



Research Article

Received: November 16, 2023

Accepted: December 26, 2023

Published: January 20, 2024

ISSN 2658-5553

Impact of carbon fiber on electrical and thermal properties of fluoranhydrite based composites

Gumenyuk, Alexander Nikolaevich^{1*} Polianskikh, Irina Sergeevna¹ Gordina, Anastasia Fedorovna¹ Buryanov, Aleksandr Fedorovich¹

¹Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov, Izhevsk, Russian Federation; gumeniuk.an@gmail.com (G.A.N.); irina_maeva@mail.ru (P.I.S.); afspirit@rambler.ru (G.A.F.)

²Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University, Moscow, Russian Federation; rga-service@mail.ru (B.A.F.)

Correspondence: * email: gumeniuk.an@gmail.com; contact phone: +79829929928

Keywords:

Mechanical properties; Binder; Fluoroanhydrite; Electrical conductivity; By-product gypsum; Resistive heating; Carbon fiber

Abstract:

The object of research is the impact of carbon fiber on the electrical and thermophysical properties of a mineral matrix, as well as the possibility of the modifier being used as a micro-heating element. **Method.** Conventional test methods, combined with modern research methods, including differential thermal calorimetry, were used to study the development of mechanical, electrical, and thermophysical characteristics, as well as physicochemical properties of fluoranhydrite-based material. **Results.** The suggested approach to reduce the specific resistivity has proven to be effective. Mixes with low specific resistivity can be used to produce composites based on fluoranhydrite and carbon fiber. The analysis of thermophysical properties of large-size items based on the developed composition proved the possibility of using the items in resistive heating systems.

1 Introduction

Композиционные строительные материалы в основном являются многокомпонентными системами, традиционно состоящими из заполнителей рационально подобранного гранулометрического состава, объединенных вяжущим различной природы, зачастую портландцементом [1], [2]. За счет технологических преимуществ, таких как удобоукладываемость, прочность и долговечность бетон является наиболее распространенным строительным материалом [1], [3]. Интенсификация процессов строительного производства, развитие инфраструктуры и урбанизация привели к широкому использованию бетона и железобетона на портландцементе, что оказывает негативное воздействие на окружающую среду [3], [4]. Промышленное производство цемента и стали вносят значительный вклад в объем выбросов CO₂ [4]. Экологический мониторинг промышленных предприятий цементной промышленности показывает, что на каждый килограмм произведенного портландцемента, выбрасывается 0.70–0.85 кг углекислого газа [4], [5]. Тенденция общемирового промышленного производства позволяет предсказать объем продукции в 5.8 млрд тонн уже к 2030 году [5], [6].

Данная тенденция обусловила развитие исследований в области строительного материаловедения, направленных на решение задач по снижению экологической нагрузки путем утилизации отходов промышленности при производстве экологически чистых материалов-заменителей портландцемента [7], [8].

Gumenyuk, A.; Polianskikh, I.; Gordina, A.; Buryanov, F.

Impact of carbon fiber on electrical and thermal properties of fluoranhydrite based composites;

2024; AlfaBuild; 30 Article No 3003. doi: 10.57728/ALF.30.3



Одними из таких примеров являются отходы предприятий химической промышленности, а именно комбинатов, осуществляющих производство фтороводорода и плавиковой кислоты [7], [8]. Технология производства которых включает сернокислородное разложение плавикового шпата с образованием твердого сульфат-кальциевого отхода или фторангидрита, по реакции:



Функционирование подобных объектов оказывает активное негативное воздействие на окружающую среду ввиду проектирования промышленных предприятий без учета возможности переработки отходов в полезную продукцию. В связи с этим, на территории данных предприятий отсутствуют площадки хранения отходов, шламохранилища, замкнутые циклы водопотребления и другие рациональные подходы к обращению с отходами [9].

В рамках представленного технологического процесса, на предпоследнем участке производственной линии получают фторангидрит, как метастабильную термодинамическую систему с большим запасом свободной энергии, что обусловлено, содержанием серной кислоты и фторсульфоната кальция. Транспортировка и хранение фторангидрита сопровождается гидролизом, вследствие особенностей химического состава фторангидрита, в результате выделяется определенное количество фтороводорода и серной кислоты, загрязняющих окружающую среду [9].

В связи с этим, для снижения негативного воздействия фторангидрита необходима нейтрализация серной кислоты и фтороводорода. Нейтрализация флюоритового концентрата в большинстве случаев осуществляется посредством «мокрой» технологии и удаления фторангидрита в виде суспензии в шламонакопители или в расположенные рядом водоемы [9], [10].

Ключевыми при утилизации фторангидрита являются следующие направления [2], [7], [8], [11], [12]: регулирование сроков схватывания традиционных вяжущих за счет введения фторангидрита, получение техногенного сульфатсодержащего вяжущего, получение серной кислоты и извести. Анализ ресурсного потенциала фтороводородного производства показал, что на территории Российской Федерации на 2023 год, средний объем производства фторангидрита составляет 350 тыс. тонн в год, хранение данных объемов осуществляется в отвальных хранилищах [2].

Исследования [2], [9] показали, что применение фторангидрита в чистом виде, без нейтрализации, при производстве строительных материалов приводит к значительному ухудшению эксплуатационных характеристик изделий. В свою очередь предлагаются различные варианты технологических решений в виде совместного помола с электротермофосфорным шлаком [13], фелиновым шламом [13], пылью из клинкеробжигательной печи [13], золой-уноса [13], хлоридом кальция [14] и другими. Возможна нейтрализация шоковой термической обработкой с сильным перепадом температур [15], что, однако является экономически неэффективным и требует изменений в технологических линиях предприятий.

Как показал опыт практического внедрения, наиболее рациональным считается химическая активация фторангидритового вяжущего. Выбор активатора является объектом всесторонних исследований [16], [17], так как активатор оказывает влияние как на физико-механические, так и на экономические характеристики конечного изделия.

Потенциально низкоуглеродистая вяжущая система на основе фторангидрита может быть активирована щелочными соединениями [16]. С некоторым успехом налажено производство пазогребневых изделий на основе силикатных активаторов из оливина [17], отходов стекла [18], использование золы биомассы в качестве щелочного активатора [18], а также глауберовой соли [7]. Опыт эксплуатации данных изделий показал их способность выполнять основные функции ограждающих конструкций и перегородок.

Ключевые тренды развития промышленности строительных материалов и конструкций [19]–[21] показывают необходимость повышения функциональной нагрузки традиционных изделий путем формирования дополнительных свойств.

Исследования доказали, что электропроводящий бетон на основе портландцемента способен растапливать снег и лед [19]. При этом электропроводность бетона обеспечивалась ионным типом проводимости [20]. Регулирование удельного объемного электрического сопротивления (параметра обратно пропорционального электропроводности) осуществляется за



счет введения электропроводящих компонентов различного происхождения, химического состава и морфологии [22].

Реализация функций снегоплавления у конструкций на основе портландцемента осуществляется при удельном объемном электрическом сопротивлении в пределах 5000 Ом · см [23]. Исследования теплофизических свойств электропроводящих конструкций или изделий на основе природного или техногенного гипса не проводились [21]. Незначительное количество работ в данном направлении обусловлено тем, что искусственный камень на основе гипсового вяжущего является диэлектриком [24]. Формирование электропроводящей структуры затруднительно, вследствие низких значений количества химически несвязанной воды в кристаллической структуре. Кроме того, на показатель удельного электрического сопротивления оказывает влияние ряд факторов, таких как температура окружающей среды, уровень влажности, продолжительность воздействия электрического тока и другие. В случае с гипсовыми материалами, данные факторы в значительной степени оказывают воздействие и на физико-механические характеристики искусственного камня.

Учитывая вышеприведенные особенности электротехнических свойств минеральной матрицы наиболее эффективным методом снижения удельного объемного сопротивления для гипсодержащих вяжущих, является формирование линейно направленной электропроводящей структуры. Линейная электропроводящая структура может быть сформирована посредством введения частиц длиной свыше 1 мм, например, металлической стружки, углеродной фибры и др.

Использование фибры в качестве армирующего компонента в виде соломы, шерсти и др. известно достаточно давно [25]. В период с 2000 по 2023 гг. предложены варианты армирования посредством волокон на основе: стекла, полипропилена, углерода [25].

Однако, отсутствуют работы по исследованию возможности воспроизведения подхода по созданию электропроводящих матриц на основе дисперсных сульфатсодержащих техногенных отходов и их использования в качестве нагревательных элементов

Таким образом, в рамках представленной работы объектом и предметом исследования определено техногенное вяжущее на основе отхода производства плавиковой кислоты, фторангидрит, модифицированное комплексом добавок для придания электропроводящих свойств, включая углеродное волокно. Для оценки влияния комплекса добавок и оценки возможности применения модифицированных изделий в качестве нагревательных элементов проведена оптимизация электропроводящих составов по оптимальному соотношению компонентов модификаторов. На основе оптимального состава выполнены лабораторные изделия нагревательных элементов, оценка эффективности которых произведена посредством анализа теплофизических и физико-химических свойств.

2 Materials and Methods

В рамках представленного исследования использовались наиболее распространенные сырьевые материалы и компоненты производимые и получаемые на территории Российской Федерации. Для достижения цели представленного исследования применялись экспериментально-аналитические методы анализа, соответствующие национальным стандартам Российской Федерации, а также посредством наблюдений.

2.1 Вяжущее

Фторангидрит производства общества с ограниченной ответственностью «Химический завод фторсолей», г. Пермь, Российская Федерация использовали для изготовления контрольных и электропроводящих составов, химический состав представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав фторангидрита
Table 1. Chemical composition of acid fluoride

	$\Delta m_{\text{прк}}$	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Проч.
Содержание оксидов, масс. %	2.8	3.5	0.7	0.95	36	-	52.42	-	-	3.63



По данным рентгенофлуоресцентного анализа фторангидрита состав вяжущего в основном представлен ангидритом, двухводным гипсом и карбонатом кальция [10], [12]. Нейтрализация материала на производстве осуществляется с использованием молотого известняка.

2.2 Активатор твердения

На основании анализа научно-исследовательской литературы и предыдущих исследований в качестве активатора твердения был выбран сульфат натрия, который вводили в количестве 2% от массы вяжущего [8].

2.3 Мелкий заполнитель

Для улучшения процесса гомогенизации фибры в смеси и снижения коэффициента раздвижки зерен на стадии смешивания вводился мелкий заполнитель в виде кварцевого песка с модулем крупности – 0.7.

2.4 Углеродная фибра Monsterfiber C

Для обеспечения электропроводящих характеристик вводили углеродную фибру, которая является армирующим наполнителем для композиционных изделий. Представляет собой измельченную рубленную углеродную нить, которая получается за счет многоступенчатой термообработки ПАН волокон (волокна на основе полиакрилонитрила) при температурах до 320°C, таблица 2.

Таблица 2. Технические характеристики углеродной фибры
Table 2. Technical characteristics of the carbon fiber

Наименование показателя	Углеродная фибра на основе углеволокна
Прочность на растяжение волокна, МПа, не менее	3000
Модуль упругости при растяжении волокна, ГПа, не менее	230
Плотность, г/см ³	1.68-1.80
Удлинение на разрыв волокна, не менее	0.80%
Влажность	0.1 %
Срок хранения	Не ограничен
Производство сертифицировано по стандартам	ISO 9001, OHSAS 18001, ISO 14001

Для исследования особенностей процесса нагревания изделий изготавливались фторангидритовые плиты размером 500x500 мм, составы представлены в таблице 3.

Таблица 3. Компонентное соотношение составов
Table 3. Composition of the testing mixtures

Составы	Вяжущее, кг (Фторангидрит)	Мелкий заполнитель, кг. (Тонкий песок в соответствии с Российским государственным стандартом ГОСТ 8736, Мк=0.7)	Активатор твердения, кг. (Сульфат натрия, Российский государственный стандарт ГОСТ 4166), %	Углеродная фибра (Monster fiber C)	Пластификатор (Stahement-2000-M), %	В/В
Контроль	6.961	1.168	2	-	0.5	0.3
АЕ-1				0.3		0.3
АЕ-2				0.4		0.3

AE-3				0.5		0.35
AE-4				0.75		0.4

После набора прочности изделий (28 дней) проведены исследования физико-химических и теплофизических свойств разработанных составов и изделий.

Определение механической прочности на сжатие

Механическая прочность на сжатие и изгиб образцов определялась в возрасте 7, 14 и 28 суток на прессе гидравлическом ПГМ-100МГ4-А со скоростью нагружения 0.5–0.8 МПа/с.

Термогравиметрия – дифференциальная сканирующая калориметрия (ТГ – ДСК) анализ искусственного камня

Анализ влияния нагрева микронагревательных, модифицирующих элементов (углеродного волокна) на фазовый состав исследуемых образцов был проведен посредством DSC анализа. Данные получены на приборе TGA/DSC1 ЗАО «Меттлер-Толедо Восток», Mettler-Toledo Vostok CJSC, Switzerland, диапазон температур от 60 до 1100°C при скорости повышения температуры 30°C/мин в атмосфере воздуха.

Методы испытаний для измерения удельного объемного сопротивления

Определение удельного объемного электрического сопротивления осуществлялось на образцах 70x70x70 мм, расчет значения выполнен по формуле:

$$\rho = R \times \frac{A}{L}, \Omega \times \text{cm} \quad (2)$$

где ρ - удельное сопротивление образца; R – сопротивление образца, определялось посредством измерения двухконтактным способом измерителем иммитанса E7-20; L – расстояние между зондами; A – площадь поперечного сечения образца. Схема измерения удельного объемного сопротивления представлена на рисунке 1.

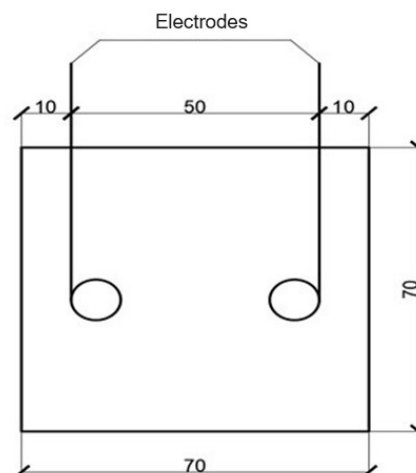


Рис. 1 - Схема измерения удельного объемного сопротивления

Fig. 1 - Scheme of measuring volumetric resistivity

Теплофизические свойства бетона

Определение теплофизических свойств производилось на основе опыта внедрения электропроводящих бетонов [21]. Методика испытаний заключается в генерации электрического тепла путем подачи электрического тока с $U = 120\text{В}$ и $I = 3\text{А}$, на электроды согласно схеме, представленной на рисунке 2. Подача электрического тока осуществлялась до превышения максимальной температуры, установленной на уровне 30 °С. Температурный порог нагрева обусловлен тем, что на ранних стадиях эксперимента нагрев изделий свыше 35 °С сопровождался выделением воды из структуры.

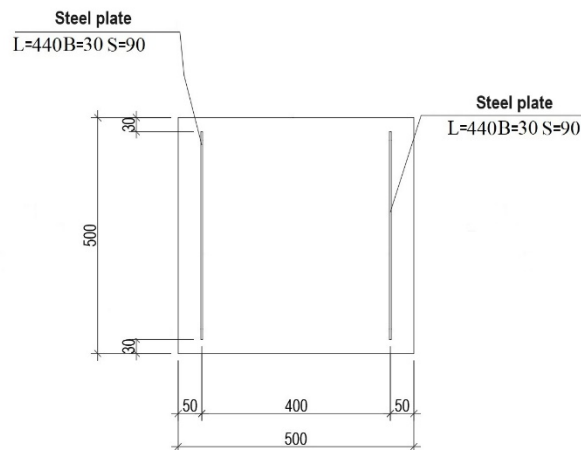


Рис. 2 - Схема расположения стальных пластин в экспериментальном изделии
Fig. 2 – Installation scheme of steel plates in the experimental product

Фиксация изменения и распределение градиента температур по поверхности изделия осуществлялась тепловизионной камерой Guide D192M. Интеллектуальная термокамера серии D оснащена 4-дюймовым сенсорным экраном высокой яркости, операционной системой Android, ИК-разрешение 192×144, тип детектора 25мкм, VОх, спектр 7,5~14мкм, частота кадров 25 Гц/9 Гц, NETD 50 мК, фокусное расстояние: 7 мм/F1.0, диапазон температур: -20°С~150°С, 100°С~650°С, 650°С~1500°С, точность: ±2°С или ±2% от показаний (при температуре окружающей среды от 15°С до 35°С и температуре объекта выше 0°С).

3 Results and Discussion

3.1 Анализ результатов электротехнических испытаний

Результаты, полученные при определении удельного объемного электрического сопротивления образцов, приведены на рисунке 3. Установлено, что показатель удельного сопротивления контрольного образца соответствуют параметрам, приведенным в литературных источниках [21], [22] и составляет на 28 сутки: 27.1 кОм · см. При этом удельное объемное сопротивление электропроводящего состава с углеродной фиброй составляет 8.5 кОм · см. Данный показатель в 1,5 раза ниже, чем у составов на фторангидритовом вяжущем с введением суспензии технической сажи, исследованных в предыдущих работах [26], [27]. Полученные характеристики обусловлены формированием системы линейной сети электропроводящих элементов в виде равномерно распределенной углеродной фибры в объеме минеральной матрицы. Зона перколяционного перехода между частицами фибры преодолевается за счет повышения пробивного напряжения, что позволяет достичь оптимальных характеристик в сравнении с результатами, представленными в работах [21], [23], [24]. В течение времени набора прочности наблюдается рост удельного объемного электрического сопротивления обоих составов, что связано с перекристаллизацией матрицы.

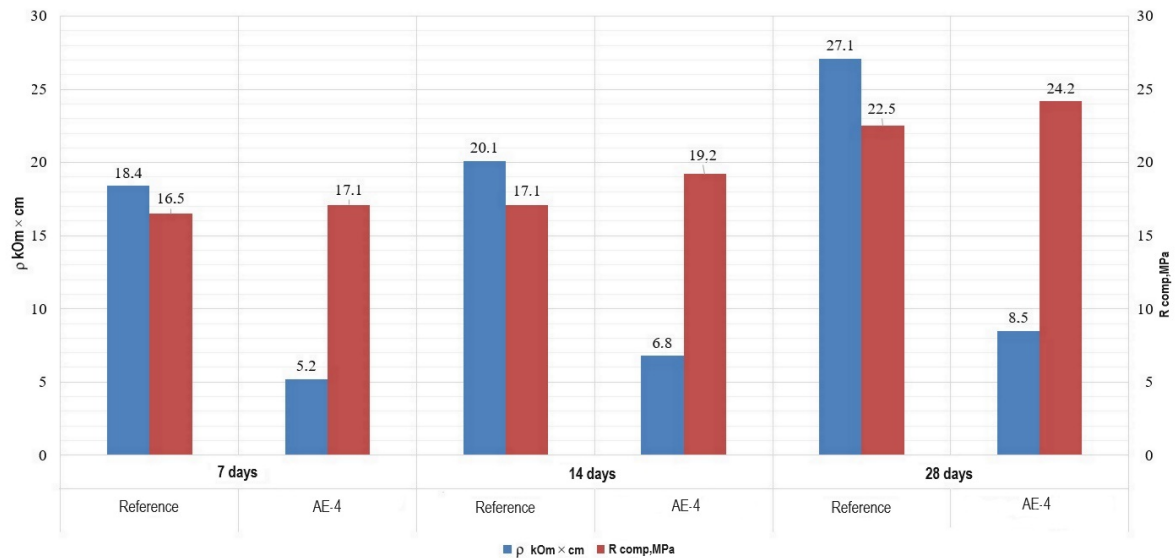


Рис. 3 - Результаты испытаний контрольного и оптимального состава АЕ-4
Fig. 3 - Testing results of the reference and optimal composition AE-4

Для оценки механической прочности исследуемых составов были проведены испытания на сжатие образцов размером 70x70x70 мм в возрасте 7, 14 и 28 суток. Установлено, что в среднем прочность состава АЕ - 4 в контрольные сроки испытаний выше, чем у составов АЕ-1,2, 3 в среднем на 9.5%. В свою очередь на 28 сутки твердения, прочность состава АЕ-4 составляя 24.2 МПа, превышает прочность контрольного состава на 7.5%, коэффициент вариации составил 7.2%.

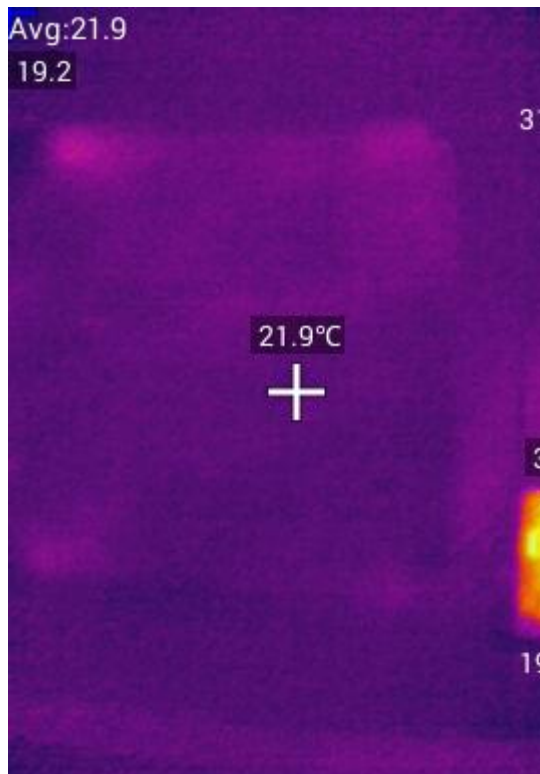
Удельное объемное сопротивление образцов на основе состава АЕ-4 составило 8,5 кОм · см, что на 31.3% ниже, чем у контрольного состава и на 10–15% ниже, чем у составов АЕ-1,2 и 3.

На основании анализа электротехнических свойств разработанных составов установлено, что оптимальным составом является АЕ-4.

В дальнейшем, для определения теплофизических и физико-химических свойств и характеристик, а также апробации схемы испытания и нагрева применялся состав АЕ-4.

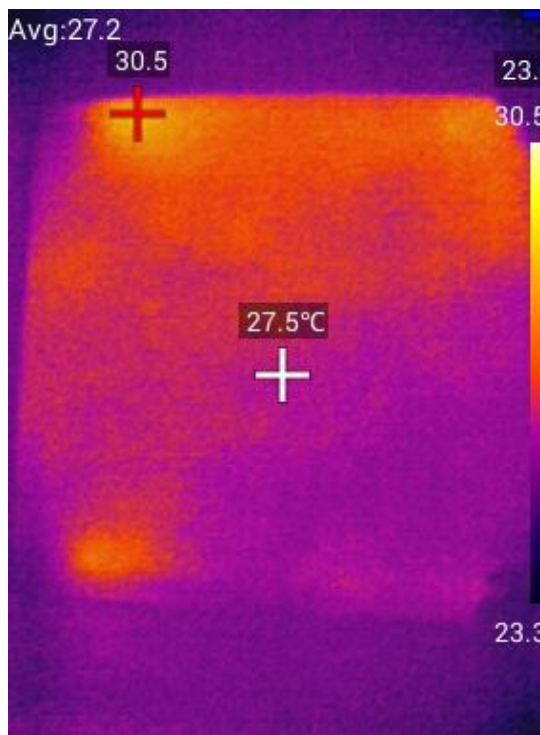
3.2 Исследование теплофизических свойств

На рисунке 4 приведены результаты теплофизических испытаний плиты с геометрическими размерами 500x500x50 мм, изготовленной из состава АЕ-4. Электроды в плите располагались на расстоянии 40 см, размеры 44x3 см, установлены согласно рисунку 4. Анализ экспериментальных данных в области практического внедрения позволил определить начальные параметры постоянного тока, подаваемые на металлические электроды. Характеристики подаваемого тока менялись для достижения градиента температур по поверхности плиты. Итоговые значения составили: $I=3A$; $U=120V$, данные характеристики экономически эффективны и безопасны для использования в промышленном и гражданском строительстве. На протяжении 40 минут эксперимента температура изделия равномерно повышалась. Показатель температуры по истечению 40 минут составил 31.1 °С, что на 9.2 °С выше исходного. При этом средняя потребляемая мощность при приложении 120В и 3А составила 660 Вт/м².



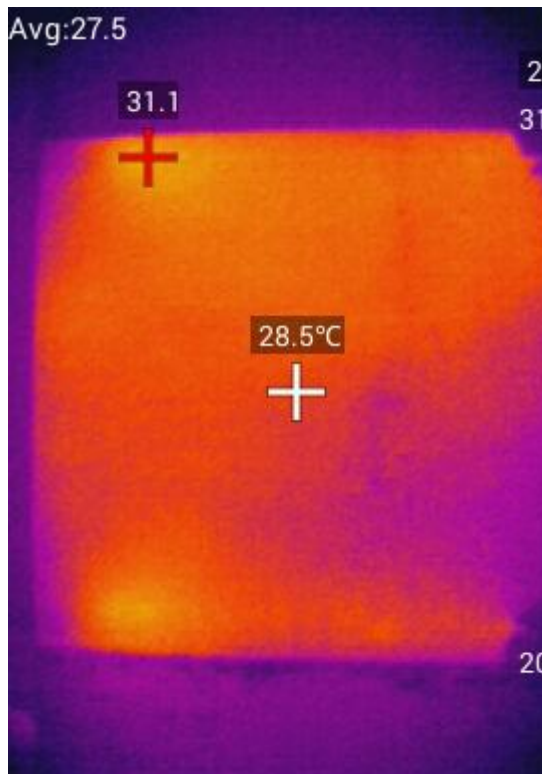
Коэффициент излучения – 0.75
Т окружающей среды = 19.2 °С
Т средняя температура поверхности
плиты = 21.9 °С

a(a)



Коэффициент излучения – 0.75
Т окружающей среды = 23.3 °С
Т средняя температура поверхности
плиты = 27.5 °С

б(б)



Коэффициент излучения – 0.75
Т окружающей среды = 20 °С
Т средняя температура поверхности
плиты = 28.5 °С

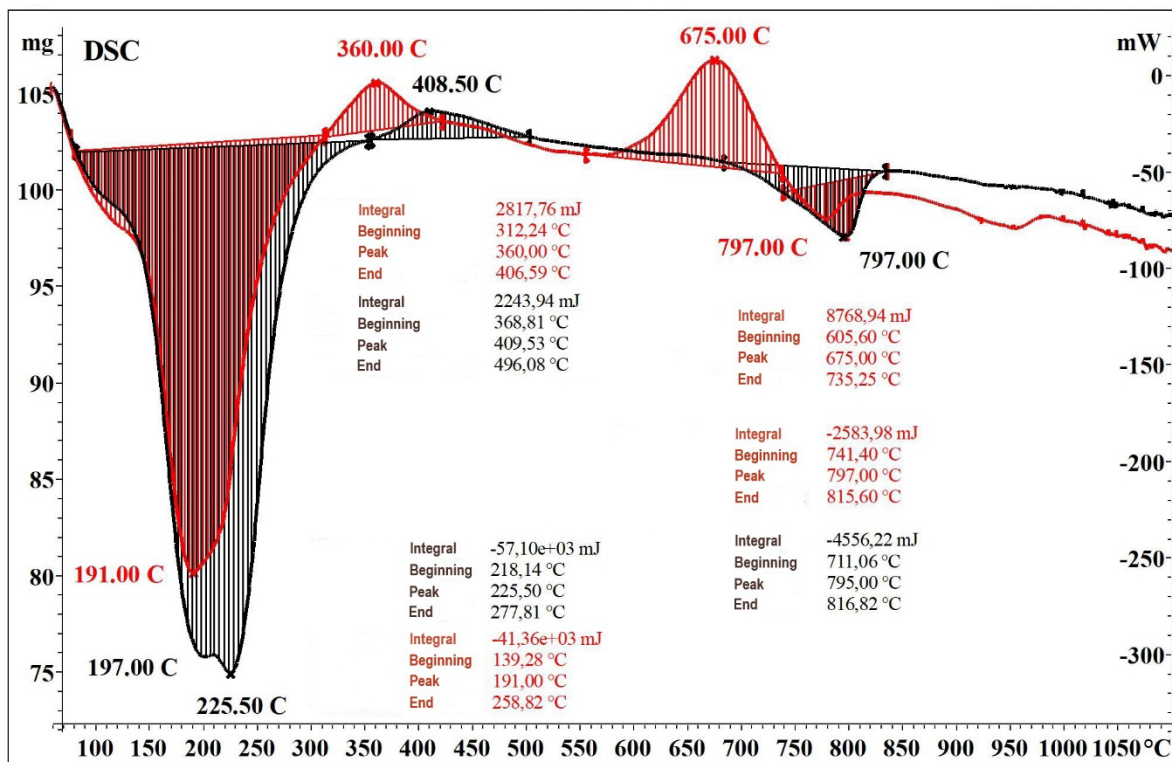
в(с)



г(д)

Рис. 4 - Изображения с тепловизионной камеры, полученные с интервалом в 20 минут: а. Исходная температура изделия; б. Температура изделия через 20 минут после начала подачи тока; в. Температура изделия через 40 минут после начала нагрева; г. Общий вид образца
Fig. 4 - Images taken from a thermal imaging camera with a 20-minute interval: a. The initial temperature of the product; b. The product temperature at 20 minutes after the start of a current

supply; c. The product temperature is 40 minutes after the heating starts; d. General view of the sample

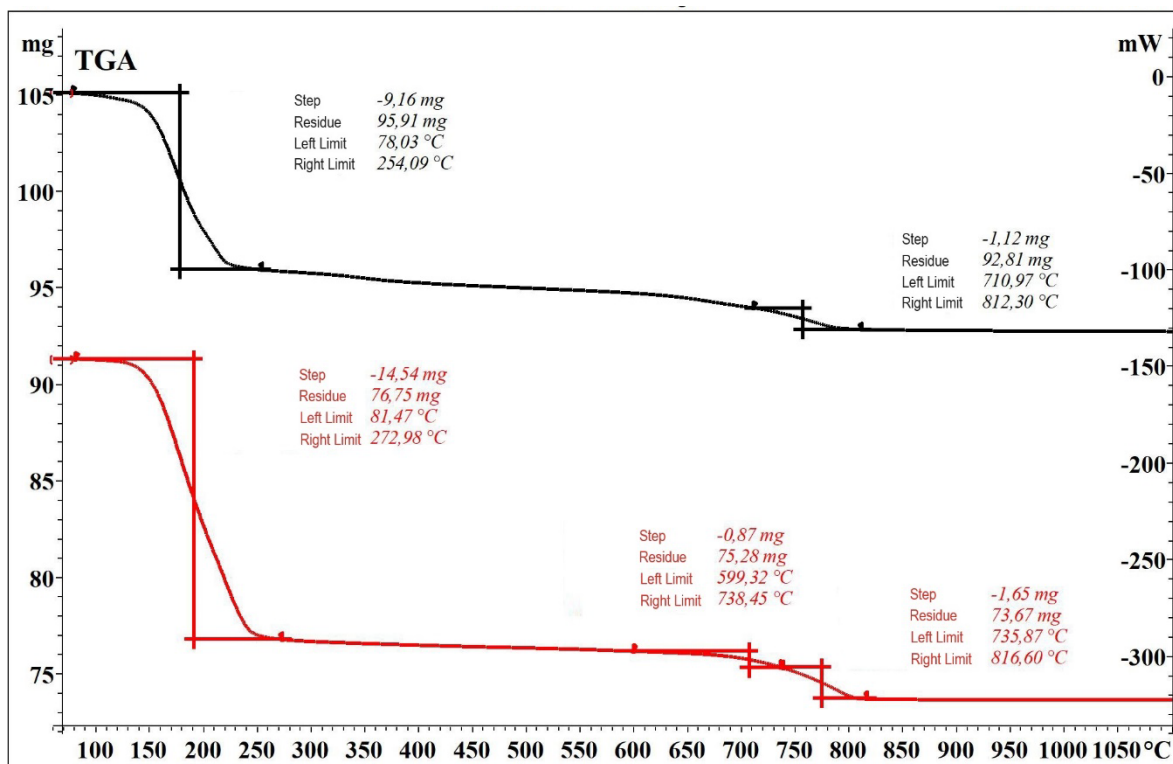


Lab: METTLER

STAR® SW 16.20

Рис. 5 - DSC анализ образцов на 28 суток твердения: красный - электропроводящий состав; черный - контрольный состав

Fig. 5 - DSC analysis of the samples at 28 days of curing: red - electrically conductive composition; black - reference



Lab: METTLER

STAR® SW 16.20



Рис. 6 - TG анализ образцов на 28 сутки твердения: красный - электропроводящий состав; черный - контрольный состав
Fig. 6 - TG analysis of the samples at 28 days of curing: red - electrically conductive composition; black - reference

Сравнительный анализ дифференциально сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа показал, что в интервале температур до 280 °С происходит дегидратация кристаллогидратной воды электропроводящего и контрольного составов, характеризующаяся значительной потерей массы в 15.9% для электропроводящего состава и 8.7% для контрольного. Кроме того, на кривой DSC электропроводящего состава наблюдается сильный экзотермический эффект с максимумом при температуре 675 °С. В исследуемой области температур фазовые превращения углерода с выделением теплоты отсутствуют [28], полученные данные вероятно демонстрируют результат процесса взаимодействия углерода с кислородом с образованием оксида углерода (выгоранием электропроводящей добавки).

При 408.5 °С в контрольном составе и 360 °С в электропроводящем составе происходит перекристаллизация сульфата кальция. У контрольного и электропроводящего состава отмечен эндотермический эффект при 797 °С, связанный с диссоциацией карбоната кальция.

Таким образом анализ полученных данных позволяет сделать вывод о возможности использования углеродной фибры в качестве микронагревательного элемента, добавка позволяет обеспечить удовлетворительные физико-механические характеристики, теплофизические параметры, при этом модификация и последующий нагрев изделия не сопровождаются физико-химическими изменениями.

4 Conclusions

В исследовании проведен комплексный анализ возможности регулирования электротехнических свойств изделий на основе антропогенного гипса, определены теплофизические параметры и оценка влияния воздействия электрического тока на физико-химические свойства матрицы изделия.

1. Установлено влияние введения углеродной фибры на физико-механические и электротехнические свойства исследуемых составов, механическая прочность модифицированного состава – 24.2 МПа, удельное объемное сопротивление 8.5 кОм·см. Параметры удовлетворяют эксплуатационным требованиям к предлагаемым изделиям.

2. Определены оптимальные показатели электрического тока $U = 120\text{В}$, $I = 3\text{А}$, обеспечивающие температуру изделия после 40 минут нагрева в 31.1 °С, что на 9.2 °С выше начальной температуры изделия.

3. Установлено отсутствие химического взаимодействия, обусловленного введением углеродной фибры, а также отрицательного влияния нагрева изделия на структуру и состав минеральной матрицы.

4. Необходимо проведение дополнительных исследований влияния циклического и длительного воздействия электрического тока на углеродсодержащие компоненты, структуру и свойства нагревательных изделий.

Таким образом, на основе предложенных составов может быть разработана экономически эффективная, низко материалоемкая система отопления жилых и производственных помещений. Возможна дальнейшая оптимизация составов и изделий с целью повышения теплофизических показателей и их стабильности.

5 Fundings

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (МК-3391.2022.4).

References

1. Inozemtsev, A.S. and Korolev, E. V. (2022) High-Strength Lightweight Concrete. SPbGASU, St. Petersburg.
https://www.spbgasu.ru/upload/iblock/b39/44zuyy6dr4qsukz2mbcgzqcqkefmj1usq/Иноземцев_Королев_Высокопрочные_легкие_бетоны.pdf



2. Kamarou, M., Moskovskikh, D., Chan, H.L., Wang, H., Li, T., Akinwande, A.A. and Romanovski, V. (2023) Low Energy Synthesis of Anhydrite Cement from Waste Lime Mud. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **98**, 789–796. <https://doi.org/10.1002/jctb.7284>.
3. Kurdowski, W. (2014) *Cement and Concrete Chemistry*. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>.
4. Shi, C., Qu, B. and Provis, J.L. (2019) Recent Progress in Low-Carbon Binders. *Cement and Concrete Research*, **122**, 227–250. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.009>.
5. Wang, X., Ding, S., Ashour, A., Ye, H., Thakur, V.K., Zhang, L. and Han, B. (2024) Back to Basics: Nanomodulating Calcium Silicate Hydrate Gels to Mitigate CO₂ Footprint of Concrete Industry. *Journal of Cleaner Production*, **434**, 139921. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139921>.
6. Srinath, B.L.N.S., Patnaikuni, C.K., Balaji, K.V.G.D., Kumar, B.S. and Manjunatha, M. (2021) A Prospective Review of Alccofine as Supplementary Cementitious Material. *Materials Today: Proceedings*, **47**, 3953–3959. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.719>.
7. Hansted, F.A.S., Mantegazini, D.Z., Ribeiro, T.M., Gonçalves, C.E.C. and Balestieri, J.A.P. (2023) A Mini-Review on the Use of Waste in the Production of Sustainable Portland Cement Composites. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, **41**, 828–838. <https://doi.org/10.1177/0734242X221135246>.
8. Gumeniuk, A.N., Polyanskikh, I.S., Gordina, A.F., Yakovlev, G.I., Averkiev, I.K. and Shevchenko, F.E. (2022) Fluoranhidrite Based Composites with the Thermoplastic Additive. *Magazine of Civil Engineering*, **112**, 11210. <https://engstroy.spbstu.ru/en/article/2022.112.10/>
9. López, F.A., Gázquez, M., Alguacil, F.J., Bolívar, J.P., García-Díaz, I. and López-Coto, I. (2011) Microencapsulation of Phosphogypsum into a Sulfur Polymer Matrix: Physico-Chemical and Radiological Characterization. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.05.010>.
10. Fedorchuk Y.M. and Tsyankova T.S. (2010) Development of Ways to Reduce the Impact of Hydrogen Fluoride Production on the Environment. Tomsk Polytechnic University, Tomsk. <http://opac.lib.tpu.ru/document/1/RU%5CTPU%5Cbook%5C221957>
11. Bayatanova, L., Rakhadilov, B., Kengesbekov, A., Kylyshkanov, M., Abdulina, S., Adilkanova, M. and Sagdoldina, Z. (2023) Production of Anhydrite Binder from Waste Fluorangydrite. *ChemEngineering*, **7**, 28. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7020028>.
12. Budnikov, P.P. and Zorin, S.P. (1954) *Anhydritovy Tsement*. Promstroyizdat, Moscow. <http://stroytechnolog.ru/lib/book/book10.html>
13. Garg, M. and Pundir, A. (2017) Energy Efficient Cement Free Binder Developed from Industry Waste – A Sustainable Approach. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **21**, 612–628. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1139510>.
14. Bazaldua-Medellin, M.E., Magallanes-Rivera, R.X. and Escalante Garcia, J.I. (2022) Composite Hydraulic Binders Based on Fluorgypsum: Reactions, Properties and Sustainability. *Journal of Building Engineering*, **53**, 104590. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104590>.
15. Ding, Z., Chen, J., Zheng, S., Hu, Y. and Fang, Y. (2022) Influence of Anhydrite on the Properties and Microstructure of Aluminophosphate Cement. *Materials*, **15**, 7005. <https://doi.org/10.3390/ma15197005>.
16. Garg, M. and Pundir, A. (2014) Investigation of Properties of Fluorogypsum-Slag Composite Binders – Hydration, Strength and Microstructure. *Cement and Concrete Composites*, **45**, 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.010>.
17. Nizevičienė, D., Kybartienė, N. and Jusas, V. (2023) Analysis of Compressive Strength of Anhydrite Binder Using Full Factorial Design. *Materials*, **16**, 6265. <https://doi.org/10.3390/ma16186265>.
18. Cao, W., Yi, W., Peng, J. and Yin, S. (2023) Upcycling of Phosphogypsum as Anhydrite Plaster: The Positive Effect of Soluble Phosphorus Impurities. *Construction and Building Materials*, **372**, 130824. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130824>.
19. Yao, G., Cui, T., Jia, Z., Sun, S., Anning, C., Qiu, J. and Lyu, X. (2020) Effect of Anhydrite on Hydration Properties of Mechanically Activated Muscovite in the Presence of Calcium Oxide. *Applied Clay Science*, **196**, 105742. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105742>.
20. Dehghanpour, H. and Yilmaz, K. (2021) A More Sustainable Approach for Producing Less Expensive Electrically Conductive Concrete Mixtures: Experimental and FE Study. *Cold*



- Regions Science and Technology*, **184**, 103231.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103231>.
21. Gordina, A.F., Gumenyuk, A.N., Polyanskikh, I.S. and Zaripova, R.I. (2022) Carbon-Containing Modifier for Fluoranhidrite Binder. *Nanotechnologies in Construction A Scientific Internet-Journal*, **14**, 381–391. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-5-381-391>.
 22. Zhang, S., Ukrainczyk, N., Zaoui, A. and Koenders, E. (2024) Electrical Conductivity of Geopolymer-Graphite Composites: Percolation, Mesostructure and Analytical Modeling. *Construction and Building Materials*, **411**, 134536. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134536>.
 23. Jun, H.-M., Seo, D.-J., Lim, D.-Y., Park, J.-G. and Heo, G.-H. (2023) Effect of Carbon and Steel Fibers on the Strength Properties and Electrical Conductivity of Fiber-Reinforced Cement Mortar. *Applied Sciences*, **13**, 3522. <https://doi.org/10.3390/app13063522>.
 24. Gordina, Anastasiya, Aleksandr Gumenyuk, Irina Polyanskikh, Grigorij Yakovlev, and Vít Černý. (2023) "Effect of Electrochemical Corrosion on the Properties of Modified Concrete" *Construction Materials*, **3**, 2: 202-216. <https://doi.org/10.3390/constrmater3020013>
 25. Abdullah, A., Mazelan, N., Tadza, M.Y.M. and Rahman, R.A. (2021) The Use of Gypsum and Waste Gypsum for Electrical Grounding Backfill. 1213–1226. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5281-6_86.
 26. Park, J.-G., Seo, D.-J., Lim, D.-Y., Lee, Y.-J. and Heo, G.-H. (2023) A Comparative Study on Electrical Resistivity and Compressive Strength Properties of Cement Composites Incorporating Conductive Materials. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2023**, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2023/6676577>.
 27. Gordina, A., Gumenyuk, A., Polyanskikh, I., Yakovlev, G. and Černý, V. (2023) Effect of Electrochemical Corrosion on the Properties of Modified Concrete. *Construction Materials*, **3**, 202–216. <https://doi.org/10.3390/constrmater3020013>.
 28. Lopanov, A.N., Fanina, E.A. and Nesterova, N. V. (2021) Differential-Scanning Calorimetry of Graphite and Activated Carbon in Argon. *Solid Fuel Chemistry*, **55**, 105–109. <https://doi.org/10.3103/S0361521921020051>.