Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2019, №2, Том 11 / 2019, No 2, Vol 11 https://esj.today/issue-2-2019.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/80SAVN219.pdf

Ссылка для цитирования этой статьи:
Матус Е.П. Численное моделирование электропрогрева дисперсно-армированного бетона с фибрами высокой проводимости // Вестник Евразийской науки, 2019 №2, https://esj.today/PDF/80SAVN219.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:
Matus E.P. (2019). Numerical modeling of electric heating of fiber reinforced concrete with high conductivity fibers. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 2(11). Available at: https://esj.today/PDF/80SAVN219.pdf (in Russian)

УДК 691.328.1

ГРНТИ 67.15.39

Матус Евгений Петрович
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»
Новосибирск, Россия
Заведующий кафедрой «Физики и химии»
Доцент кафедры «Физики»
Кандидат технических наук
E-mail: matus_evg@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=380092

Численное моделирование электропрогрева дисперсно-армированного бетона с фибрами высокой проводимости

Аннотация. Рассмотрен прогрев дисперсно-армированного бетона со стальными фибрами электрическим током. Методом конечных элементов получено решение задачи распределения плотности тока в фрагменте сталефибробетонной смеси. Показано, что существенный вклад в усредненную электропроводность вносит контактный слой фибра-бетон. Более 50 % полного тока идет через армирующие волокна. Электропроводность смеси повышается пропорционально коэффициенту армирования. При армировании 2 % по объему происходит ее увеличение в 2–3 раза в зависимости от выбора свойств контактного слоя. Приводятся данные экспериментов, подтверждающие указанную зависимость. Также получено решение задачи распределения тепла в фрагменте сталефибробетонной смеси в стационарном и нестационарном режимах внешнего обогрева и электродного прогрева. Показано что, средний коэффициент теплопроводности увеличивается пропорционально коэффициенту армирования. Сравнение с экспериментальными данными показывает значительное влияние параметров контактного слоя на теплопроводность. Значительное тепловыделение в области контактной зоны и в фибре приводит к превышению температуры в этих зонах на 20–30 градусов в стационарном режиме. Нагрев зоны контакта не должен превышать точку кипения воды в смеси. Такой тепловой режим может быть обеспечен при средней плотности тока в диапазоне 200–250 А/м^2. При этом среднее удельное тепловыделение составляет 100–140 кВт/м^3. Рассмотрено распределение температуры в фибробетоне при индукционном прогреве. В этом случае необходимо значительно повышать частоту используемого тока. Результаты исследования могут применяться при назначении режимов электропрогрева изделий из дисперсно-армированных бетонов, а также при расчете удельной проводимости и коэффициента теплопроводности таких материалов.

Ключевые слова: дисперсно-армированный бетон; стальные фибры; прогрев бетона; электродный прогрев; индукционный прогрев бетона; плотность тока; распределение температуры; численное моделирование; метод конечных элементов

Введение и постановка задачи

При зимнем бетонировании строительных конструкций широко применяются различные способы обогрева [1; 2]. Наиболее востребован способ обогрева греющим кабелем, а также метод «термоса». Значительно реже используется электродный прогрев и индукционный прогрев железобетонный изделий. Для предварительных расчетов и регулирования прогрева необходимо знать значения теплопроводности и электропроводности бетона. Задача усложняется в изделиях с большим содержанием стальной арматуры. Обычно бетонную смесь в таких расчетах считают телом с однородными электрическими свойствами. Однако при дисперсном армировании (например, стальными волокнами – фибрами), значительное отличие электрических свойств бетона и фибр может привести к неравномерному нагреву материала уже на уровне его структурных элементов, что, в конечном итоге, повлечет развитие деструктивных процессов при твердении.

Аналитическую зависимость эффективной проводимости композита от размеров стальных включений возможно построить только в модели со сферической симметрией [3]. В случае анизотропных волокон, удается получить значения эффективного коэффициента теплопроводности, согласующегося с экспериментальными данными, только в случае значительного содержания волокон – более 20 % от объема [4; 5]. Экспериментальные исследования строительных композитов со стальными фибрами на полимерных связующих показали линейную зависимость электропроводимости от содержания волокон [6]. Взаимодействие фибробетона с электромагнитным полем и возможность электропрогрева и индукционного прогрева сталефибробетона на цементном связующем были ранее экспериментально исследованы автором [7; 8; 9; 10]. Однако в указанных работах не исследовались тепловые процессы и электропроводность на уровне структурных элементов – фибр.

В настоящей статье поставлена задача численного моделирования распределения плотности электрического тока и температурных полей непосредственно в армирующем волокне, окружающем растворе и в зоне их контакта. Данный подход может осуществляться с привлечением моделирования методом конечных элементов (программа ELCUT) [11; 12].

Изложение и реализация методики

Поскольку в небольшом объеме фибробетона находятся сотни армирующих волокон, в данной статье автор, следуя примеру [13], ограничился рассмотрением распределения тепла в условной «элементарной ячейке» с одной фиброй. Эта ячейка представляла собой цилиндр с расположенной вдоль его оси фиброй. Изменение коэффициента армирования осуществлялось путем изменения диаметра фибры, а коэффициента ориентации – изменением ее длины. Подобное допущение базируется на практически линейной зависимости электропроводимости от коэффициента ориентации при малом объемном армировании [14]. Граничные условия были выбраны из соображения однородности прогрева всей массы фибробетона: считалось, что на боковой поверхности цилиндра поддерживается постоянная температура, а нормальная составляющая плотности тока к этой поверхности равна нулю. Из сравнения с данными экспериментов подбирались свойства контактной зоны фибра-бетон. Исходные данные для моделирования приведены таблице.

Таблица

Исходные данные для моделирования

Армирующее волокно (стальная фибра)					
Длина, мм	Диаметр, мм	Плотность, кг/м^3	Удельная теплоемкость, Дж·м$^{-3}$·К$^{-1}$	Удельная проводимость, Ом$^{-1}$·м$^{-1}$	Коэффициент теплопроводности, Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$
40–80	0,5–2	8000	500	8000000	50
Размеры образца бетона с фиброй и свойства бетона (мелкозернистый бетон на портландцементе)					
100	18	2000	1000	0,33	1
Контактный слой					
80	0,2 (толщина)	2000	1000	0,01	0,01

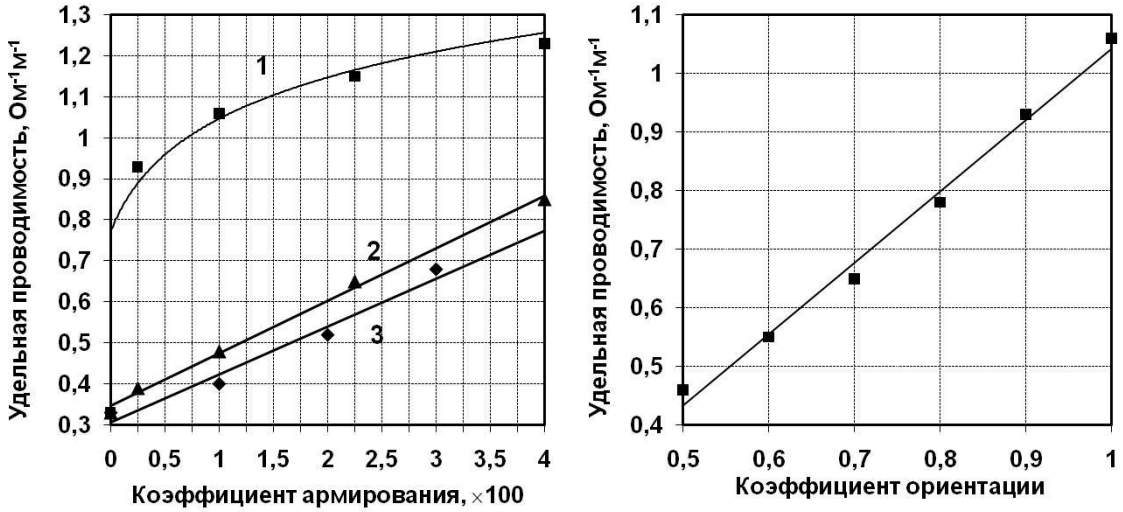
Для расчета электропроводности и теплопроводности к торцевым граням цилиндра прикладывались электроды с заданными потенциалами и температурами. Моделирование индукционного прогрева осуществлялось путем помещения цилиндрической ячейки с фиброй в многовитковую катушку с переменным током. Для нахождения распределения температуры решались две связанные задачи: определение распределения электрического тока в образце и уравнение теплопроводности с источником тепла в соответствии с законом Джоуля-Ленца.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1а показаны распределения эквипотенциальных поверхностей электрического поля при прохождении тока через образец с фиброй без контактного слоя и с контактным слоем фибра-бетон. У образца без контактного слоя в половине образца (в центральной части) весь ток идет практически через волокно (картина 1). На рис. 1б изображены зависимости эффективной удельной электрической проводимости от коэффициента армирования и ориентации. У образца без контактного слоя проводимость резко нелинейно возрастает практически в 3 раза уже при небольшом армировании в 0,25 % по объему (кривая 1). Зависимость проводимости от коэффициента ориентации линейна (показано при 1 % армирования). Данные экспериментов, проведенных ранее автором [7], (кривая 3) не подтверждают резкого роста проводимости: зависимость от коэффициента армирования практически линейна. Это несоответствие может быть объяснено возникновением дополнительной контактной разностью потенциалов, возникающей у поверхности раздела проводник-электролит (сталь-цементное тесто). Для моделирования данного эффекта фибра была окружена тонким слоем вещества со специально подобранным низким значением электрической проводимости. Наличие такого контактного слоя приводит к более равномерному распределению плотности тока в образце, рис. 1а, картина 2 и линейной зависимости средней удельной проводимости от коэффициента армирования, рис. 1б, кривая 2. Необходимо отметить, что контактное сопротивление на границе раздела присутствует вне зависимости от наличия внешнего электрического поля и, вследствие этого, точное выполнения закона Ома для всего образца (линейная зависимость силы тока от напряжения) у таких композитов не наблюдается [7].

а) 1

2



б)

Рисунок 1. *а) Картины эквипотенциальных линий электрического поля в образце бетона с волокном: 1 – волокно без контактного слоя; 2 – волокно с контактным слоем; б) зависимость эффективной удельной проводимости от параметров армирования: 1 – волокно без контактного слоя; 2 – волокно с контактным слоем; 3 – эксперимент (составлено автором)*

На рис. 2 показаны зависимости эффективного коэффициента теплопроводности образца с фиброй от коэффициента армирования. Данная зависимость носит линейный характер (величина критерия достоверности аппроксимации R^2 более 0,97). Как и в случае с электропроводностью можно предложить усовершенствованную модель путем введения тонкого контактного слоя с низким значением коэффициента теплопроводности, кривая 2. Экспериментально теплопроводность определялась на приборе ИТП-4МГ(«100») по ГОСТ 7076-99. Для этого были изготовлены образцы фибробетона размером 100×100×20 мм состава Ц:П = 1:2, с коэффициентом армирования 0; 0,01 и 0,02. Использовались стальные фибры длиной 30 мм, диаметром 0,5 мм. Образцы испытывались в возрасте 28 суток твердения в нормальных условиях. Значение коэффициента теплопроводности контактного слоя было подобраны так, чтобы данные моделирования и эксперимента совпадали.

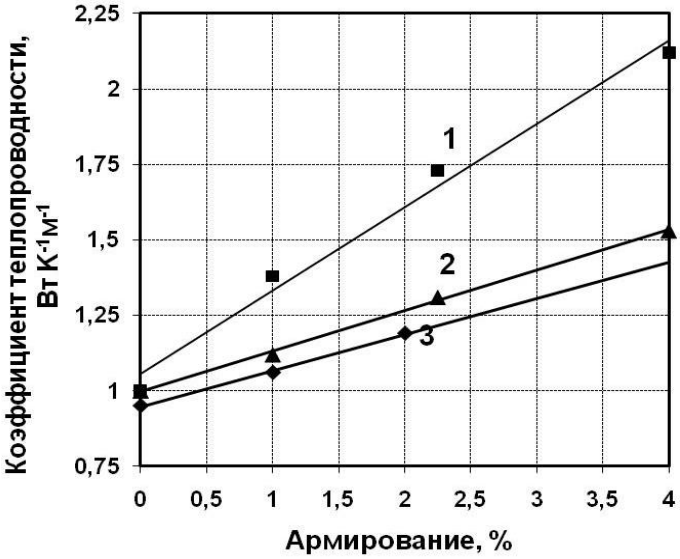
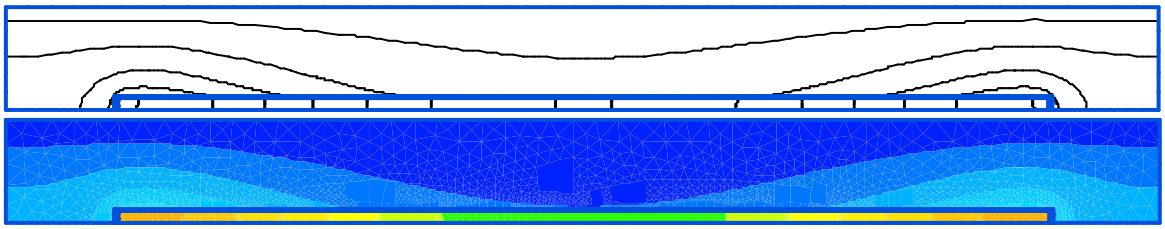


Рисунок 2. *Зависимость усредненной теплопроводности от содержания волокон (в процентах от объема): 1 – волокно без контактного слоя; 2 – волокно с контактным слоем; 3 – эксперимент (составлено автором)*

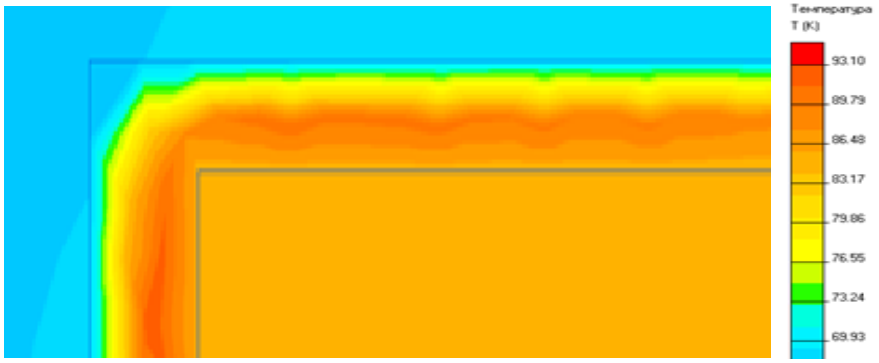
На рис. 3а показаны картины изотерм в образце с фиброй и контактным слоем. Можно сделать вывод, что наибольшее тепловыделение происходит у концов волокна, средняя же часть образца прогревается более равномерно. Кроме того, значительное тепловыделение наблюдается в контактной зоне, рис. 3б. Процессы твердения смеси в этой зоне играют основную роль в сцеплении фибры с бетоном и как следствие обеспечивают высокую конечную прочность материала. Поэтому нагрев этой зоны не должен превышать точку кипения воды в смеси. Численное моделирование позволяет определить параметры электроразогрева, при которых такой режим может быть достигнут. В частности, значение усредненной по сечению плотности тока в образце лежат в диапазоне 200–250 А/м^2, а удельное усредненное по образцу тепловыделение – 100–140 кВт/м^3.

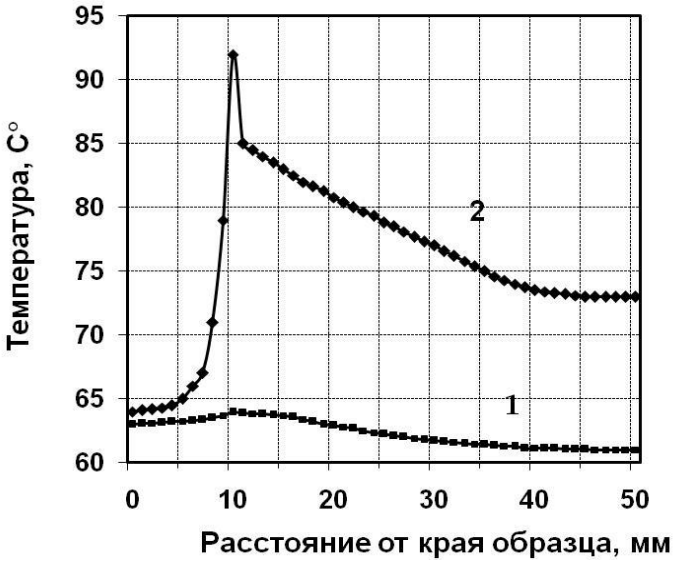
На рис. 3в приведены значения температуры в различных точках образца. Видно, что температура контактной зоны превышает температуру окружающей смеси более чем на 10 градусов. Такой градиент температуры может приводить к процессам дополнительной миграции влаги (высушивание контактной зоны).

а)



б)





в)

Рисунок 3. *Распределение температуры при электропрогреве в образце с волокном: а) картина изотерм в образце; б) изотермы в контактном слое; в) распределение температуры (1 – вдоль образца на расстоянии 4 мм от волокна, 2 – вдоль волокна) (составлено автором)*

На рис. 4 показано изменение распределения температуры в образце со временем. Видно, что уже по истечении 40–50 секунд происходит практически полный нагрев образца до стационарного режима. Этот факт нужно учитывать при форсированном электроразогреве или нагреве с помощью импульсов тока.

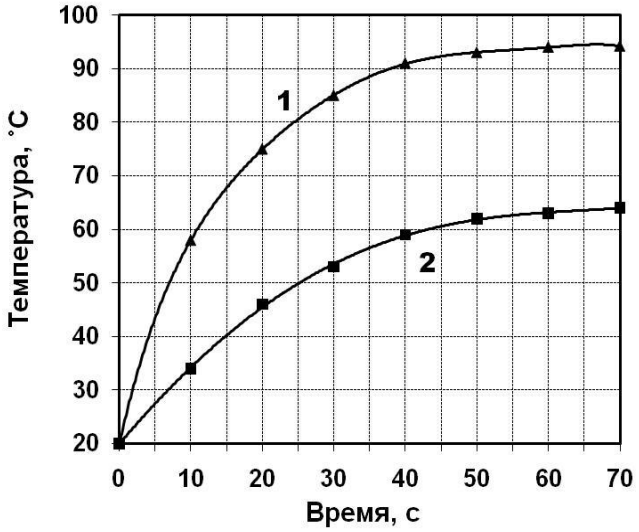
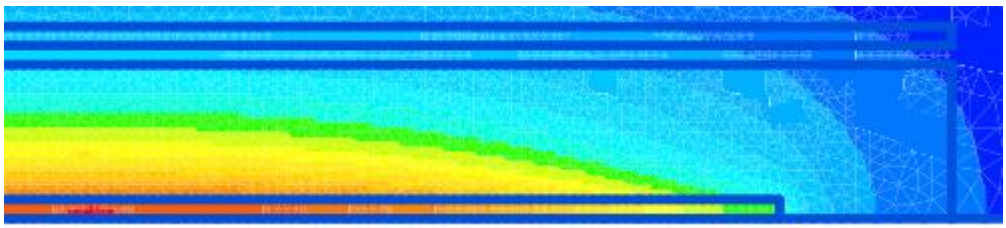


Рисунок 4. *Изменение температуры образца с фиброй со временем: 1 – температура конца фибры, 2 – температура на расстоянии 4 мм от конца фибры (от ее оси) (составлено автором)*

Ранее автором были проведены теоретические и экспериментальные исследования индукционного прогрева сталефибробетона [8]. Для определения разности температур между фиброй и бетоном при таком нагреве было проведено численное моделирование. Так как реальная обмотка индуктора охватывает большой объем бетона, для моделирования прогрева ячейки с одной фиброй был выбран индуктор, создающий необходимое переменное магнитное поле, с сопротивлением провода катушки подобранным так, чтобы пренебречь эффектом от его собственного нагрева, рис. 5а. Количество ампер-витков и частота тока (1000 Гц) были подобраны для обеспечения нагрева фибры не более чем 90 градусов (соответствующая напряженность магнитного поля 30000 А/м). Необходимо отметить, что источником тепла в этом случае служит именно сама фибра, так как индукционный ток в зоне контакта и в окружающей фибру бетонной смеси пренебрежимо мал. Поэтому существенно прогревается лишь половина образца, рис. 5б.

В работе [8] показано, что индукционный прогрев сталефибробетонных изделий целесообразен только при использовании источников переменного тока с частотой не менее 1000 Гц. При меньших значениях частоты необходимо значительное увеличение силы тока в обмотке и КПД (отношение мощности индукционного тока к полной потребляемой мощности) таких установок становится менее 50 %. Однако в строительном производстве не применяются мощные источники переменного тока подобной частоты. Поэтому, в настоящее время практическая реализация индукционного прогрева фибробетонных изделий сталкивается с большими сложностями.

а) 

б)

Рисунок 5. *Распределение температуры при индукционном прогреве: а) картина изотерм в образце; б) зависимость температуры от расстояния до волокна (составлено автором)*

Заключение

Результаты моделирования позволяют детально исследовать явления, происходящие при электропрогреве сталефибробетона и изучить возможность его практического применения. Значения эффективных удельной проводимости и коэффициента теплопроводности сталефибробетона с равномерным распределением фибры могут быть аппроксимированы линейными зависимостями. Они увеличиваются с ростом коэффициента армирования и коэффициента ориентации волокон. Наиболее значительный вклад в проводимость и теплопроводность вносит контактный слой фибра-бетон.

При электродном прогреве значительная часть тока идет через стальные волокна, что приводит к их быстрому нагреву до температуры на 20–30 градусов, превышающей среднюю температуру смеси. Рекомендуемое усредненное по сечению изделия значение плотности тока не более 250 А/м^2. При этом удельное тепловыделение, усредненное по прогреваемой части изделия, составляет не более 140 кВт/м^3. Время выхода на стационарный режим около 1 минуты. Ввиду изменения физических свойств смеси в процессе твердения, необходимо проводить контроль температуры в течение всего времени прогрева. Поскольку дисперсное армирование не приводит к резкому изменению усредненной теплопроводности бетона, технология прогрева фибробетона греющими проводами принципиально не должна отличаться от технологии прогрева неармированного бетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гнам П.А. Технологии зимнего бетонирования в России / П.А. Гнам, Р.К. Кивихарью // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 9. – С. 7–25.
2. Попов Ю.А. Управляемые температурные режимы тепловой обработки бетона при зимнем бетонировании монолитных строительных конструкций / Ю.А. Попов, С.Н. Андриевский, Ю.В. Лунев, В.В. Молодин, А.С. Суханов, М.М. Титов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2010. – № 4.– С. 77–91.
3. Зарубин В.С. Математическое моделирование электропроводности диэлектрика с дисперсными металлическими включениями / В.С. Зарубин, Г.Н. Кувыркин, О.В. Пугачёв // Математика и математическое моделирование. – 2015. – № 3. – С. 59–72.
4. Янковский А.П. Моделирование процессов теплопроводности в пространственно армированных композитах с произвольной ориентацией волокон / А.П. Янковский // Прикладная физика. – 2011. – № 3. – С. 32–38.
5. Янковский А.П. Численно-аналитическое моделирование процессов теплопроводности в пространственно-армированных композитах при интенсивном тепловом воздействии / А.П. Янковский // Тепловые процессы в технике. – 2011. – Т. 3, № 11. – С. 500–516.
6. Леснов В.В. Исследование электропроводности дисперсно-армированных каркасных композитов / В.В. Леснов, В.Т. Ерофеев, Р.Н. Салимов // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2015. – 4. – С. 85–87.
7. Матус Е.П. Электропроводность и электроразогрев сталефибробетонной смеси / Е.П. Матус // Известия Вузов. Строительство. – 2007. – № 1. – С. 60–64.
8. Матус Е.П. Индукционный прогрев сталефибробетона / Е.П. Матус, Л.В. Глазкова // Известия Вузов. Строительство. – 2007. – № 10. – С. 102–105.
9. Матус Е.П. Взаимодействие сталефибробетона с радиоволнами / Е.П. Матус // Известия ВУЗов. Строительство, 2009, №11–12, с. 97–100.
10. Матус Е.П. Прохождение радиоволн через сталефибробетон / Е.П. Матус // Сборник международного семинара АТАМ: Строительные и отделочные материалы. Стандарты XXI века, 2006, с. 140–142.
11. Заболотько С.А. Использование программного комплекса ELCUT-EXEL для расчета индукционной нагревательной установки / С.А. Заболотько, К.С. Андреева, А.Н. Проценко // В сборнике материалов международной научно-практической конференции: Вопросы образования и науки. – 2017. – С. 43–44.
12. Дудин М.О. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом / М.О. Дудин, Н.И. Ватин, Ю.Г. Барабанщиков // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – №2. – С. 33–45.
13. Зарубин В.С. Теплопроводность композита, армированного волокнами / В.С. Зарубин, Г.Н. Кувыркин, И.Ю. Савельева // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013.– № 5. – С. 75–81.
14. Roussel N., Laetitia M., Franc J. Fiber orientation during casting of UHPFRC: electrical resistivity measurements, image analysis and numerical simulations // Materials and Structures, 2015, No. 48, P. 947–957.

Matus Evgeniy Petrovich
Novosibirsk state university of architecture and civil engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia
E-mail: matus_evg@mail.ru

Numerical modeling of electric heating of fiber reinforced concrete with high conductivity fibers

Abstract. The heating of dispersion-reinforced concrete with steel fibers by electrical current is considered. The finite-element method is used to solve the problem of current density distribution in a fragment of a steel fiber concrete mixture. It is shown that the contact layer of fiber-concrete makes a significant contribution to the averaged electrical conductivity. More than 50 % of the total current goes through the reinforcing fibers. The electrical conductivity of the mixture increases almost in proportion to the coefficient of reinforcement. When reinforcing 2 % by volume, a increase of 2–3 times, depending on the choice of properties of the contact layer. Experimental data confirming the above dependence are given. Also, a solution was obtained for the problem of heat distribution in a fragment of a steel-fiber-concrete mixture in stationary and non-stationary modes of external heating and electrode heating. It is shown that the average coefficient of heat conduction increases in proportion to the coefficient of reinforcement. Comparison with experimental data shows a significant effect on the thermal conductivity of the contact layer. Significant heat release in the area of the contact zone and in the fiber leads to an excess of temperature in these zones by 20–30 degrees in the stationary mode. Heating of the contact zone should not exceed the boiling point of water in the mixture. Such a thermal regime can be provided at an average current density in the range of 200–250 A/m^2. The average specific heat is 100–140 kW/m^3. The temperature distribution in fiber-reinforced concrete during induction heating is also considered. In this case, it is necessary to significantly increase the frequency of the current used. The results of the study can be used in the appointment of modes of electric heating of products from dispersion-reinforced concrete, as well as when calculating the conductivity and thermal conductivity of such materials.

Keywords: fiber reinforced concrete; steel fibers; concrete heating; electric heating; induction heating of concrete; current density; temperature distribution; numerical simulation; finite element method