

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВА БАЗАЛЬТОВОЙ ФИБРЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

К. Ю. Беломесова¹, И. П. Павлова²

¹ Магистр технических наук, исследователь, заместитель декана по воспитательной работе архитектурно-строительного факультета УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: kbelomesova@mail.ru

² К. т. н., доцент, декан архитектурно-строительного факультета УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: pavlinna@tut.by

Реферат

В материале статьи отражены результаты параметрических исследований дисперсно-армированных базальтовой фиброй цементных композитов, на основе расширяющихся вяжущих, а также представлены результаты верификации расчетной модели, позволяющей определить количество базальтовой фибры необходимое для получения дисперсно-армированных цементных композитов с требуемыми жесткостными характеристиками. В основе предлагаемой модели лежит рассмотрение цементного композита как четырехкомпонентного материала, состоящего из заполнителя, цементной матрицы с условно выделенной из нее транзитной зоной, и фибры. В модели применены основные положения теории эффективной среды с учетом влияния свойств транзитной зоны.

Предложенная модель позволяет учитывать влияние состава напрягающего бетона, а также свойства его компонентов на требуемое для оптимизации структуры количество базальтовой фибры.

Ключевые слова: напрягающий бетон, транзитная зона, дисперсное армирование, базальтовая фибра, модуль упругости, теория эффективной среды.

ANALYTICAL MODEL FOR CALCULATING THE AMOUNT OF BASALT FIBER TO PRODUCE DISPERSION-REINFORCED CONCRETE WITH AN OPTIMAL STRUCTURE. PARAMETRIC STUDIES AND VERIFICATION OF THE MODEL

K. Y. Belamesava, I. P. Paulava

Abstract

The paper reflects the results of parametric studies of dispersed basalt fiber-reinforced cement composites based on expanding binders, and also presents the results of verification of the calculation model that allows to determine the amount of basalt fiber necessary to obtain dispersed-reinforced cement composites with the required stiffness characteristics. The proposed model is based on the consideration of cement composite as a four-component material consisting of aggregate, cement matrix with a transit zone conditionally separated from it, and fiber. In the model the basic provisions of the theory of effective medium are applied taking into account the influence of the properties of the transit zone.

The proposed model allows taking into account the influence of the mix of the self-stressing concrete, as well as the properties of its components on the amount of basalt fiber required to optimize the structure.

Keywords: stressed concrete, transit zone, dispersed reinforcement, basalt fiber, elastic modulus, theory of effective medium.

Введение

В ранее опубликованной статье [1, с. 28] представлены основные положения расчетной аналитической модели, позволяющей определить количество базальтовой фибры, необходимое для получения дисперсно-армированных цементных композитов оптимальной структуры. В качестве базовой модели принята модель композитной системы, жесткостные параметры которой рассчитываются с учетом положений дифференциальной теории эффективной среды.

Расчетная модель. Основные параметры

Основные положения базовой модели базируются на положениях, опубликованных в работе [2, с. 82]. Далее модель предлагается модифицировать с учетом появления в рассматриваемой композитной системе базальтовой фибры.

В основе базовой модели лежит рассмотрение цементного композита как трехкомпонентного материала, состоящего из заполнителя, цементной матрицы и расположенной между ними транзитной зоны. Ввод в систему третьей компоненты – транзитной зоны – обусловлен необходимостью учета специфики структурообразования расширяющейся композитной системы. При этом транзитная зона, являясь частью цементного камня, формирует совместно с зерном заполнителя т. н. «эффективный» заполнитель [1, с. 86].

Предложенная в данной работе модифицированная модель позволяет оценить введение еще одного компонента, а именно – базальтовой фибры.

В данной работе использована рабочая гипотеза, согласно которой количество базальтовой фибры должно назначаться исходя из условия достижения дисперсно-армированной базальтовой фиброй цементной матрицей жесткостных характеристик тождественных

жесткостным характеристикам «эффективного» заполнителя при реальной концентрации последнего в бетоне, что позволит реализовать принцип макроскопической однородности системы.

При построении структурной модели расширяющегося дисперсно-армированного базальтовой фиброй цементного композита были приняты некоторые предпосылки и допущения, подробно описанные в ранее опубликованной статье.

На рисунке 1 схематически представлена схема трансформации композитной системы в соответствии с положениями ТЭС.

На рисунке 1 K , G , c – соответственно объемный модуль, модуль сдвига и концентрация:

i_d – эффективный заполнитель;

m – цементная матрица;

o – бетон без базальтовой фибры;

o' – бетон с дисперсным армированием базальтовой фиброй.

Параметрические исследования дисперсно-армированных базальтовой фиброй цементных композитов

Укрупненная блок-схема расчета количества базальтовой фибры для дисперсного армирования цементных композитов в соответствии с положениями разработанной теоретической структурно-механической модели представлена на рисунке 2. При анализе моделируемой системы были приняты следующие варьируемые параметры:

1) удельная поверхность заполнителя $S_{уд}$. Удельную поверхность заполнителя $S_{уд}$ варьировали в пределах от 0,5 до 5,0 м²/кг;

2) концентрация заполнителя c_{agg} . Параметрические исследования проводили при начальной концентрации $c_{agg} = 0,05$ и для реальных концентраций $c_{agg} = 0,4; 0,5; 0,6;$ и $0,7$ соответственно.

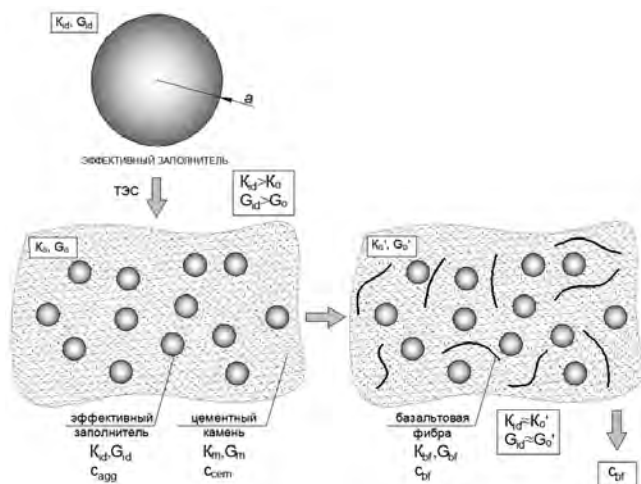


Рисунок 1 – Трансформация композитной системы для определения концентрации вводимой фибры

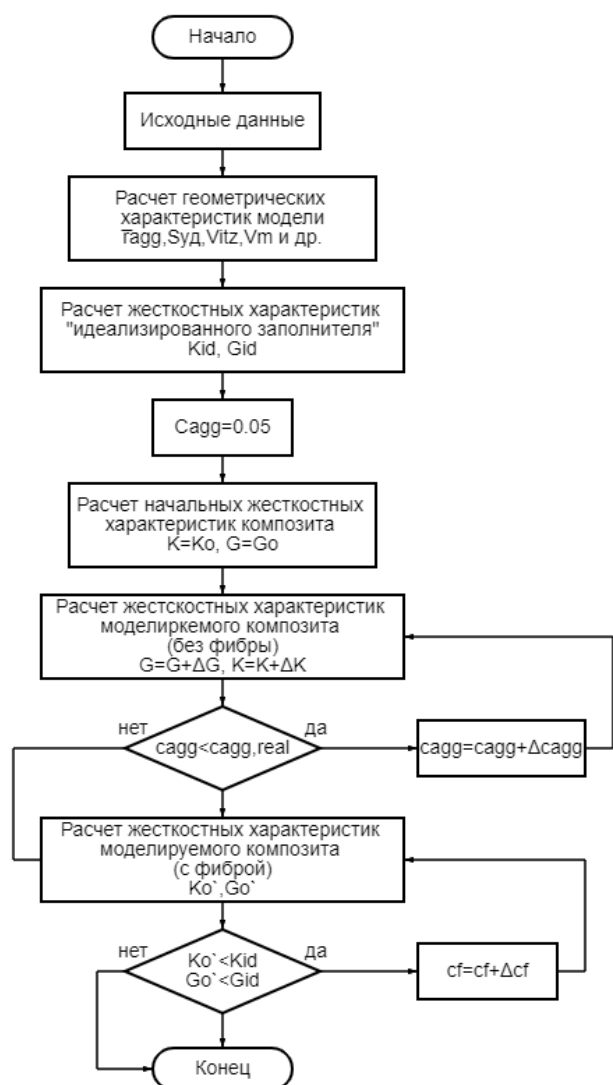


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма расчета количества базальтовой фибры для дисперсного армирования цементных композитов

При выполнении параметрических исследований неизменными были следующие параметры:

1. Толщина транзитной зоны δ_{tz} . Параметрические исследования проводили при величине транзитной зоны $\delta_{tz} = 50 \mu\text{m}$. Принятый размер толщины транзитной зоны подтверждается эксперименталь-

ными исследованиями микроструктуры [2–11] и является наиболее распространенным для цементных композитов.

2. Геометрические параметры базальтовой фибры: $d_f = \text{const}$; $l_f = \text{const}$.

При анализе моделируемой системы и назначении ее геометрических характеристик необходимо оценить реальный объем цементной матрицы. На рисунке 3 представлен график изменения относительной толщины прослойки цементной матрицы V_{cm} в моделируемой композитной системе в зависимости от удельной поверхности заполнителя $S_{уд,agg}$ при его различной объемной концентрации C_{agg} .

Если для начальной концентрации $C_{agg} = 0,05$ величина V_{cm} колеблется в пределах от 0,95 до 0,93, то для реальных объемных концентрация заполнителя в бетоне $C_{agg} = 0,4–0,7$ стремится к нулю с ростом концентрации C_{agg} и удельной поверхности заполнителя.

Как указывалось ранее, в основе базовой модели лежит рассмотрение цементного композита как трехкомпонентного материала, состоящего из заполнителя, цементной матрицы и расположенной между ними транзитной зоны. Поэтому при моделировании композитной системы учитывалось количество транзитной зоны и ее жесткостные параметры. Причем объем последней является одним из основных геометрических параметров, оказывающих влияние на жесткостные характеристики «эффективного» заполнителя. В работе [11] отмечается, что, начиная с граничной объемной концентрации заполнителя $C_{agg} = 0,29$, в структуре бетона наблюдается явление полной перколяции транзитных зон. Так как реальный бетон в своем составе содержит изначально большее количество заполнителя, объем транзитной зоны необходимо определять с учетом перколированных участков.

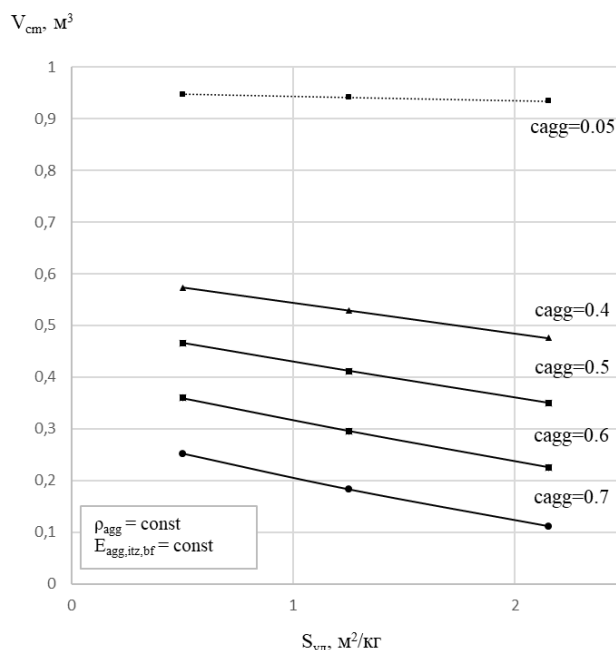


Рисунок 3 – График изменения относительной толщины прослойки цементной матрицы V_{cm} в зависимости от удельной поверхности заполнителя $S_{уд,agg}$ при его различной объемной концентрации C_{agg}

На рисунке 4 представлен график изменения объема транзитной зоны V_{tz} в моделируемом композите в зависимости от удельной поверхности заполнителя $S_{уд}$ при его различной объемной концентрации C_{agg} .

Как видно из рисунка 4, если для $C_{agg} = 0,05$ графики идентичны (при такой объемной концентрации заполнителя перколяция не наблюдается), то для реальных объемных концентраций ($C_{agg} = 0,5–0,8$), особенно с ростом удельной поверхности $S_{уд}$, возникают ощутимые отличия (реальный объем транзитных зон в бетоне будет несколько меньше, чем рассчитанный без учета перколяции). Поэтому, при реальной концентрации включений от 0,5 до 0,8 и удельной поверхности $S_{уд} \geq 2 \text{ m}^2/\text{kg}$, необходимо учитывать перколяцию транзитных зон.

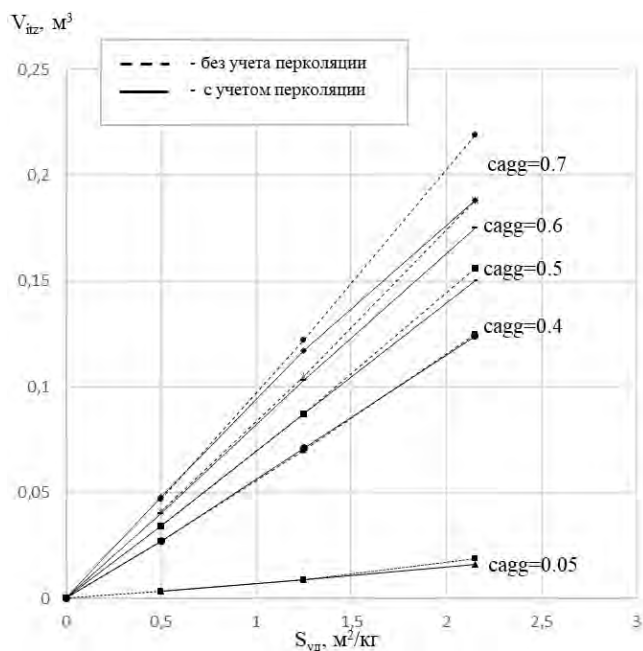


Рисунок 4 – График изменения объема транзитной зоны V_{itz} в моделируемом композите в зависимости от удельной поверхности заполнителя при его различной объемной концентрации

В соответствии с рабочей гипотезой, количество базальтовой фибры должно назначаться исходя из условия достижения дисперсно-армированной базальтовой фиброй цементной матрицей жесткостных характеристик тождественных жесткостным характеристикам «эффективного» заполнителя при реальной концентрации последнего в бетоне, что позволит реализовать принцип макроскопической однородности системы. На рисунке 5 представлен график изменения количества базальтовой фибры в моделируемом композите в зависимости от удельной поверхности заполнителя $S_{уд,agg}$ и его различной объемной концентрации C_{agg} .

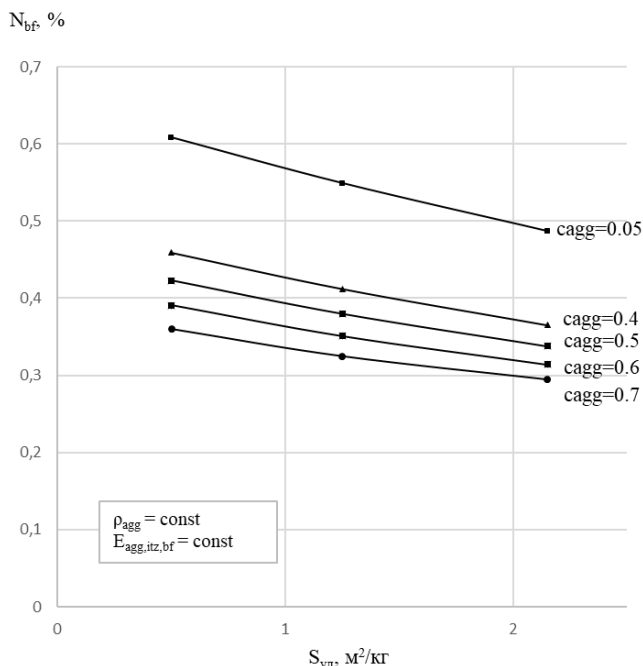


Рисунок 5 – График изменения количества базальтовой фибры в моделируемом композите в зависимости от удельной поверхности заполнителя при его различной объемной концентрации

При построении графика неизменными были следующие параметры:

- средняя плотность заполнителя $C_{agg} = \text{const}$;
- модуль упругости заполнителя, транзитной зоны и базальтовой фибры $E_{agg, itz, bf} = \text{const}$.

Как видно из рисунка 5, при увеличении удельной поверхности и объемной концентрации заполнителя ($C_{agg} = \text{const}$; $E_{agg, itz, bf} = \text{const}$) количество базальтовой фибры необходимой для достижения дисперсно-армированной базальтовой фиброй цементной матрицей жесткостных характеристик тождественных жесткостным характеристикам «эффективного» заполнителя снижается.

При этом на рисунке 6 ясно видно, как предлагаемая модель гибко реагирует на изменение одного из входных параметров. Так, например, при изменении модуля упругости заполнителя E_{agg} количество базальтовой фибры, необходимой для выполнения главного условия рабочей гипотезы, увеличивается. Значение C_{agg} ; $S_{уд,agg}$ соответствуют значениям реального бетона.

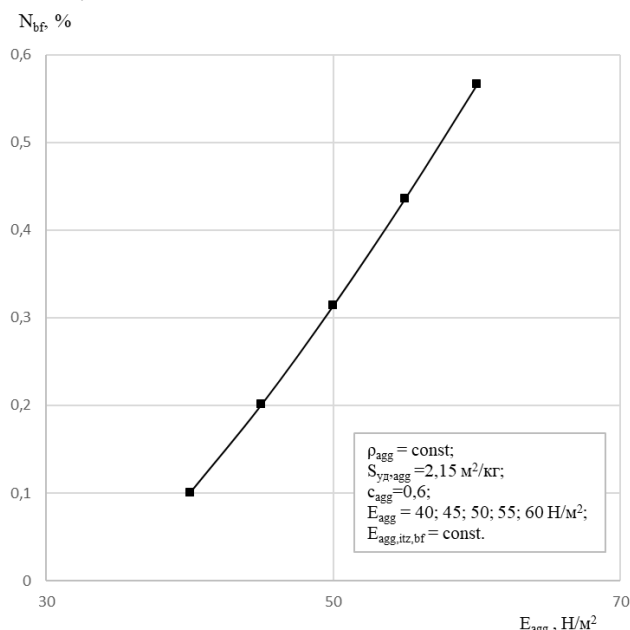


Рисунок 6 – График изменения количества базальтовой фибры в моделируемом композите в зависимости от модуля упругости заполнителя при $\rho_{agg} = \text{const}$; $S_{уд,agg} = 2,15 \text{ м}^2/\text{кг}$; $C_{agg} = 0,6$; $E_{agg,itz,bf} = \text{const}$

Верификация предложенной модели для определения количества базальтовой фибры выполнена путем сравнения рассчитанных значений и опытных данных полученных в работах зарубежных авторов и собственных исследованиях на примере мелкозернистого бетона. Основные статистические характеристики предложенной структурной модели дисперсно-армированного базальтовой фиброй расширяющегося композита предложены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты верификации модели

Прогнозируемая характеристика	Статистические характеристики		
	b	Δ	V_δ
Дозировка базальтовой фибры	0,606	0,0021	0,077

Примечание – Основные статистические характеристики модели определены по формулам в работе [1, с. 134].

Как следует из анализа статистических характеристик расчетной модели, последняя имеет незначительную величину коэффициента вариации ошибки моделирования $V_\delta = 7,7 \%$. Расчетные и экспериментальные значения количества базальтовой фибры для получения дисперсно-армированного напрягающего бетона оптимальной структуры показали удовлетворительную согласованность, подтверждающую справедливость принятых положений в рамках предлагаемой модели.

Заключение

Разработана аналитическая модель, позволяющая определить количество базальтовой фибры, вводимой в цементную систему, представляющая собой четырехкомпонентную систему, состоящую из заполнителя, цементной матрицы и расположенной между ними транзитной зоны и фибры.

Количество базальтовой фибры назначается исходя из условия достижения дисперсно-армированной базальтовой фиброй цементной матрицей жесткостных характеристик тождественных жесткостным характеристикам «эффективного» заполнителя (заполнитель с транзитной зоной вокруг него) при реальной концентрации последнего в бетоне, что позволит реализовать принцип макроскопической однородности системы.

Разработанная аналитическая модель применима для любых составов напрягающего бетона. Расчетные и экспериментальные значения количества базальтовой фибры для получения дисперсно-армированного напрягающего бетона оптимальной структуры показали удовлетворительную согласованность, подтверждающие справедливость принятых положений в рамках предлагаемой модели.

Список цитированных источников

- Беломесова, К. Ю. Аналитическая модель расчета количества базальтовой фибры для получения дисперсно-армированного напрягающего бетона оптимальной структуры / К. Ю. Беломесова, И. П. Павлова // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2023. – № 1. – С. 27–31. – <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2023-33-1-27-31>.
- Павлова, И. П. Прогнозирование собственных деформаций и напряжений напрягающего бетона на основе структурно-механической модели расширяющегося композита : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / И. П. Павлова. – Брест, 2005. – 159 с.
- Paulava, I. Dependence of concrete strength on different methods of basalt fiber adding / I. Paulava, K. Belamesava // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС ; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 63–75.
- Тур, В. В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона / В. В. Тур. – Брест : БПИ, 1998. – 244 с.
- Коротких, Д. Н. Многоуровневое дисперсное армирование структуры мелкозернистого цементного бетона и повышение его трещиностойкости : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Д. Н. Коротких. – Воронеж, 2001. – 188 с.
- Титов, М. Ю. Бетоны с компенсированной усадкой на расширяющих добавках: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 05.23.05 / М. Ю. Титов ; НИИЖБ им. А. А. Гвоздева. – М., 2012. – 22 с.
- Потапова, Ю. И. Структура и свойства бетонов с двухстадийным расширением: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 05.23.05 / Ю. И. Потапова. – Ростов-на-Дону, 2015. – 254 с.
- Павлова, И. П. Зависимость прочности бетона от метода введения базальтовой фибры / И. П. Павлова, К. Ю. Беломесова // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Институт БелНИИС ; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 63–75.
- Михайлов, В. В. Напрягающий цемент / В. В. Михайлов // Труды совещания по химии цемента. – М. : Промстройиздат, 1956. – 120 с.
- Lu, B. Nearest-surface distribution functions for polydispersed particle system / Lu Binglin, S. Torquato // Physical Review A. – 1992. – Vol. 45, Iss. 8. – P. 5530–5544. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.5530>.
- Garboczi, E. J. Computer Modeling of Interfacial Transition Zone: Microstructure and Properties [Electronic resource] / E. J. Garboczi, D. P. Bentz // RILEM Report. – 1999. – № 20, Part 5, Chapter 20. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/239823312_Computer_Modelling_of_Interfacial_Transition_Zone_Microstructure_and_Properties. – Date of access: 20.02.2024.
- Garboczi, E. J. Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations [Electronic resource] / E. J. Garboczi, J. G. Berryman // Mechanics of Materials. – 2001. – Mode of access: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860258. – Date of access: 20.02.2024.
- Giordano, S. Differential schemes for the elastic characterization of dispersions of randomly oriented ellipsoids / S. Giordano // European Journal of Mechanics – A/Solids. – 2003. – Vol. 22, Iss. 6. – P. 885–902. – [https://doi.org/10.1016/S0997-7538\(03\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0997-7538(03)00091-3).

References

- Belomesova, K. YU. Analiticheskaya model' rascheta kolichestva bazal'tovoy fibry dlya polucheniya dispersno-armirovannogo napryagayushchego betona optimal'noy struktury / K. YU. Belomesova, I. P. Pavlova // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo univer-siteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – 2023. – № 1. – S. 27–31. – <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2023-33-1-27-31>.
- Pavlova, I. P. Prognozirovanie sobstvennykh deformatsij i napryazhenij napryaga-yushchego betona na osnove strukturno-mekhanicheskoy modeli rasshiryayushchegosya kompozita : dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / I. P. Pavlova. – Brest, 2005. – 159 s.
- Paulava, I. Dependence of concrete strength on different methods of basalt fiber adding / I. Paulava, K. Belamesava // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona : sb. nauch. tr. / In-t BelNIIS ; redkol.: O. N. Leshkevich [i dr.]. – Minsk, 2019. – Vyp. 11. – S. 63–75.
- Tur, V. V. Eksperimental'no-teoreticheskie osnovy predvaritel'nogo napryazheniya konstrukcij pri primenenii napryagayushchego betona / V. V. Tur. – Brest : BPI, 1998. – 244 s.
- Korotkih, D. N. Mnogourovnevoe dispersnoe armirovanie struktury melkozerni-stogo cementnogo betona i povyshenie ego treshchinostojkosti : dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / D. N. Korotkih. – Voronezh, 2001. – 188 s.
- Titov, M. YU. Betony s kompensirovannoj usadkoj na rasshiryayushchih dobavkah: av-toref. dis. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tekhn. nauk : 05.23.05 / M. YU. Titov ; NIIZHB im. A. A. Gvozdeva. – M., 2012. – 22 s.
- Potapova, YU. I. Struktura i svojstva betonov s dvuhstadijnym rasshireniem: dis. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / YU. I. Potapova. – Rostov-na-Donu, 2015. – 254 s.
- Pavlova, I. P. Zavisimost' prochnosti betona ot metoda vvedeniya bazal'tovoy fibry / I. P. Pavlova, K. YU. Belomesova // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona : sb. nauch. tr. / Institut BelNIIS ; redkol.: O. N. Leshkevich [i dr.]. – Minsk, 2019. – Vyp. 11. – S. 63–75.
- Mihajlov, V. V. Napryagayushchij cement / V. V. Mihajlov // Trudy soveshchaniya po hi-mii cementa. – M. : Promstrojizdat, 1956. – 120 s.
- Lu, B. Nearest-surface distribution functions for polydispersed particle system / Lu Binglin, S. Torquato // Physical Review A. – 1992. – Vol. 45, Iss. 8. – P. 5530–5544. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.5530>.
- Garboczi, E. J. Computer Modeling of Interfacial Transition Zone: Microstructure and Properties [Electronic resource] / E. J. Garboczi, D. P. Bentz // RILEM Report. – 1999. – № 20, Part 5, Chapter 20. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/239823312_Computer_Modelling_of_Interfacial_Transition_Zone_Microstructure_and_Properties. – Date of access: 20.02.2024.
- Garboczi, E. J. Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations [Electronic resource] / E. J. Garboczi, J. G. Berryman // Mechanics of Materials. – 2001. – Mode of access: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860258. – Date of access: 20.02.2024.
- Giordano, S. Differential schemes for the elastic characterization of dispersions of ran-domly oriented ellipsoids / S. Giordano // European Journal of Mechanics – A/Solids. – 2003. – Vol. 22, Iss. 6. – P. 885–902. – [https://doi.org/10.1016/S0997-7538\(03\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0997-7538(03)00091-3).

Материал поступил 13.06.2024, одобрен 08.07.2024, принят к публикации 09.07.2024