперимента позволила получить зависимость в виде полинома 3 порядка для 3-фракционной смеси, характеризующей изменение теплопроводности наполненных известняком речным цементных композитов от зернового состава наполнителя:

Таблица 2

Матрица планирования и результаты эксперимента

Номер опыта	Концентрация фракций			Теплопроводность наполненных композитов, $\lambda$ , Вт/м·К
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	
1	1	0	0	0,311
2	0	1	0	0,245
3	0	0	1	0,207
4	1/3	2/3	0	0,252
5	1/3	0	2/3	0,225
6	0	1/3	2/3	0,191
7	2/3	1/3	0	0,315
8	2/3	0	1/3	0,244
9	0	2/3	1/3	0,293
10	1/3	1/3	1/3	0,304

Таблица 3

Данные, использованные для вычисления теплопроводности наполненных композитов

Номер образца	Размеры, м·10 <sup>3</sup>	Объем, м <sup>3</sup> ·10 <sup>-6</sup>	Масса, кг·10 <sup>-3</sup>	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость, Дж/(кг·°С)	Темп. охлаждения*, 1/с	Температуропроводность, м <sup>2</sup> /с·10 <sup>6</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·К)
1	30×10×10	3,0	5,84	1945	1185	0,028	0,1345	0,311
2	30×10×10	3,0	6,15	2050	1130	0,022	0,1055	0,245
3	30×10×10	3,0	5,68	1890	1075	0,021	0,101	0,207
4	31×10×10	3,1	6,15	1985	1105	0,024	0,115	0,252
5	30×10×10	3,0	5,76	1920	1234	0,02	0,097	0,225
6	30×10×10,5	3,15	6,1	1935	1210	0,017	0,0815	0,191
7	30,5×10×11	3,36	6,42	1915	1545	0,022	0,1055	0,315
8	30,5×10×11	3,36	6,52	1940	1390	0,019	0,091	0,244
9	30×10×11	3,3	6,25	1890	1130	0,0257	0,127	0,293
10	30,5×10×11	3,36	6,41	1910	1330	0,025	0,12	0,304

Примечание. \*для вычисления темпа охлаждения образцов использовали временные зависимости охлаждения образцов на участке регулярного режима охлаждения.

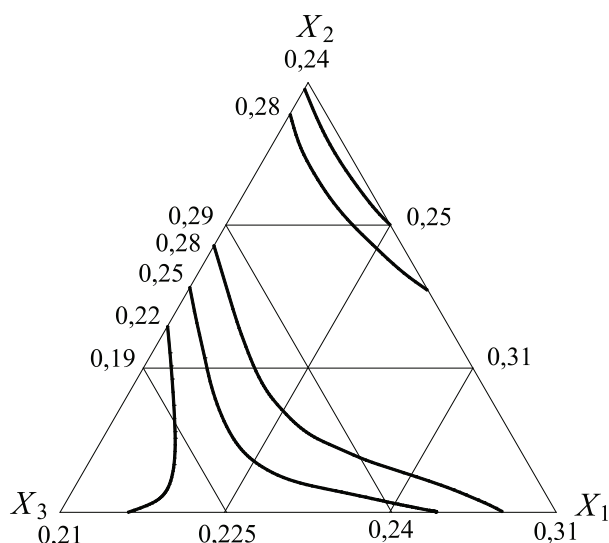


Рис. 2. Линии равных значений теплопроводности наполненных известняком речным цементных композитов на концентрационном треугольнике

По полученным уравнениям регрессии были построены графики в виде линий равных значений теплопроводности, представленные на рис. 2.

Результаты проведенных экспериментов показали (рис. 2), что теплопроводность исследованных образцов изменяется в пределах от 0,19 до 0,31 Вт/(м·К). Обращает на себя внимание тенденция увеличения теплопроводности при уменьшении дисперсности наполнителя в случае использования в качестве наполнителя одной из фракций  $X_1$ ,  $X_2$  или  $X_3$ , а также двухфракционных смесей, включающих фракцию  $X_1$  (см. рис. 2: значения теплопроводности в вершинах и на сторонах  $X_1$ - $X_2$  и  $X_1$ - $X_3$  концентрационного треугольника). В области трёхфракционных и двухфракционных с фракциями  $X_2$  и  $X_3$  смесей наполнителя имеется локальный участок, на котором тенденция возрастания теплопроводности при уменьшении дисперсности наполнителя не прослеживается.

### Выводы

1. Методом математического планирования эксперимента исследовано влияние зернового состава известнякового наполнителя при возможно более полном заполнении им объема материала цементных композитов на их теплопроводность.

2. Путем реализации симплекс-решетчатого плана эксперимента для системы трех фракций наполнителя установлена зависимость теплопроводности от зернового состава наполнителя, который изменялся

путем смешивания трёх его фракций в заданных пропорциях.

3. Для исследованной области варьирования зернового состава наполнителя теплопроводность наполненных цементных композитов изменяется в пределах от 0,19 до 0,31 Вт/(м·К).

4. Минимальная теплопроводность достигается при использовании наполнителя, состоящего из 2/3 части (по объему) фракции непрерывного зернового состава с максимальным размером зерен 0,16 мм и 1/3 части фракции 0,315–0,16 мм.

5. Максимальная теплопроводность соответствует составам с наполнителем фракции 0,63–0,315 мм.

### Список литературы

1. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химии и химической технологии. – М.: Высшая школа, 1985. – 327 с.
2. Баженов Ю.М., Король Е.А., Ерофеев В.Т., Митина Е.А. Ограждающие конструкции с использованием бетонов низкой теплопроводности: (основы теории, методы расчета и технологическое проектирование): научное издание. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008. – 319 с.
3. Бобрышев А.Н., Ерофеев В.Т., Козомазов В.Н. Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композитных систем. – СПб.: Наука, 2012. – 476 с.
4. Ерофеев В.Т., Митина Е.А., Матвиевский А.А., Осипов А.К., Емельянов Д.В., Юдин П.В. Композиционные строительные материалы на активированной воде затворения // Строительные материалы. – 2007. – № 11. – С. 56–58.
5. Ерофеев В.Т., Митина Е.А., Матвиевский А.А., Емельянов Д.В., Юдин П.В. Долговечность цементных композитов на активированной воде // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – № 7. – С. 51–54.

6. Ерофеев В.Т., Баженов Ю.М., Балатханова Э.М., Митина Е.А., Емельянов Д.В., Родин А.И., Карпушин С.Н. Получение и физико-механические свойства цементных композитов с применением наполнителей и воды затворения месторождений Чеченской Республики // Вестник МГСУ. – 2014. – № 12. – С. 141–151.

7. Калашников В.И., Ерофеев В.Т., Мороз М.Н., Троянов И.Ю., Володин В.М., Суздальцев О.В. Наногидросиликатные технологии в производстве бетонов // Строительные материалы. – 2014. – № 5. – С. 88–91.

8. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.

9. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Издательский дом «Пастет», 2010. – 343 с.

10. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Митина Е.А. Цементные композиты, наполненные стеклобоем // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 1997. – № 9. – С. 72–76.

### References

1. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. *Metody optimizatsii eksperimenta v khimii i khimicheskoi tekhnologii* [Methods of optimization experiments in chemistry and chemical technology]. Moscow: Vysshaya shkola. 1985. 327 p.

2. Bazhenov Y.M., Korol E.A., Erofeev V.T., Mitina E.A. *Ograzhdayushchie konstruksii s ispolzovaniem betonov nizkoi teploprovodnosti (osnovy teorii metody rascheta i tekhnologicheskoe proektirovanie)* [Enclosing structures with low thermal conductivity of concrete (foundations of the theory and methods of calculation of technological design)]. Moscow: Izd-vo Assot-siatsii stroitelnykh vuzov. 2008. 319 p.

3. Bobryshev A.N., Erofeev V.T., Kozomazov V.N. *Fizika i sinergetika dispersno-neuporyadochennykh kondensirovannykh kompozitnykh sistem* [Physics and Synergetics dispersion-disordered condensed composite systems]. St. Petersburg: Nauka. 2012. 476 p.

4. Erofeev V.T., Mitina E.A., Matvievskij A.A., Osipov A.K., Emeljanov D.V., Judin P.V. Composite building materials activated mixing water. *Stroitelnye materialy*. 2007. no. 11, pp. 56–58.

5. Erofeev V.T., Mitina E.A., Matvievskij A.A., Emeljanov D.V., Judin P.V. Durability of cementitious composites activated water. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2008. no. 7, pp. 51–54.

6. Erofeev V.T., Bazhenov Ju.M., Balathanova Je.M., Mitina E.A., Emeljanov D.V., Rodin A.I., Kar-pushin S.N. Preparation and mechanical properties of cement composites with fillers and mixing water deposits of the Chechen Republic. *Vestnik MGSU*. 2014. no. 12, pp. 141–151.

7. Kalashnikov V.I., Erofeev V.T., Moroz M.N., Trojanov I.Ju., Volodin V.M., Suzdalcev O.V. Hydro Silicate Nano technology in the production of concrete. *Stroitelnye materialy*. 2014. no. 5, pp. 88–91.

8. Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the theory of heat exchange]. Moscow: Atomizdat. 1979. 416 p.

9. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow: Pastet. 2010. 343 p.

10. Solomatov V.I., Erofeev V.T., Mitina E.A. Cement Composites filled cullet. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitelstvo*. 1997. no. 9, pp. 72–76.