

## СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 691.328.43:691.544

## СОБСТВЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И ЖЕСТКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРЯГАЮЩИХ БЕТОНОВ С БАЗАЛЬТОВОЙ ФИБРОЙ. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

К. Ю. Беломесова<sup>1</sup>, И. П. Павлова<sup>2</sup><sup>1</sup> Магистр технических наук, исследователь, заместитель декана по идеологической и воспитательной работе, Архитектурно-строительный факультет, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: kbelomesova@mail.ru<sup>2</sup> 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 напрягающих бетонов с базальтовой фиброй. В основе исследований 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. Во введении обозначена актуальность исследований. В качестве структурного компонента отдельно выделена транзитная зона. Указана специфика структурообразования и эффекты, сопровождающие формирование транзитной зоны. Предложены подходы по оптимизации свойств транзитной зоны, в т. ч. благодаря одновременному введению расширяющихся добавок на основе высокоосновного метакеолина и дисперсного армирования. В качестве дисперсного армирования выбрана базальтовая фибра как материал компатибельный с цементным камнем, обладающий повышенными адгезионными характеристиками.

Предложенная модель позволяет выявить требуемое для оптимизации структуры напрягающего бетона количество армирующего компонента – базальтовой фибры, которое имеет непостоянное значение, а варьируется в зависимости от изменения жесткостных характеристик как самой базальтовой фибры, так и всех компонентов, входящих в состав напрягающего бетона. В модели применены основные положения теории эффективной среды с учетом влияния свойств транзитной зоны.

**Ключевые слова:** напрягающий бетон, базальтовая фибра, модуль упругости, собственные деформации, теория эффективной среды.

## SELF-STRAINS AND STIFFNESS CHARACTERISTICS OF SELF-STRESS CONCRETE WITH BASALT FIBER. PARAMETRIC STUDIES

K. Y. Belamesava, I. P. Paulava

## Abstract

The article reflects the results of parametric studies of self-stressed concrete with basalt fiber. The research is based on the consideration of cement composite as a four-component material consisting of aggregate, cement matrix with a transition zone conditionally separated from it, and fiber. In the model the basic provisions of the Effective Medium Theory are applied taking into account the influence of properties of the transition zone. The introduction outlines the relevance of the research. The transit zone is singled out separately as a structural component. Specifics of structure formation and effects accompanying the formation of the transit zone are specified. Approaches to optimize the properties of the transit zone, including through the simultaneous introduction of expanding additives based on high-base metakaolin and disperse reinforcement, are proposed. As a disperse reinforcement basalt fiber as a material compatibilized with cement stone and having increased adhesion characteristics is chosen.

The proposed model makes it possible to reveal the amount of reinforcing component – basalt fiber - required to optimize the structure of self-stressed concrete, which has a non-constant value and varies depending on the change in the stiffness characteristics of both basalt fiber itself and all the components included in the self-stressed concrete. 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.

**Keywords:** self-stressed concrete, basalt fiber, elastic modulus, self-strains, Effective Medium Theory.

## Введение

В ранее опубликованной работе [1, с. 28] представлены основные положения, геометрические параметры и жесткостные характеристики элементов расчетной аналитической модели, позволяющей определять количество армирующего компонента – базальтовой фибры, необходимое для получения напрягающих дисперсно-армированных бетонов оптимальной структуры. Укрупненная блок-схема расчета количества базальтовой фибры в соответствии с положениями разработанной теоретической структурно-механической модели представлена на рисунке 1.

Как указывалось ранее [1, с. 28], в основе предлагаемой модели лежит рассмотрение цементного композита как четырехкомпонентного материала, состоящего из заполнителя, цементной матрицы и расположенной между ними транзитной зоны, а также фиброволокон. При моделировании композитной системы учитывались количество, жесткостные и геометрические параметры всех перечисленных выше компонентов. Начальные значения характеристик (геометрических и жесткостных) заполнителя и базальтовой фибры приведены в таблице 1.

При построении структурной модели расширяющегося цементного композита было принято, что цементный композит представляется в виде непрерывной матрицы (цементный камень), в теле которой дискретно расположен т. н. «эффективный» заполнитель, представляющий собой зерна заполнителя с оболочкой транзитной зоны вокруг.

Жесткостные параметры «эффективного» заполнителя зависят как от используемого вида заполнителя с деформативными характеристиками  $K_{agg}$ ,  $G_{agg}$ , так и от деформативных характеристик транзитной зоны  $K_{tz}$ ,  $G_{tz}$  ( $K_{st} = K_{agg} + K_{tz}$ ;  $G_{st} = G_{agg} + G_{tz}$ ). И если с деформативными характеристиками используемого заполнителя все очевидно, то значение модуля упругости транзитной зоны зависит от целого ряда факторов и исследуется уже на протяжении нескольких десятков лет.

На сегодняшний день приведенные в работах [2, 3] данные позволяют утверждать, что для традиционных бетонов отношение модуля упругости транзитной зоны  $E_{tz}$  к модулю упругости цементной матрицы  $E_m$  является непостоянным и колеблется в пределах от 0,5 до 0,55. Что касается напрягающих бетонов, то здесь отношение  $E_{tz}/E_m$ , в силу специфики микроструктурообразования транзитной зоны, и характеристик, используемых в качестве основных компонентов расширяющей добавки материалов (высокоактивный метакеолин, природный гипс), достигает значений 0,6–0,66.

На основе собственных данных, полученных в ходе экспериментальных исследований в качестве базового предлагается использовать состав напрягающего цемента, состоящего из портландцемента и сульфаталюминатной расширяющейся добавки (РД). В качестве алюминатной составляющей РД, содержащей в своем составе от 40 до 50 % оксида алюминия, был выбран высокоактивный метакеолин (ВМК). В качестве сульфатного компонента РД использован двуводный гипс (Г).

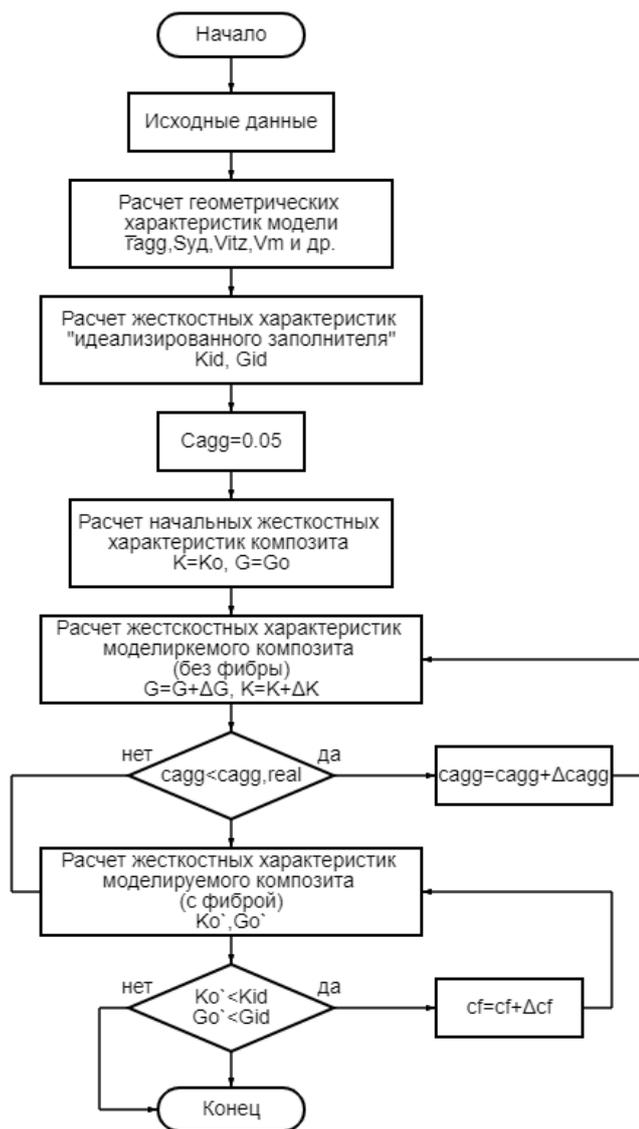


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма расчета количества базальтовой фибры для армирования напрягающих бетонов

Таблица 1 – Начальные значения характеристик заполнителя и базальтовой фибры

Параметр	Ед. изм.	Значение
<b>Заполнитель</b>		
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	2690
Коэффициент Пуассона	–	0,27
Модуль упругости	ГПа	50
<b>Базальтовая фибра</b>		
Плотность волокна	кг/м <sup>3</sup>	2800
Коэффициент Пуассона	–	0,25
Модуль упругости	ГПа	80
Диаметр монофиламента (отдельного волокна)	мкм	16
Длина волокна	мм	25,4

Высокоактивный метакаолин является искусственно изготовленной пуццолановой добавкой, обладающей наиболее высокой активностью среди имеющихся активных минеральных добавок [4, с. 28; 5, с. 22]. По своей природе метакаолин представляет продукт термической обработки мономинеральных каолиновых глин (Al<sub>2</sub>(OH)<sub>4</sub>[Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>] или Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O) в диапазоне 650–800 °С. Микронаполняющий эффект, проявляющийся благодаря применению высокоактивного метакаолина, способствует благоприятной упаковке

частиц в транзитной зоне, снижению эффекта стены [2], и как результат – уменьшению пористости транзитной зоны, что в свою очередь ведет к повышению плотности цементного композита, его водонепроницаемости, коррозионной стойкости и долговечности (бетона и конструкции в целом) [6].

По данным [6, с. 52] применение расширяющихся добавок, в состав которых входит метакаолин, позволяет наблюдать следующие эффекты: эффект наполнения благодаря колоссальной удельной поверхности (более 200000 см<sup>2</sup>/г), пуццолановый эффект благодаря высокому содержанию SiO<sub>2</sub> (около 60 %) и эффект 3D-армирования благодаря высокому содержанию алюминатов (около 40 %).

При чем данные эффекты протекают параллельно, накладываясь и усиливая друг друга, в результате чего достигается синергетический эффект.

Так для дальнейших расчетов было принято для традиционного бетона рассматривать отношение модуля упругости транзитной зоны E<sub>itz</sub> к модулю упругости цементной матрицы E<sub>m</sub>, равное 0,5, а для напрягающего бетона E<sub>itz</sub>/E<sub>m</sub>=0,66.

## 1. Параметрические исследования

### 1.1 Исходные данные

При анализе моделируемой системы были приняты следующие варьируемые параметры:

- удельная поверхность заполнителя S<sub>уд</sub>. Удельную поверхность заполнителя S<sub>уд</sub> варьировали в пределах от 1,5 до 7,5 м<sup>2</sup>/кг;
- концентрация заполнителя C<sub>agg</sub>. Параметрические исследования проводили для реальных концентраций C<sub>agg</sub> = 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 и 0,8 соответственно.

При выполнении параметрических исследований неизменными были следующие параметры:

- толщина транзитной зоны δ<sub>itz</sub>. Параметрические исследования проводили при величине транзитной зоны δ<sub>itz</sub> = 50 мкм. Принятый размер толщины транзитной зоны подтверждается экспериментальными исследованиями микроструктуры [2–19] и является наиболее распространенным для цементных композитов;
- геометрические и жесткостные характеристики базальтовой фибры: d<sub>f</sub>, l<sub>f</sub>, E<sub>bf</sub> = const (начальные значения указаны в таблице 1);
- модуль упругости и плотность заполнителя: E<sub>agg</sub>, ρ<sub>agg</sub> = const (начальные значения указаны в таблице 1);
- модуль упругости цементной матрицы: E<sub>m</sub> = const.

### 1.2 Результаты параметрических исследований и их анализ

На рисунках 2, 3 представлены нормализованные графики изменения модуля упругости «эффективного» заполнителя E<sub>id</sub> в моделируемом композите в зависимости от удельной поверхности заполнителя S<sub>уд</sub> при его различной объемной концентрации C<sub>agg</sub>.

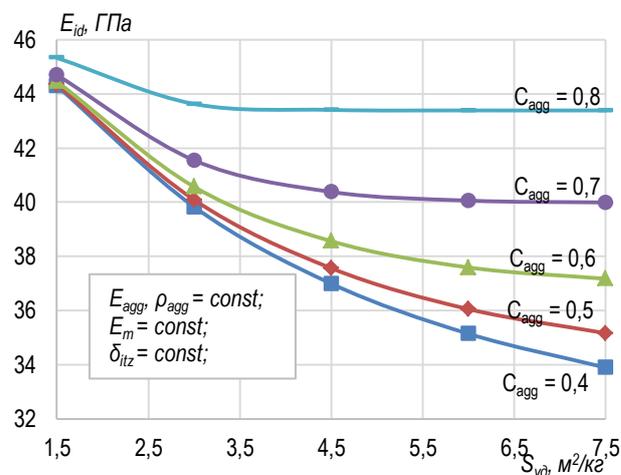
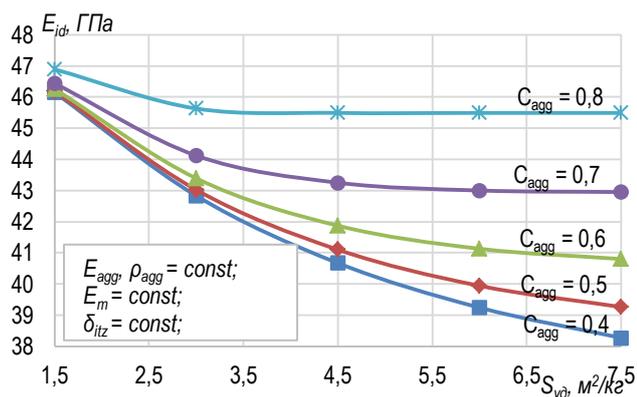


Рисунок 2 – Нормализованная зависимость изменения модуля упругости «эффективного» заполнителя E<sub>id</sub> в моделируемом композите от удельной поверхности заполнителя при его различной объемной концентрации (E<sub>itz</sub>/E<sub>m</sub> = 0,5)



**Рисунок 3** – Нормализованная зависимость изменения модуля упругости «эффективного» заполнителя  $E_{id}$  в моделируемом композите от удельной поверхности заполнителя при его различной объемной концентрации ( $E_{itz}/E_m = 0,66$ )

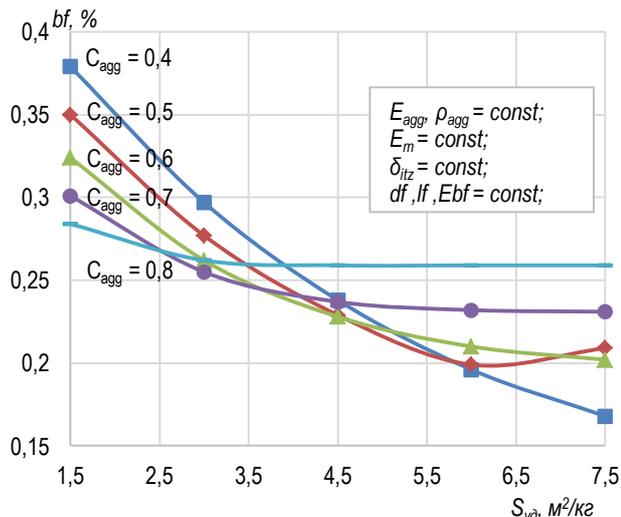
В обоих случаях ( $E_{itz}/E_m = 0,5$  и  $E_{itz}/E_m = 0,66$ ) с ростом объемной концентрации заполнителя  $C_{agg}$  в моделируемом композите при одинаковой удельной поверхности  $S_{y\delta}$  жесткостные характеристики «эффективного» заполнителя возрастают, что объясняется увеличением в системе элемента с более высокими жесткостными характеристиками.

При этом как в случае традиционного бетона (см. рисунок 2), так и в случае напрягающего бетона (см. рисунок 3) с ростом удельной поверхности наблюдается значительное снижение модуля упругости «эффективного» заполнителя, что, в свою очередь, объясняется резким увеличением объема транзитной зоны.

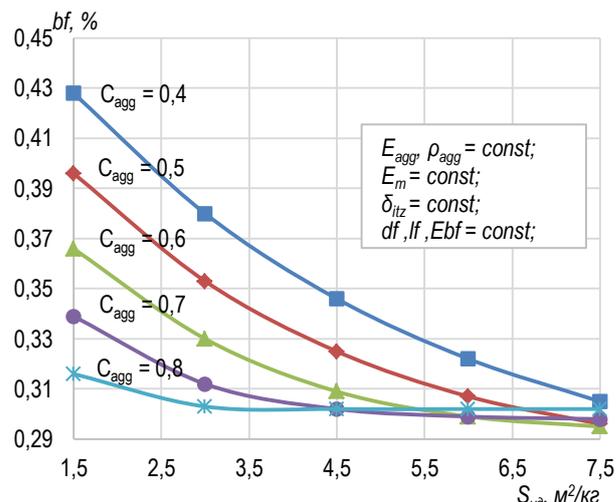
Изменение объема транзитной зоны  $V_{itz}$  (с учетом перколяции транзитных зон) в моделируемом композите в зависимости от удельной поверхности заполнителя  $S_{y\delta}$  при его различной объемной концентрации  $C_{agg}$  проиллюстрировано в работе [7, с. 51].

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.

Нормализованная зависимость количества базальтовой фибры от удельной поверхности «эффективного» заполнителя  $S_{y\delta}$  при его различной объемной концентрации  $C_{agg}$  показана на рисунке 4 (для традиционного бетона) при отношении  $E_{itz}/E_m = 0,5$  и на рисунке 5 (для напрягающего бетона) при отношении  $E_{itz}/E_m = 0,66$ .



**Рисунок 4** – Нормализованная зависимость изменения количества базальтовой фибры в моделируемом композите от удельной поверхности «эффективного» заполнителя при его различной объемной концентрации ( $E_{itz}/E_m = 0,5$ )



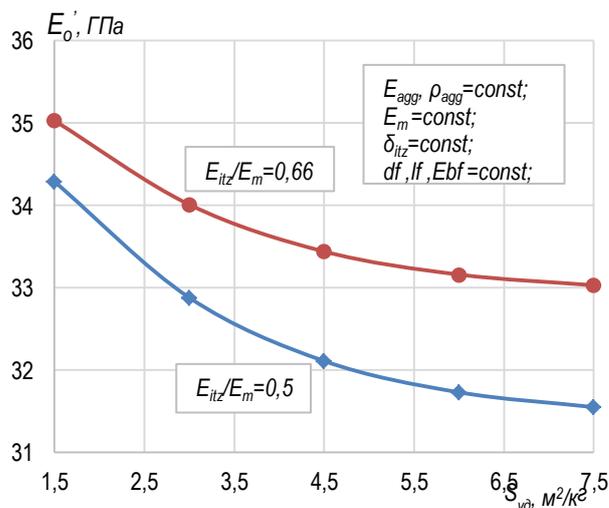
**Рисунок 5** – Нормализованная зависимость изменения количества базальтовой фибры в моделируемом композите от удельной поверхности «эффективного» заполнителя при его различной объемной концентрации ( $E_{itz}/E_m = 0,66$ )

С ростом объемной концентрации «эффективного» заполнителя  $C_{agg}$  в моделируемом композите при одинаковой удельной поверхности  $S_{y\delta}$  количество базальтовой фибры  $bf$ , необходимое для оптимизации структуры бетона, снижается как для случая напрягающего бетона (рисунок 4), так и для традиционного (рисунок 5), при этом количество фибры по отношению к количеству вяжущего резко возрастает.

Происходит это за счет двух параллельно протекающих процессов: увеличения модуля упругости бетона  $E_0$  с увеличением концентрации «эффективного» заполнителя с высокими жесткостными параметрами и уменьшения количества активной цементной матрицы, в которую вводится дисперсное волокно.

Что касается тенденции снижения модуля упругости бетона  $E_0$  с увеличением удельной поверхности заполнителя при реальных концентрациях последнего в бетоне, то данный факт объясняется увеличением общего объема и количества перколированных транзитных зон, которые в силу специфики микроструктурообразования ослабляют жесткостные параметры «эффективного» заполнителя как в случае традиционного бетона, так и в случае напрягающего бетона.

На рисунке 6 представлена нормализованная зависимость изменения модуля упругости бетона  $E_0$  от удельной поверхности «эффективного» заполнителя  $S_{y\delta}$  при его реальной объемной концентрации  $C_{agg} = 0,6$ .



**Рисунок 6** – Нормализованная зависимость изменения модуля упругости бетона  $E_0$  от удельной поверхности «эффективного» заполнителя  $S_{y\delta}$  при его реальной объемной концентрации  $C_{agg} = 0,6$

Предлагаемая модель предусматривает использование в качестве армирующего компонента не только базальтовой фибры с фиксированными характеристиками (геометрическими и жесткостными), но и любого вида минеральных (стеклянных) и полимерных (полипропиленовых) дисперсных волокон с различными геометрическими (длина, диаметр и др.) и жесткостными характеристиками.

Многообразие существующих видов волокон открывает возможность выбора того либо иного вида волокна исходя из поставленной задачи: повышения прочности при растяжении, стойкости к динамическим воздействиям, водонепроницаемости, истираемости, ударной вязкости и т. п.

Из наиболее востребованных на сегодняшний день неметаллических волокон можно выделить стеклянные, полипропиленовые, базальтовые, углеродные. Все перечисленные волокна различаются по своим основным свойствам, поэтому к решению вопросов их применения в качестве упрочняющих компонентов необходимо подходить дифференцированно [8, с. 19]. Высокомодульная фибра (стеклянная, базальтовая) является высокопрочной, в силу чего способна обеспечить значительное упрочнение фибробетона при значительном повышении трещиностойкости как за счет высокого соотношения модулей упругости фибры и бетона ( $E_f/E_c$ ), так и за счет высокого соотношения их прочностей ( $f_t/f_c$ ) [9, с. 22]. При этом фибробетон на основе высокомодульной фибры обладает повышенными значениями ударной стойкости, морозостойкости, водонепроницаемости и истираемости.

Низкомодульная фибра (полимерная), несмотря на то, что по жесткости ниже высокомодульной примерно на два десятичных порядка ( $E_f = 2 \dots 10$  ГПа), не теряет своей популярности и с успехом используется при устройстве промышленных бетонных полов, подвергаемых интенсивным статическим и динамическим нагрузкам, а также применяется в качестве армирующего компонента торкретбетона. Данный вид армирующих волокон (низкомодульная) обеспечивает в значительной мере снижение усадки, повышает ударную вязкость и морозостойкость бетона, в частности неавтоклавного пенобетона, обеспечивает водоудерживающую способность бетонной смеси [9, с. 22].

По мнению [10] для обеспечения эффективного использования того либо иного вида волокна в качестве армирующего компонента композитных систем должен быть соблюден ряд условий:

- предел прочности при растяжении применяемого волокна должен быть значительно выше чем у непрерывной матрицы (минимум в  $2 \div 3$  раза);
- прочность сцепления волокна и матрицы должна превышать прочность самой матрицы;
- модуль упругости волокна должен быть значительно выше модуля упругости матрицы (минимум в три раза);
- волокно не должно быть хрупким;
- значение коэффициента температурного линейного расширения должно быть таким же, как и у матрицы;
- матрица должна быть химически инертной по отношению к волокну.

### Заключение

Представленные выше данные и нелинейный характер изменения жесткостных параметров свидетельствуют о том, что предлагаемая расчетная модель гибко реагирует на изменение одного или нескольких входных параметров вполне применима как для традиционных, так и напрягающих бетонов.

На основании проведенных параметрических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Количество базальтовой фибры, необходимое для оптимизации структуры напрягающего бетона, зависит от ряда факторов, учитывающих как геометрическую, так и «механическую» стороны структурообразования. Применение модели для определения количества фибры является наиболее перспективным, поскольку позволяет достаточно гибко реагировать на изменение входных параметров, при этом избегая трудоемких и затянутых по времени опытов.

2. С ростом концентрации заполнителя в бетоне при одинаковой удельной поверхности последнего количество базальтовой фибры снижается, но соотношение «фибра/вяжущее» возрастает.

3. Нелинейный характер изменения жесткостных характеристик моделируемого композита (бетона) при варьировании объемной концентрации заполнителя, что обусловлено учетом как свойств транзитной зоны, так и количества перколированных зон в предложенной модели.

4. Применение заполнителя с менее развитой удельной поверхностью (увеличение модуля крупности песка, изменение соотношения между крупным и мелким заполнителем) при прочих равных условиях позволяет получить бетоны с более высоким значением жесткостных параметров, что обусловлено со снижением количества транзитных зон в бетоне.

### Список цитированных источников

1. 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. – DOI: 10.52928/2070-1683-2023-33-1-27-31.
2. 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 л.
3. 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.
4. Лукутцова, Н. П. Теоретические и технологические аспекты получения микро- и нанодисперсных добавок на основе шунгитосодержащих пород для бетона : монография / Н.П. Лукутцова, А. А. Пыкин. – Брянск : Изд-во БГИТА, 2013. – 231 с.
5. Кирсанова, А. А. Высокофункциональные тяжелые бетоны, модифицированные модифицированные комплексными добавками, включающими метакаолин : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / А. А. Кирсанова. – Брест, 2016. – 164 л.
6. Рекомендации по использованию ВМК производства ООО «СИНЕРГО». – URL: [http://metakaolin.ru/Documents/synergo\\_recommends.pdf](http://metakaolin.ru/Documents/synergo_recommends.pdf) (дата обращения: 07.03.2025).
7. Беломесова, К. Ю. Аналитическая модель расчета количества базальтовой фибры для получения дисперсно-армированного напрягающего бетона оптимальной структуры. параметрические исследования и верификация модели / К. Ю. Беломесова, И. П. Павлова // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 2 (134). – С. 49–52. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-49-52.
8. Рабинович, Ф. Н. Дисперсно-армированные бетоны / Ф. Н. Рабинович. – М. : Стройиздат, 1989. – 176 с.
9. Розина, В. Е. Мелкозернистый базальтофибробетон с нанокремнеземом : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / В. Е. Розина. – Улан-Удэ, 2015. – 146 л.
10. Löfgren, I. In-situ concrete building systems – Developments for industrial construction. Licentiate Thesis. Publication 02:2 / I. Löfgren // Department of Structural Engineering / Chalmers University of Technology. – Feb. 2002. – 138 p.
11. Тур, В. В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона / В. В. Тур. – Брест : БПИ, 1998. – 244 с.
12. 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 л.
13. 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 л.
14. 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 л.

15. 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. / Ин-т БелНИИС ; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 63–75. – DOI: 10.35579/2076-6033-2019-11-05.
16. Михайлов, В. В. Напрягающий цемент / В. В. Михайлов // Труды совещания по химии цемента. – М. : Промстройиздат, 1956. – 120 с.
17. 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. – DOI: 10.1103/PhysRevA.45.5530.
18. Garboczi, E. J. Computer Modeling of Interfacial Transition Zone: Microstructure and Properties / E. J. Garboczi, D. P. Bentz // RILEM Report №20, Part 5, Chapter 20. – 1999. – P. 349–385.
19. Garboczi, E. J. Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations / E. J. Garboczi, J. G. Berryman // Mechanics of Materials. – 2001. – P. 455–470.
20. Giordano, S. Differential schemes for the elastic characterization of dispersions of randomly oriented ellipsoids / S. Giordano // European Journal of Mechanics - A/Solids. 2023. – Vol. 22, Iss. 6. – P. 885–902. – DOI:10.1016/S0997-7538(03)00091-3.
8. Rabinovich, F. N. Dispersno-armirovannye betony / F. N. Rabinovich. – М. : Strojizdat, 1989. – 176 s.
9. Rozina, V. E. Melkozernistyj bazal'tofibrobeton s nanokremnezemom : dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / V. E. Rozina. – Ulan-Ude, 2015. – 146 l.
10. Löfgren, I. In-situ concrete building systems – Developments for industrial construction. Licentiate Thesis. Publication 02:2 / I. Löfgren // Department of Structural Engineering / Chalmers University of Technology. – Feb. 2002. – 138 p.
11. Tur, V. V. Eksperimental'no-teoreticheskie osnovy predvaritel'nogo napryazheniya konstrukcij pri primenenii napryagayushchego betona / V. V. Tur. – Brest : BPI, 1998. – 244 s.
12. Korotkih, D. N. Mnogourovnevoe dispersnoe amirovanie struktury melkozernistogo cementnogo betona i povyshenie ego treshchinostojkosti : dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / D. N. Korotkih. – Voronezh, 2001. – 188 l.
13. Titov, M. YU. Betony s kompensirovannoj usadkoj na rasshiryayushchih dobavkah: avtoref. dis. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tekhn. nauk : 05.23.05 / M. YU. Titov; NIIZHB im. A. A. Gvozdeva. – М., 2012. – 22 l.
14. Potapova, YU. I. Struktura i svoystva betonov s dvuhstadijnym rasshireniem: dis. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tekhn. nauk : 05.23.05 / YU. I. Potapova. – Rostov-na-Donu, 2015. – 254 l.
15. Pavlova, I. P. Zavisimost' prochnosti betona ot metoda vvedeniya bazal'tovoj fibry / I. P. Pavlova, K. YU. Belomesova // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona : sb. nauch. tr. / In-t BelNIIS ; redkol.: O. N. Leshkevich [i dr.]. – Минск, 2019. – Vyp. 11. – S. 63–75. – DOI: 10.35579/2076-6033-2019-11-05.
16. Mihajlov, V. V. Napryagayushchij cement / V. V. Mihajlov // Trudy soveshchaniya po himii cementa. – М. : Promstrojizdat, 1956. – 120 s.
17. 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. – DOI: 10.1103/PhysRevA.45.5530.
18. Garboczi, E. J. Computer Modeling of Interfacial Transition Zone: Microstructure and Properties / E. J. Garboczi, D. P. Bentz // RILEM Report №20, Part 5, Chapter 20. – 1999. – P. 349–385.
19. Garboczi, E. J. Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations / E. J. Garboczi, J. G. Berryman // Mechanics of Materials. – 2001. – P. 455–470.
20. Giordano, S. Differential schemes for the elastic characterization of dispersions of randomly oriented ellipsoids / S. Giordano // European Journal of Mechanics - A/Solids. 2023. – Vol. 22, Iss. 6. – P. 885–902. – DOI:10.1016/S0997-7538(03)00091-3.

### References

1. Belomesova, K. YU. Analiticheskaya model' rascheta kolichestva bazal'tovoj fibry dlya polucheniya dispersno-armirovannogo napryagayushchego betona optimal'noj struktury / K. YU. Belomesova, I. P. Pavlova // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – 2023. – № 1. – S. 27–31. – DOI: 10.52928/2070-1683-2023-33-1-27-31.
2. Pavlova, I. P. Prognozirovaniye sobstvennyh deformacij i napryazhenij napryagayushchego betona na osnove strukturno-mekhanicheskoy modeli rasshiryayushchegosya kompozita : dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / I. P. Pavlova. – Brest, 2005. – 159 l.
3. Paulava I. Dependence of concrete strength on different methods of basalt fiber addicting / I. Paulava, K. Belamesava // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona : sb. nauch. tr. / In-t BelNIIS; redkol.: O. N. Leshkevich [i dr.]. – Минск, 2019. – Vyp. 11. – S. 63–75.
4. Lukutcova, N. P. Teoreticheskie i tekhnologicheskie aspekty polucheniya mikro- i nanodispersnyh dobavok na osnove shungitosoderzhashchih porod dlya betona : monografiya / N. P. Lukutcova, A. A. Pykin. – Bryansk : Izd-vo BGITA, 2013. – 231 s.
5. Kirsanova, A. A. Vysokofunkcional'nye tyazhelye betony, modifitsirovannye modifitsirovannye kompleksnymi dobavkami, vklyuchayushchimi metakaolin: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / A. A. Kirsanova. – Brest, 2016. – 164 l.
6. Rekomendacii po ispol'zovaniyu VMK proizvodstva OOO «SINERGO». – URL: [http://metakaolin.ru/Documents/synergo\\_recommends.pdf](http://metakaolin.ru/Documents/synergo_recommends.pdf) (data obrashcheniya: 07.03.2025).
7. Belomesova, K. YU. Analiticheskaya model' rascheta kolichestva bazal'tovoj fibry dlya polucheniya dispersno-armirovannogo napryagayushchego betona optimal'noj struktury. parametricheskie issledovaniya i verifikaciya modeli / K. YU. Belomesova, I. P. Pavlova // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – № 2 (134). – S. 49–52. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-49-52.

*Материал поступил 31.03.2025, одобрен 02.05.2025, принят к публикации 02.05.2025*