

## Прогнозирование стойкости сталефибробетонов к термическому воздействию при различных параметрах дисперсного армирования

*А.В. Денисов, Д.В. Зайцев*

*Московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** В статье приводятся результаты расчетных исследований, являющихся частью комплексных исследований авторов по разработке методики прогнозирования стойкости сталефибробетонов к термическим воздействиям на объектах АЭС при различных параметрах дисперсного армирования. Исследования выполнены с использованием выбранных моделей для описания процессов термических деформаций и изменений важнейших свойств сталефибробетонов на основании полученных ранее экспериментальных и расчетных данных по термическим изменениям сталефибробетонов на оптимизированной цементно-песчаной матрице с пятью видами стальной фибры с объемным содержанием от 0,5% до 6% после нагревания при 110 – 1100 °С. На основании расчетов в соответствии с принятой гипотезой и выбранными моделями установлены зависимости термических изменений свойств сталефибробетонов относительно изменений матрицы от вычисленных изменений линейных размеров за счет образования трещин в фибробетоне. Установлены зависимости термических изменений линейных размеров сталефибробетонов за счет образования трещин от величины отношения расчетных нерелаксированных растягивающих структурных напряжений в матрице к прочности матрицы на растяжение. На основании выполненных исследований сформулирована методика прогнозирования термических деформаций, изменений массы, линейных размеров за счет образования трещин, прочности, водонепроницаемости сталефибробетонов, на основании термических деформаций и изменений свойств матрицы, параметров дисперсного армирования.

**Ключевые слова:** сталефибробетоны, прогнозирование стойкости к термическому воздействию, растрескивание, термические изменения линейных размеров и свойств.

### Введение

При возведении сборно-монолитных конструкций современных атомных станций стали применять панели несъемной опалубки из сталефибробетона [1, 2], как материала в виде цементно-песчаной матрицы, армированной стальными волокнами (фиброй) [3-5]. Однако к материалам железобетонных конструкций атомных станций предъявляют повышенные требования не только по прочности, трещиностойкости, водонепроницаемости, но и по стойкости к термическому воздействию. Это связано с тем, что данные конструкции за счет радиационного разогрева могут подвергаться термическому воздействию. Кроме того, для атомных станций большое значение имеют надежность материалов и конструкций при

воздействии пожара. В связи с этим, прогнозирование стойкости сталефибробетонов по отношению к термическому воздействию является достаточно важным.

Свойства, термические изменения, а значит, и термическая стойкость сталефибробетонов зависят от многих факторов, среди которых наиболее специфическими для фибробетонов являются параметры дисперсного армирования. Эти параметры (прежде всего вид и объемное содержание стальной фибры) оказывают влияние на все свойства сталефибробетонов [6-8], и должны влиять на их термические изменения. Однако, в литературе имеются данные по влиянию нагревания преимущественно на механические свойства сталефибробетонов и в основном в небольшом диапазоне объемного содержания и видов фибры. Так, имеются данные о термических изменениях сталефибробетонов с объемным содержанием 0,5-1,5% после 200-600 °С [9, 10], 0,5 – 7,5% после 100-600 оС [11, 12], 0,5 – 1,0% после 100-700 °С [13-15], 0,5 – 3% после 200-800 °С [16-18], 1% после 105-1200 °С [19], которых не достаточно для прогнозирования термических изменений сталефибробетонов.

В связи с этим, авторами настоящей работы проведены комплексные исследования с целью разработки на основании расчетно-экспериментальных исследований методики прогнозирования стойкости сталефибробетонов к термическим воздействиям на объектах АЭС, при различных параметрах дисперсного армирования.

При проведении исследований, для исключения влияния вариаций термических изменений матрицы было принято, что наиболее целесообразно исследовать влияние параметров дисперсного армирования на термические изменения сталефибробетонов относительно термических изменений их матрицы. Использовали рабочую гипотезу: прогнозирование стойкости сталефибробетонов к термическим воздействиям может быть выполнено на

---

основании стойкости к термическим воздействиям матрицы и параметров дисперсного армирования. При этом полагали, что влияние дисперсного армирования на термические изменения сталефибробетонов можно связать с зависимостью от этих параметров степени трещинообразования сталефибробетонов из-за различий термических деформаций фибры и матрицы вследствие выделения из матрицы воды.

Основные задачи этих исследований:

1 Выделить параметры, характеризующие стойкость сталефибробетонов к термическим воздействиям, при использовании в конструкциях атомных станций.

2 Обосновать и выбрать модели для аналитического описания процесса термических изменений свойств сталефибробетонов относительно изменений свойств матрицы с учетом параметров дисперсного армирования;

3 Разработать методику проведения исследований;

4 Экспериментально исследовать зависимости термических изменений сталефибробетонов от температуры нагревания при различном дисперсном армировании и от параметров дисперсного армирования при различных температурах нагревания для экспериментальной проверки и необходимости корректировки выбранных моделей;

5 Исследовать влияние фибры на плотность и термические изменения матрицы в составе сталефибробетонов.

6 Установить параметры, характеризующие растрескивание сталефибробетонов после воздействия нагревания и их влияние на термические изменения сталефибробетонов относительно термических изменений матрицы в составе сталефибробетонов с учетом влияния фибры на плотность и термические изменения матрицы;

7 Установить зависимости, характеризующие растрескивание сталефибробетонов под действием нагревания, от параметров дисперсного

---

армирования и температуры;

8 Проверить на основании обработки экспериментальных данных и выполнения расчетных исследований значимость и адекватность полученных аппроксимирующих зависимостей выбранных моделей;

9 Разработать методику прогнозирования термических изменений сталефибробетонов, характеризующих стойкость сталефибробетонов к термическому воздействию при различных параметрах дисперсного армирования.

При решении задачи № 1 как наиболее важные параметры и свойства сталефибробетонов при их использовании на объектах атомной энергетики для проведения исследований выбрано исследование изменений в результате термического воздействия плотности, линейных размеров, прочности при изгибе, водонепроницаемости, а также массы и скорости ультразвука.

Разработанная методика экспериментальных исследований при решении задачи № 3 и результаты экспериментальных исследований при решении задачи № 4 приведены в работах [20, 21].

Разработанная методика исследований при решении задачи № 5 и результаты расчетно-экспериментальных исследований при решении задачи № 4 приведены в работах [22, 23].

В настоящей работе представлены результаты расчетных исследований по решению задач № 6 – 8 по расчетному обоснованию методики прогнозирования стойкости сталефибробетонов к термическим воздействиям на объектах АЭС, при различных параметрах дисперсного армирования, как части указанных комплексных исследований.

### **Модели для аналитического описания процесса термических изменений свойств сталефибробетонов относительно изменений свойств матрицы**

При выборе моделей для аналитического описания процесса

---

термических изменений свойств сталефибробетонов относительно изменений свойств матрицы в соответствии с принятой выше рабочей гипотезой и известными данными о термических изменениях сталефибробетона и его составляющих принимали следующие общие положения и допущения:

- термические эффекты, происходящие в матрице без фибры, кроме термических деформаций, изменений массы и свойств можно не учитывать, так как термические изменения сталефибробетонов рассматриваются относительно изменений матрицы;

- термические эффекты, происходящие в фибре, кроме термических деформаций, можно не учитывать, так как остальные эффекты в фибре могут быть учтены в эмпирических параметрах моделей при их определении из экспериментальных данных для различных температур;

- влияние неравномерности температур по толщине конструкции можно не учитывать, так как размеры образцов минимизировали это влияние;

- считали, что трещины в сталефибробетонах, образующиеся вследствие появления структурных напряжений из-за разности термических деформаций матрицы и фибры, образуются в матрице в направлении, перпендикулярном фибре приблизительно равномерно с шагом  $l_{тр}$ , и каждая из трещин располагается между волокнами фибры;

- считали, что за счет образования этих трещин в матрице структурные напряжения значительно релаксируют, так как эти напряжения, особенно с учетом наличия в структуре концентраторов, значительно превышают прочность матрицы на растяжение и средние остаточные после релаксации напряжения незначительны;

- считали, что степень растрескивания сталефибробетонов наиболее удобно характеризовать величиной изменения линейных размеров за счет образования трещин.

---

В соответствии с этим для описания процесса уменьшения массы и плотности сталефибробетона под действием нагревания использовали модели, основанные на законе аддитивности массы и объема материалов, состоящих из нескольких компонентов.

При этом для определения относительного изменения массы и плотности сталефибробетонов получены выражения:

$$\left(\frac{\Delta M}{M}\right)_{\text{ФБ}} = \left(\frac{\Delta M}{M}\right)_{\text{МФБ}} \left(1 + \frac{\mu_{fv}/100 \cdot \gamma_{\text{Ф}}}{1 - \mu_{fv}/100 \cdot \gamma_{\text{МФБ}}}\right)^{-1} \quad (1)$$

$$\left(\frac{\Delta \gamma}{\gamma}\right)_{\text{ФБ}} = (1 - \mu_{fv}/100\%) \frac{\gamma_{\text{МФБ}}}{\gamma_{\text{ФБ}}} \left(\frac{\Delta \gamma}{\gamma}\right)_{\text{МФБ}} + 3 \left(\frac{\Delta \ell}{\ell}\right)_{\text{МФБ}} \frac{\gamma_{\text{МФБ}}}{\gamma_{\text{ФБ}}} - 3 \left(\frac{\Delta \ell}{\ell}\right)_{\text{ФБ}} \quad (2)$$

где  $\left(\frac{\Delta M}{M}\right)_{\text{ФБ}}$  и  $\left(\frac{\Delta M}{M}\right)_{\text{МФБ}}$  - термические изменения массы фибробетона и его матрицы, %

$\left(\frac{\Delta \gamma}{\gamma}\right)_{\text{ФБ}}$  и  $\left(\frac{\Delta \gamma}{\gamma}\right)_{\text{МФБ}}$  - термические изменения плотности фибробетона и его матрицы, %

$\gamma_{\text{ФБ}}$ ,  $\gamma_{\text{МФБ}}$  и  $\gamma_{\text{Ф}}$  - плотность фибробетона, его матрицы и его матрицы, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_{fv}$  - относительное объемное содержание фибры, %.

Для описания напряженно-деформированного состояния сталефибробетонов выбрали модель, описанную в работе [24] (Рис. 1), рассматривающую фибробетон в виде стержня фибры, окруженного оболочкой из матрицы. В этой модели рассчитывали представляющие основной интерес напряжения, действующие в матрице вдоль фибры. Хотя эти напряжения релаксируют за счет образования трещин, если превышают прочность материала на растяжение, они вызывают образование трещин, поэтому термические деформации сталефибробетонов за счет образования

трещин можно связать с величиной отношения этих напряжений к прочности матрицы на растяжение.

Нерелаксированные растягивающие напряжения в матрице вдоль фибры  $\sigma_{\text{МФБ}}$  определяли по этой модели по формуле:

$$\sigma_{\text{МФБ}} = \left[ \left( \frac{\Delta \ell}{\ell} \right)_{\text{Ф}} - \left( \frac{\Delta \ell}{\ell} \right)_{\text{МФБ}} \right] \frac{E_{\text{Ф}} E_{\text{МФБ}} A_f}{(1 - A_f) E_{\text{МФБ}} + A_f E_{\text{Ф}}} \quad (3)$$

где  $\left( \frac{\Delta \ell}{\ell} \right)_{\text{Ф}}$  и  $\left( \frac{\Delta \ell}{\ell} \right)_{\text{МФБ}}$  - термические изменение линейных размеров фибры и матрицы, %;

$A_f$  - относительная площадь фибры в модели, определяемая по известным формулам в зависимости от  $\mu_{fv}$  и  $d_f$ , доли ед;

$E_{\text{Ф}}$  и  $E_{\text{МФБ}}$  - модули деформации фибры и матрицы в составе фибробетонов, МПа.

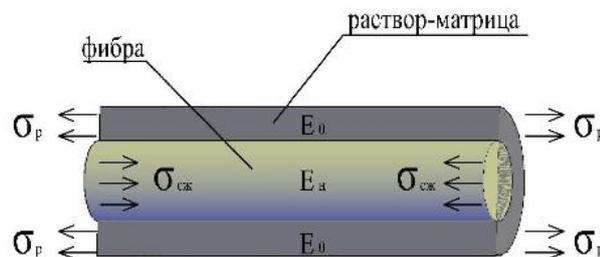


Рис. 1. Модель фибробетона в виде стержня фибры, окруженного оболочкой из матрицы, использованная в настоящей работе для определения величин нерелаксированных напряжений в сталефибробетонах из-за разницы термических деформаций фибры и матрицы, принятая по [24],

$E_a$  и  $E_o$  - модуль упругости фибры и матрицы (в работе, как  $E_{\text{Ф}}$  и  $E_{\text{МФБ}}$ ).

$\sigma_{\text{сж}}$  - напряжения (в основном сжимающие) в фибре;

$\sigma_p$  - напряжения в матрице (в основном растягивающие) (в работе -  $\sigma_{\text{МФБ}}$ ).

Значения  $A_f$  в соответствии с [24] определяли по формуле:

$$A_f = \pi d_f^2 / (4C_f^2), \quad (4)$$

где  $d_f$  = диаметр фибры;

$C_f$  - среднее расстояние между центрами волокон стальной фибры, определяемое по формуле, основанной на данных [24]

$$C_f = k_{op} d_f / (\mu_{fv} / 100)^{0.5} \quad (5)$$

где  $\mu_{fv}$  - объемное содержание фибры, %;

$k_{op}$  - коэффициент, учитывающий ориентацию фибры, принимаемые по [24] от 0,885 до 1,25.

Для аналитического описания термических деформаций сталефибробетонов использовали модель, основанную на законе аддитивности объема материалов, состоящих из нескольких компонентов, но с учетом образования трещин при полной (с запасом) релаксации структурных напряжений.

В соответствии с этой моделью, процесс термического изменения линейных размеров сталефибробетонов с учетом образования трещин описывали выражением:

$$\left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{ФБ} = \left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{Ф} k_{op} \mu_{fv} / 100 + \left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{МФБ} (1 - K_{op} \mu_{fv} / 100) + \left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{ТР} \quad (6)$$

где  $\left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{ТР}$  - термические изменение линейных размеров сталефибробетонов за счет образования трещин;

$K_{op}$  - коэффициент, учитывающий ориентацию фибры относительно направления, в котором определяется изменение размеров

$K_{op} = 1/3$  - для ситуации, в которой отсутствует определяющая плоскость ориентации фибры в фибробетоне в определенном направлении (при равномерном распределении фибры во всех плоскостях);

$K_{op} = 1$  - в направлении, вдоль которого в основном ориентирована фибра в фибробетоне;

$K_{OP} = 2/3$  – в одном из двух направлении вдоль которых в основном ориентирована фибра в фибробетоне;

$K_{OP} = 0$  – в направлении, вдоль которого фибра не ориентирована,

Выражение (6) при проведении расчетных исследований полезно также тем, что позволяет рассчитывать термические изменения линейных размеров сталефибробетонов за счет образования трещин на основании экспериментальных данных по термическим изменениям линейных размеров фибробетонов, матрицы и фибры.

Для описания процесса термических изменений свойств сталефибробетонов использовали корреляционные модели зависимостей изменений свойств относительно изменений свойств матрицы от изменений линейных размеров за счет образования трещин в виде:

$$(R/R_0)_{ФБ} / (R/R_0)_{МФБ} = K_{тр} = f_R \left( \left( \frac{\Delta \ell}{\ell} \right)_{ТР} \right) \quad (7)$$

$$(v/v_0)_{ФБ} / (v/v_0)_{МФБ} = K_{тр,v} = f_v \left( \left( \frac{\Delta \ell}{\ell} \right)_{ТР} \right) \quad (8)$$

$$(W/W_0)_{ФБ} / (W/W_0)_{МФБ} = K_{тр,W} = f_W \left( \left( \frac{\Delta \ell}{\ell} \right)_{ТР} \right) \quad (9)$$

где  $(R/R_0)_{ФБ}$  и  $(R/R_0)_{МФБ}$  - относительная остаточная после нагревания прочность фибробетона и его матрицы соответственно, доли ед;

$(v/v_0)_{ФБ}$  и  $(v/v_0)_{МФБ}$  - относительная остаточная после нагревания скорость ультразвука у фибробетона и его матрицы соответственно, доли ед;

$(W/W_0)_{ФБ}$  и  $(W/W_0)_{МФБ}$  - относительная остаточная после нагревания водонепроницаемость у фибробетона и его матрицы соответственно, доли ед;

$K_{тр}$ ,  $K_{тр,v}$  и  $K_{тр,W}$  - коэффициенты, равные отношению остаточных после нагревания значений прочности, скорости ультразвука и водонепроницаемости сталефибробетонов к остаточным значениям этих параметров матрицы;

$f_R\left(\left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{TP}\right)$ ,  $f_v\left(\left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{TP}\right)$  и  $f_W\left(\left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{TP}\right)$  - функции, аппроксимирующие корреляционные зависимости  $K_{TP}$ ,  $K_{TP,v}$  и  $K_{TP,W}$  от изменения линейных размеров сталефибробетонов вследствие растрескивания  $\left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{TP}$ .

Допускали, что трещины могут не только снижать характеристики свойств сталефибробетонов за счет ослабления сечений сталефибробетона, но и повышать их значения за счет дополнительной гидратации вследствие поступления воды и ее паров к негидратированной части цементного камня раствора матрицы. В связи с этим функции в выражениях (7), (8) и (9) могут быть не только убывающими, но и возрастающими.

Для описания процесса термических изменений линейных размеров сталефибробетонов за счет образования трещин использовали корреляционную модель, описывающую зависимость изменений линейных размеров сталефибробетонов за счет образования трещин от отношений нерелаксированных растягивающих напряжений к прочности матрицы на растяжение:

$$\left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{TP} = f_\ell\left(\frac{\sigma_{MФБ}}{R_{MФБ.Р.}}\right) \quad (10)$$

где  $f_\ell$  - функции, аппроксимирующие корреляционные зависимости  $\left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{TP}$  от отношения величины нерелаксированных напряжений к прочности матрицы на растяжение.

### **Методика представленных в работе исследований**

Представленные расчетные исследования проводили на основе выбранных моделей с использованием полученных ранее экспериментальных данных.

Использовали результаты экспериментальных исследований работ [20, 21] по влиянию нагревания при температурах 110, 200, 400, 600, 800 и 1100 °С на изменение массы, линейных размеров, плотности, прочности при изгибе, скорости ультразвука и водонепроницаемости сталефибробетонов на основе оптимизированной высокопрочной цементно-песчаной матрицы с объемным содержанием фибры 0,5%, 1%, 1,5%, 3%, 6% с пятью видами фибры.

Технологический состав высокопрочной цементно-песчаной матрицы с прочностью при изгибе 8,5 МПа и характеристики использованной фибры приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Технологический состав цементно-песчаной матрицы

Расход на м <sup>3</sup>				
Портландцемент ЦЕМ 52,5, кг	Песок люберецкий, кг	Вода, кг	Микрокремнезем, кг	Гиперпласти- фикатор Sika 5-800, кг
725	1213	203	56,5	10,5

Таблица 2. - Характеристики использованной стальной фибры

Вид фибры	Характеристика фибры	Длина волокна, мм	Диаметр волокна, мм	Нормативное сопротивление растяжению, МПа
ФСПВ 30□0.8	Рубленая из проволоки волнистая	30	0,8	860
ФСПВ-Люкс 15□0.3		15	0,3	2450
ФСП-А 30□0.3	Рубленая из проволоки с анкерами по концам волокон	30	0,3	2650
Narex 32□1.2	Фрезерованная из слябов с анкерами по концам волокон	32	1,2	600
ФСЛ 40□0.8	Резанная из стального листа переменного профиля	40	0,8	580

Расчетные исследования включали:

- Расчетное определение изменения линейных размеров сталефибробетонов за счет образования трещин из-за разности термических деформаций матрицы и фибры;

- Расчетное исследование зависимости термических изменений свойств сталефибробетонов относительно изменений матрицы от изменения линейных размеров за счет образования трещин в фибробетоне;

- Расчетное исследование зависимости термических изменений линейных размеров фибробетонов за счет образования трещин после нагревания от величины отношения расчетных растягивающих микроструктурных напряжений в матрице к прочности матрицы на растяжение.

- Расчеты статистических характеристик основных установленных зависимостей.

При проведении расчетных исследования в настоящей работе для каждого из исследованных составов сталефибробетонов использовали данные о полученных и представленных в работе [23] фактических термических изменениях их матрицы.

Расчетное определение термических изменений линейных размеров фибробетонов за счет образования трещин проводили на основании выбранной модели, основанной на законе аддитивности объема материалов, состоящих из нескольких компонентов с учетом образования микротрещин, по формуле, полученной из выражения (6):

$$\left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{\text{ТР}} = \left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{\text{ФБ}} - \left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{\text{Ф}} k_{\text{ОРМ}_{\text{ФВ}}} / 100 - \left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{\text{МФБ}} (1 - k_{\text{ОРМ}_{\text{ФВ}}} / 100), \quad (11)$$

Так как после нагревания  $\left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{\Phi} = 0$ , то для изменений линейных размеров после нагревания за счет образования трещин в фибробетоне вычисляли по формуле:

$$\left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{\text{ТР}} = \left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{\text{ФБ}} - \left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{\text{МФБ}} (1 - k_{\text{ОР}} \mu_{fv} / 100) \quad (12)$$

Расчетное исследование зависимости термических изменений свойств сталефибробетона относительно термических изменений матрицы от изменения линейных размеров за счет образования трещин в фибробетоне проводили на основании выбранной корреляционной модели, описываемой выражениями (7) – (9).

При этом рассматривали зависимость коэффициентов отношения остаточных после нагревания значений свойств фибробетона (в долях единицы по отношению к значениям до нагревания) к остаточным значениям свойств матрицы  $K_{\text{ТР}}$ ,  $K_{\text{ТР},v}$  и  $K_{\text{ТР},w}$  от величин изменения линейных размеров фибробетонов за счет образования трещин в соответствии с предложенными выражениями (7) – (9). В процессе исследований проверяли наличие корреляции между ними и устанавливали описывающие их аппроксимирующие зависимости  $f_R\left(\left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{\text{ТР}}\right)$ ,  $f_v\left(\left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{\text{ТР}}\right)$  и  $f_w\left(\left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)_{\text{ТР}}\right)$ .

Расчетное исследование зависимости термических изменений линейных размеров фибробетонов за счет образования трещин в сталефибробетоне от отношения структурных напряжений к прочности матрицы на растяжение проводили на основании выбранной корреляционной модели, описываемой выражением (8). При этом проводили расчетное исследование зависимости термических изменений линейных размеров фибробетонов за счет образования трещин в сталефибробетоне от отношения начальных (не релаксированных) растягивающих напряжений в матрице к

прочности матрицы на растяжение, Проверяли наличие корреляции между ними и устанавливали при наличии корреляции, описывающие их аппроксимирующие зависимости  $f_{\ell} \left( \frac{\sigma_{\text{МФБ}}}{R_{\text{МФБ.Р.}}} \right)$ .

Значения модуля деформации фибры принимали по СП 52-104-2006\*  $(1,9 - 2,1) \times 10^5$  МПа.

Значения модуля деформации матрицы принимали по величине прочности на основании соотношения  $E_{\text{МФБ.}} = 7238 R_{\text{МФБ.Р.}}$ , установленного из анализа данных работы [8].

Значения прочности матрицы на растяжение  $R_{\text{МФБ.Р.}}$  определяли по вычисленным значениям пористости матрицы по формуле, полученной при обработке данных работы [25]:

$$R_{\text{МФБ.Р.}} = R_{\text{МФБ.Р.}P=0} e^{-11,847 P}, \quad (13)$$

где 11,847 – параметр влияния пористости на прочность матрицы, полученный по результатам обработки зависимости прочности цементного камня (в основном определяющим прочность матрицы) от пористости по данным работы [25].

$R_{\text{МФБ.Р.}P=0}$  - прочность матрицы при нулевой пористости, МПа;

$P$  – пористость материала (в долях единицы), рассчитываемая по пористости цементного камня, определяемой в зависимости от В/Ц и степени гидратации портландцемента  $\alpha$  [26] и по объемному содержанию цементного камня  $V_{\text{ЦК}}$  по формуле:

$$P = \frac{V/Ц - 0,23\alpha}{\frac{1000}{\rho_{\text{Ц}}} + V/Ц} V_{\text{ЦК}} \quad (14)$$

где  $\rho_{\text{Ц}} = 3100$  кг/м<sup>3</sup> - средняя плотность частиц портландцемента, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{\text{ЦК}}$  - объемное содержание цементного камня в матрице, доли ед.;

$\alpha$  - степень гидратации портландцемента, доли ед.

Степень гидратации портландцемента приблизительно определяли по относительному уменьшению массы матрицы после 600 °С  $\left(\frac{\Delta M}{M}\right)_{M.600}$  и после 110 °С  $\left(\frac{\Delta M}{M}\right)_{M.110}$  с использованием данных [21] по формулам:

$$w_M = \left(\frac{\Delta M}{M}\right)_{M.600} - \left(\frac{\Delta M}{M}\right)_{M.110} \quad (15)$$

$$w_{ЦК} = w_M / [1 - (\Pi + МК) / \gamma_{МФБ}] \quad (16)$$

$$\alpha = w_{ЦК} / 23 \quad (17)$$

Для определения величины  $R_{МФБ,P=0}$  рассчитали пористость матрицы в работе [8], имеющей прочность при растяжении 4,89 МПа. В результате было получено для этой матрицы  $P = 0,1365$ . Тогда получили  $R_{МФБ,P=0} = 24,84$  МПа

По вычисленным значениям пористости матриц в составе фибробетонов по формуле (13) рассчитывали прочность этих матриц на растяжение.

Вычисленные по формулам (4), (5) и (13) – (17) параметры модели, описываемой формулой (3), степень гидратации, пористость и начальные (до нагревания) значения прочности на растяжение и модули упругости матриц в составе сталефибробетонов, а также модули упругости фибры, принятые в расчетных исследованиях приведены в таблице 3.

Влияние нагревания на модуль деформации и прочность на растяжение матрицы в составе сталефибробетонов принимали такое же, как на прочность ее при изгибе. При этом использовали данные по фактическим изменениям прочности, матрицы в составе сталефибробетонов, полученные в работе [23] с учетом влияния фибры на плотность и термические изменения массы матрицы в составе сталефибробетонов.

Таблица 3. Вычисленные по формулам (4), (5) и (13) – (17) параметры модели, описываемой формулой (3), степень гидратации, пористость и начальные (до нагревания) значения прочности на растяжение и модули упругости матриц в составе сталефибробетонов, а также модули упругости фибры

Материал	Объемное содержание фибры в фибробетоне $\mu_{fv}, \%$	Вычисленные параметры модели, описываемой формулой (3), степень гидратации, пористость и начальные (до нагревания) значения прочности на растяжение и модули упругости матриц в составе фибробетонов, а также модули упругости фибры							
		$\gamma_{МФБ},$ кг/м <sup>3</sup>	$C_f,$ мм	$A_f,$ отн.ед.	$\alpha,$ отн.ед.	$P,$ отн.ед.	$R_{МФБ,Р}^{T=20}$ МПа	$E_{МФБ}^{T=20}$ 10 <sup>4</sup> МПа	$E_f,$ 10 <sup>5</sup> МПа
Фибробетон с фиброй ФСПВ 15x0,3	0,5	2269	5.3	0.0025	0.656	0.1267	5.53	4,16	1,9
	1	2265	3.8	0.0049	0.764	0.1156	6.31	4,74	1,9
	1,5	2238	3.1	0.0073	0.753	0.1276	5.47	4,11	1,9
	3	2235	2.2	0.0146	0.648	0.1406	4.69	3,52	1,9
	6	2188	1.5	0.0314	0.525	0.1711	3.27	2,46	1,9
Фибробетон с фиброй ФСП-А 30x0,3	0,5	2304	4.7	0.0032	0.736	0.1037	7.27	5,46	1,9
	1	2269	3.3	0.0065	0.769	0.1134	6.48	4,86	1,9
	1,5	2261	2.7	0.0097	0.749	0.1190	6.06	4,55	1,9
Фибробетон с фиброй ФСПВ 30x0,8	0,5	2191	12.5	0.0032	0.565	0.1660	3.47	2,61	1,9
	1,5	2181	7.3	0.0094	0.575	0.1687	3.36	25,3	1,9
	3	2151	5.1	0.0193	0.490	0.1879	2.68	2,01	1,9
	6	1964	3.5	0.0410	0.654	0.2443	1.37	1,03	1,9
Фибробетон с фиброй ФСЛ 40x0,8	1	2220	12.5	0.0032	0.649	0.1463	4.39	3,30	2,1
	1,5	2211	7.25	0.0096	0.563	0.1587	3.79	2,85	2,1
	3	2215	5.1	0.0193	0.587	0.1547	3.97	2,98	2,1
	6	2219	3.6	0.0388	0.552	0.1568	3.87	2,91	2,1
Фибробетон с фиброй Нарех 32x1,2	0,5	2245	18.9	0.0032	0.626	0.1392	4.77	3,58	2,0
	1	2231	13.3	0.0064	0.593	0.1481	4.29	3,23	2,0
	1,5	2248	10.9	0.0095	0.599	0.1410	4.67	3,51	2,0
	3	2236	7.7	0.0191	0.477	0.1580	3.82	2,87	2,0
	6	2201	5.4	0.0388	0.587	0.1600	3.73	2,80	2,0

Влияние нагревания на модуль упругости фибры не учитывали, так как оно значительно ниже, чем на модуль деформации матрицы.

Расчеты статистических характеристик основных установленных зависимостей включали определение величины достоверности аппроксимации  $R^2$ , коэффициентов корреляции  $r$  и – оценку его среднего

квадратического отклонения  $S_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n-3}}$ , его значимости с помощью  $t$  –

критерия, определяемого как  $t = r / S_{oc}$ , остаточного среднеквадратического отклонения  $S_{oc}$ , среднеквадратического отклонения воспроизводимости  $S_v$  и значения  $F$ -критерия, определяемого как  $F_a = S_{oc}^2 / S_v^2$ , характеризующего адекватность полученных аппроксимирующих выражений.

Считали, что если  $t_r \geq t_p$  (где  $t_{0,95}$  - табличное значение  $t$ -критерия при  $p=0,95$ ), то между рассматриваемыми параметрами существует статистически значимая корреляционная связь.

Считали, что если  $F_a \leq F_p$ , то аппроксимируемое выражение адекватно описывает исследуемую зависимость.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

Вычисленные значения изменений линейных размеров исследованных фибробетонов за счет образования трещин на основании экспериментальных данных изменения размеров фибробетонов и вычисленных фактических изменений размеров матрицы в составе фибробетонов приведены в табл. 4.

Установлено (как это, например, показано на Рис. 2 для фибробетонов с фиброй ФСЛ 40x0,8), что изменения линейных размеров фибробетонов после нагревания за счет образования трещин, зависят, от содержания и вида фибры, температуры нагревания. Однако степень влияния этих факторов не монотонна и различна в разных диапазонах значений этих факторов и, по-видимому, искажается наблюдаемым разбросом полученных экспериментальных данных из-за погрешностей измерений и вследствие определения исследуемых параметров, как разности между изменениями размеров сталефибробетонов и матрицы, когда погрешности суммируются. Очевидно, что при меньших погрешностях эксперимента с увеличением объемного содержания фибры во всех интервалах содержания фибры и температур изменения размеров фибробетонов за счет образования трещин должны увеличиваться, как это следует из выбранных моделей, для описания

---

процессов напряженно-деформируемого состояния и термических деформаций сталефибробетонов.

Таблица 4. Результаты расчетов по формуле (12) величин изменения линейных размеров исследованных фибробетонов за счет образования трещин на основании экспериментальных данных изменения размеров фибробетонов и вычисленных фактических изменений размеров матрицы в составе фибробетонов

Материал	Объемное содержание фибры в фибробетоне $\mu_{fv}, \%$	Относительное изменение линейных размеров фибробетонов за счет образования трещин (в %) после нагревания до различных температур (в °С) по отношению к размерам до нагревания						
		20	110	200	400	600	800	1100
Фибробетон с фиброй ФСПВ 15x0,3	0,5	0	-0.06	0.01	0.04	0.02	-0.01	0.01
	1	0	-0.06	0.06	-0.02	-0.04	-0.03	-0.02
	1,5	0	0.02	0.07	0.03	0.04	0.07	0.00
	3	0	0.04	0.05	0.02	-0.02	0.50	0.51
	6	0	0.02	0.05	0.06	0.00	0.76	0.76
Фибробетон с фиброй ФСП-А 30x0,3	0,5	0	0.00	0.04	-0.05	-0.02	-0.04	-0.04
	1	0	-0.03	0.08	-0.03	0.01	0.00	-0.04
	1,5	0	0.01	0.10	-0.01	0.01	0.03	-0.01
Фибробетон с фиброй ФСПВ 30x0,8	0,5	0	0.07	0.09	-0.03	0.18	0.17	0.17
	1,5	0	0.00	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01
	3	0	0.04	0.01	0.04	0.10	0.09	0.10
	6	0	0.08	0.03	0.04	0.10	0.09	0.10
Фибробетон с фиброй ФСЛ 40x0,8	1	0	0.03	0.06	0.03	0.11	0.11	0.11
	1,5	0	0.10	0.06	0.04	0.11	0.10	0.11
	3	0	0.05	0.09	0.07	0.05	0.31	0.31
	6	0	0.07	0.07	0.06	0.17	0.98	1.02
Фибробетон с фиброй Нареx 32x1,2	0,5	0	0.05	0.09	0.02	-0.03	0.00	0.02
	1	0	0.01	0.07	0.00	-0.07	0.00	-0.01
	1,5	0	0.03	0.06	0.00	-0.11	0.02	0.04
	3	0	0.08	0.08	0.01	-0.05	0.04	0.05
	6	0	0.09	0.09	0.05	0.14	0.60	0.64

Примечание. Отрицательные значения не имеют физического смысла и связаны с влиянием погрешностей.

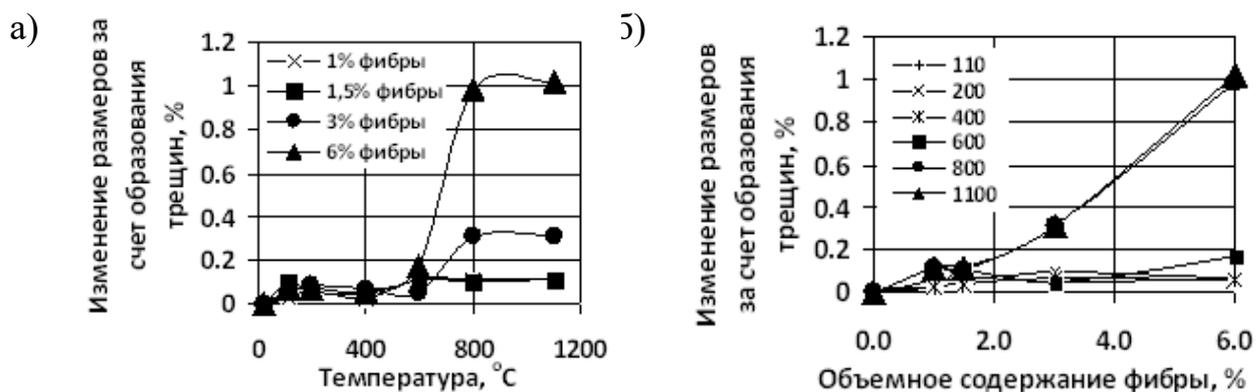


Рис. 2. Зависимость вычисленного изменения линейных размеров фибробетона с фиброй ФСЛ 40х0,8 (в качестве примера) за счет образования трещин разного содержания по объему после нагревания от температуры (а) и от объемного содержания фибры после нагревания при различных температурах (б).

На основании выполненных расчетных исследований установлено влияние изменения линейных размеров за счет образования трещин на термические изменение свойств сталефибробетонов, что соответствует выбранной модели. Наиболее существенно влияние размеров за счет образования трещин на коэффициенты изменения прочности при изгибе  $K_{тр}$  и водонепроницаемость  $K_{тр,w}$  и в основном незначительно на коэффициенты изменения скорости ультразвука  $K_{тр,v}$ . Незначительное влияние на скорость ультразвука объясняется распространением ультразвука на участках с трещинами через пересекающие трещины фибру.

При анализе зависимостей этих коэффициентов от величины изменения линейных размеров за счет образования трещин отдельно по сталефибробетонам на каждом виде фибры после воздействия всех температур установлено, что корреляция между ними практически не наблюдается. В таком случае, объединять их по всем видам фибры вообще не имело смысла.

При рассмотрении таких зависимостей для каждой температуры отдельно наблюдается корреляция между ними (как это, например, показано на Рис. 3 для  $K_{тр}$  сталефибробетонов с фиброй ФСЛ 40х0,8 после 400 °С и

Нерех 32x1,2 после нагревания при 200 °С). Однако такие зависимости не универсальны по фибре и во многих случаях имеют место достаточно большие отклонения отдельных значений от линии аппроксимации, что связано с относительно высокими значениями разбросов при определении прочности образцов фибробетонов.

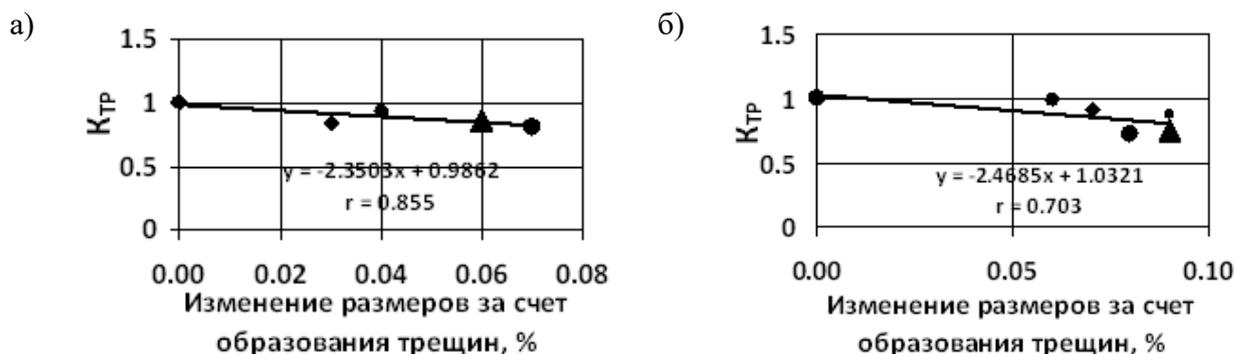


Рис. 3. Зависимость (в качестве примера) отношения  $K_{тр}$  изменения прочности фибробетона к изменению прочности матрицы с фиброй вида ФСЛ 40x0,8 после нагревания при 400 °С (а) и с фиброй Нерех 32x1,2 после нагревания при 200 °С (б) разного содержания по объему после нагревания от изменения размеров за счет образования трещин в фибробетоне.

• 0,5% фибры    ◆ 1% фибры    ■ 1,5% фибры    ● 3% фибры    ▲ 6% фибры

Рассмотрение этих соотношений объединенных для всех фибробетонов на разных фибрах, но отдельно для различных температур, как, например, это показано на Рис. 4 для  $K_{тр}$  после нагревания при 200 °С, свидетельствует о том, что в этом случае наблюдается худшая корреляция с более значительными погрешностями. Но такие зависимости более универсальны и более надежны, так как получены на большем количестве данных.

Результаты определения значений отношений нерелаксированных структурных напряжений в матрице к прочности матрицы в исследованных сталефибробетонах после нагревания, вычисленные с учетом уменьшения прочности при растяжении и модуля деформации матрицы в составе сталефибробетонов приведены в таблице 5.

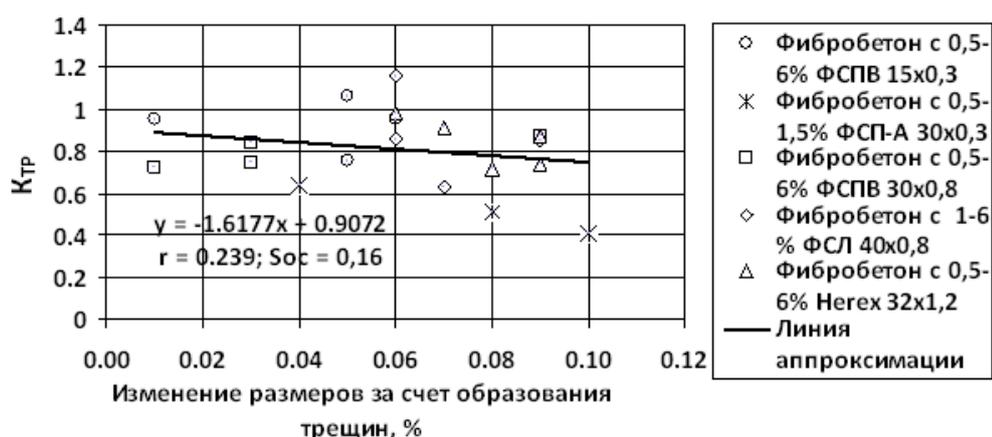


Рис. 4. Обобщенная зависимость отношения  $K_{тр}$  изменения прочности фибробетона к изменению прочности матрицы с исследованными видами фибры разного содержания по объему после нагревания до 200 °С от изменения размеров за счет образования трещин в фибробетоне.

Таблица 5. Значения отношений нерелаксированных структурных напряжений в матрице к прочности матрицы в исследованных сталефибробетонах после нагревания, вычисленные с учетом уменьшения прочности при растяжении и модуля деформации матрицы в составе сталефибробетонов

Материал	Объемное содержание фибры в фибробетоне $\mu_{fv}, \%$	Вычисленные значения отношения нерелаксированных структурных напряжений в матрице к прочности матрицы в исследованных сталефибробетонах после нагревания						
		20	110	200	400	600	800	1100
Фибробетон с фиброй ФСПВ 15х0,3	0,5	0	0,05	0,09	0,10	0,52	0,59	0,61
	1	0	0,10	0,17	0,83	0,90	0,94	1,13
	1,5	0	0,12	0,27	0,96	1,41	1,60	1,80
	3	0	0,43	0,62	0,73	2,78	2,93	3,54
	6	0	1,24	1,79	2,23	2,65	5,92	7,17
Фибробетон с фиброй ФСП-А 30х0,3	0,5	0	0,04	0,09	0,19	0,51	0,56	0,64
	1	0	0,06	0,20	0,38	1,09	1,22	1,47
	1,5	0	0,14	0,34	0,54	1,66	1,81	1,99
Фибробетон с фиброй ФСПВ 30х0,8	0,5	0	0,16	0,20	0,30	0,87	1,11	1,27
	1,5	0	0,27	0,54	0,62	0,82	2,71	3,02
	3	0	0,83	1,21	1,37	1,64	5,01	6,12
	6	0	3,15	4,06	5,68	7,26	8,83	10,32
Фибробетон с фиброй ФСЛ 40х0,8	1	0	0,08	0,16	0,19	0,46	0,94	1,22
	1,5	0	0,45	0,51	0,83	1,73	2,72	3,32
	3	0	0,61	1,02	1,24	1,92	4,15	5,01
	6	0	1,52	1,69	3,13	4,31	6,34	7,88

Продолжение табл. 5.

Материал	Объемное содержание фибры в фибробетоне $\mu_{fv}, \%$	Вычисленные значения отношения нерелаксированных структурных напряжений в матрице к прочности матрицы в исследованных сталефибробетонах после нагревания						
		20	110	200	400	600	800	1100
Фибробетон с фиброй Нарех 32x1,2	0,5	0	0,11	0,15	0,27	0,76	0,83	1,07
	1	0	0,16	0,31	0,35	0,58	1,59	2,03
	1,5	0	0,25	0,43	0,48	0,96	2,21	2,74
	3	0	0,90	1,02	1,29	2,16	4,27	5,18
	6	0	1,76	1,94	5,37	6,26	6,79	9,25

На основании выполненных расчетных исследований установлено, что наблюдаются корреляционные зависимости изменений линейных размеров фибробетона за счет образования трещин  $\left(\frac{\Delta l}{l}\right)_{\text{ТР}}$  от величин отношения

$$\frac{\sigma_{\text{МФБ}}}{R_{\text{МФБ.Р.}}}$$

расчетных нерелаксированных растягивающих структурных напряжений в матрице после нагревания при 110-1100 °С к прочности матрицы на растяжение. При этом для фибробетонов с каждой из фибр наблюдаются различные корреляционные зависимости между  $\left(\frac{\Delta l}{l}\right)_{\text{ТР}}$  и

$\frac{\sigma_{\text{МФБ}}}{R_{\text{МФБ.Р.}}}$ , как это показано на Рис. 5.

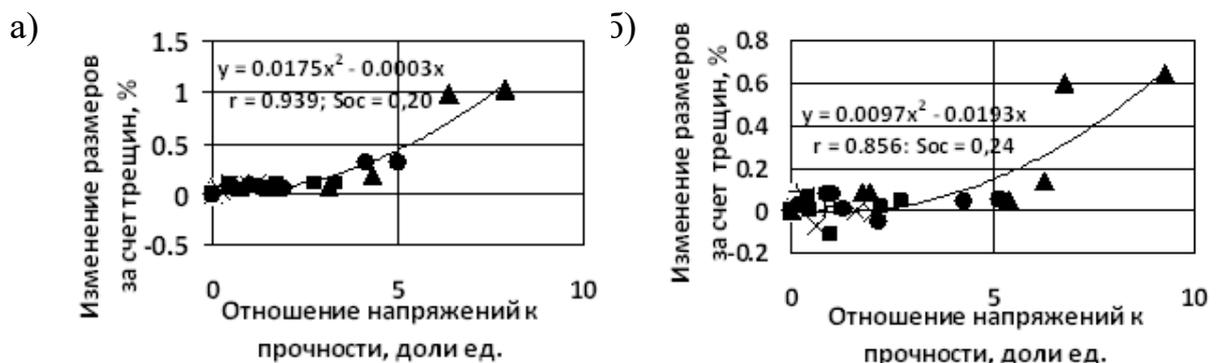


Рис. 5. Зависимость вычисленного изменения размеров фибробетонов за счет образования трещин с фиброй вида ФСЛ 40x0,8 (а) и Нарех 32x1,2 (б) разного содержания по объему от величины отношения расчетных нерелаксированных растягивающих структурных напряжений в матрице к прочности матрицы на растяжение после нагревания до 110-1100 °С.

• 0,5% фибры    ◆ 1% фибры    ● 1,5% фибры    ● 3% фибры    ■ 6% фибры

Полученные корреляционные зависимости доказывают возможность использования выбранной модели для прогнозирования изменения размеров сталефибробетонов за счет образования трещин при использовании конкретных видов фибры. Однако, наибольший интерес представляет установление универсальных зависимостей для любой стальной фибры.

Установлено, что при рассмотрении объединенной зависимости изменения линейных размеров сталефибробетонов за счет образования трещин от величины отношения расчетных нерелаксированных растягивающих структурных напряжений в матрице к прочности матрицы на растяжение со всеми видами фибры после нагревания при всех температурах (Рис. 6) наблюдается худшая корреляция, чем при рассмотрении зависимостей отдельно для сталефибробетонов с разными видами фибры, но зависимость более универсальна.

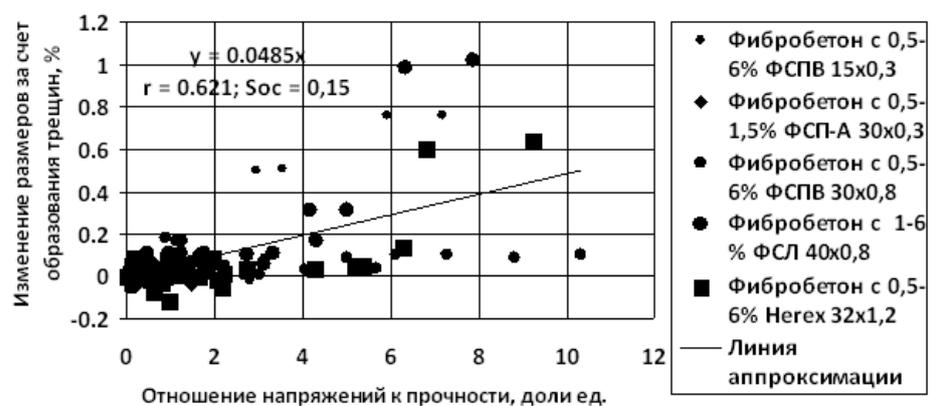


Рис. 6. Объединенная зависимость изменения размеров сталефибробетонов за счет образования трещин от величины отношения расчетных нерелаксированных растягивающих структурных напряжений в матрице к прочности матрицы на растяжение со всеми исследованными видами фибры после нагревания при температурах от 110 оС до 1100 оС.

Так как при каждой из температур возможно протекание различных по величине не учитываемых в модели эффектов (пластические деформации, коррозия фибры, химическое взаимодействие фибры с матрицей), то были рассмотрены зависимости отдельно в результате воздействия разных температур. Рассмотрение таких зависимостей показало лучшие результаты,

как это видно на примере нагревания при 400 °С и 1100 °С на Рис. 7.

Хотя в этом случае, как и по Рис. 6 наблюдается худшая корреляция, чем при рассмотрении зависимостей отдельно для сталефибробетонов с разными видами фибры, такие зависимости имеют меньшие остаточные среднеквадратические отклонения  $S_{oc}$  после нагревания при 110 – 600 оС, более надежны, так как получены по большему количеству данных. Кроме того такие зависимости учитывают различное влияние отношения напряжений к прочности на процессы образования трещин после воздействия разных температур.

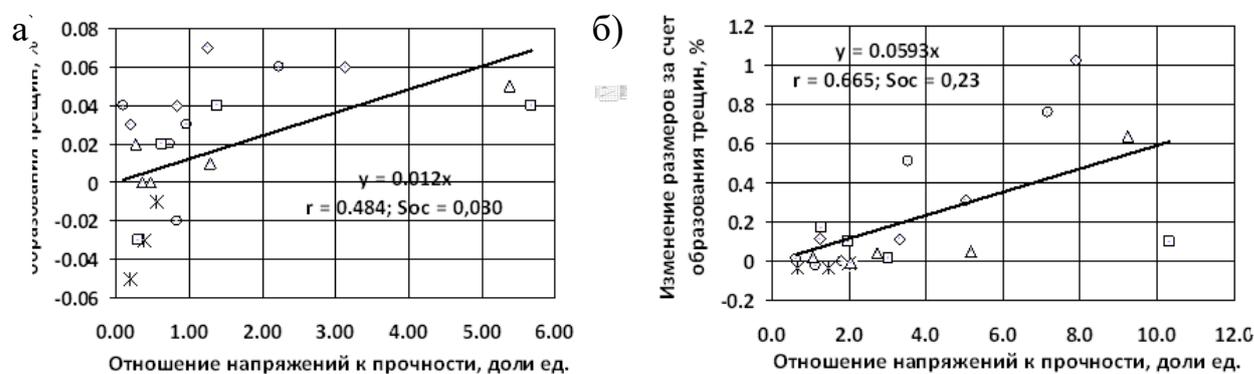


Рис. 7. Объединенная зависимость изменений размеров фибробетонов за счет образования трещин от величины отношения расчетных нерелаксированных растягивающих структурных напряжений в матрице к прочности матрицы на растяжение с исследованными видами фибры разного содержания по объему после нагревания при 400 °С (а) 1100 °С (б).

- Фибробетон с 0,5-6% ФСПВ 15х0,3
- Фибробетон с 0,5-6% ФСПВ 30х0,8
- △ Фибробетон с 0,5-6% Herex 32х1,2
- ✕ Фибробетон с 0,5-1,5% ФСП-А 30х0,3
- ◇ Фибробетон с 1-6 % ФСЛ 40х0,8

По результатам статистических исследований коэффициенты корреляции  $r$  установленных в работе аппроксимирующих функций для зависимостей  $K_{тр}$ ,  $K_{тр,y}$  и  $K_{тр,w}$  от  $(\Delta l/l)_{тр}$  составляют в основном от 0,1 до 0,59, что соответствует наличию слабой ( $r = 0,1-0,3$ ), умеренной ( $r = 0,3-0,5$ ) и заметной ( $r = 0,5-0,7$ ) корреляции. Для большинства этих зависимостей статистически значимой корреляции не наблюдается, так как  $t_r < t_p$ .

Все основные аппроксимирующие исследуемые зависимости

уравнения, полученных по результатам расчетных исследований после воздействия различных температур приведены в табл. 6.

Таблица 6. Аппроксимирующие основные исследуемые зависимости уравнения, полученных по результатам расчетных исследований после воздействия различных температур и результаты их статистического анализа

Тем- пера- тура, оС	n	Уравнение аппроксимации	Параметры и результаты статистического анализа исследуемой зависимости							
			r	t <sub>r</sub>	t <sub>0,95</sub>	S <sub>oc</sub>	S <sub>v</sub>	F <sub>a</sub>	F <sub>0,95</sub>	Δy
Зависимость K <sub>ТР</sub> от изменения линейных размеров за счет образования трещин:										
110	21	$K_{ТР}=1,0705 - 1,8584(\Delta l / l)_{ТР}$	0,374	1,76	2,09	0,212	0,17	1,56	1,61	0,092
200	20	$K_{ТР}=0,9072 - 1,6177(\Delta l / l)_{ТР}$	0,239	1,07	2,10	0,160	0,16	1,0	1,62	0,080
400	18*	$K_{ТР}=0,8541 - 0,567(\Delta l / l)_{ТР}$	0,108	0,328	2,16	0,180	0,16	1,26	1,67	0,084
600	15*	$K_{ТР}=1,3126 + 1,258(\Delta l / l)_{ТР}$	0,229	0,848	2,16	0,322	0,23	1,96	1,72	0,22
800	21	$K_{ТР}=1,1045 + 0,8192(\Delta l / l)_{ТР}$	0,603	3,295	2,09	0,319	0,26	1,50	1,61	0,14
1100	21	$K_{ТР}=0,8576 - 0,0802(\Delta l / l)_{ТР}$	0,100	0,434	2,09	0,246	0,20	1,51	1,51	0,11
Зависимость K <sub>ТР,у</sub> от изменения линейных размеров за счет образования трещин:										
110	21	$K_{ТР,у}=0,9664 + 0,118(\Delta l / l)_{ТР}$	0,252	1,758	2,09	0,021	0,23	0,008	1,61	0,01
200	21	$K_{ТР,у}=0,9717 + 0,1745(\Delta l / l)_{ТР}$	0,138	0,607	2,09	0,052	0,22	0,056	1,61	0,022
400	21	$K_{ТР,у}=0,9918 - 1,1305(\Delta l / l)_{ТР}$	0,221	0,988	2,09	0,169	0,16	1,12	1,61	0,074
600	21	$K_{ТР,у}=0,8755 + 0,0761(\Delta l / l)_{ТР}$	0,050	0,218	2,09	0,160	0,15	1,14	1,61	0,070
800	21	$K_{ТР,у}=0,8441 + 0,0156(\Delta l / l)_{ТР}$	0,065	0,284	2,09	0,071	0,16	0,20	1,61	0,030
1100	21	$K_{ТР,у}=1,0265 + 0,2144(\Delta l / l)_{ТР}$	0,590	3,185	2,09	0,089	0,15	0,35	1,61	0,038
Зависимость K <sub>ТР,в</sub> от изменения линейных размеров за счет образования трещин:										
110	18	$K_{ТР,в}=0,912 - 0,8615(\Delta l / l)_{ТР}$	0,235	0,967	2,12	0,166	0,15	1,22	1,65	0,078
200	17*	$K_{ТР,в}=0,7624 - 1,9652(\Delta l / l)_{ТР}$	0,232	0,923	2,13	0,226	9,19	1,41	1,66	0,011
400	15*	$K_{ТР,в}=0,320 + 0,434(\Delta l / l)_{ТР}$	0,234	0,868	2,16	0,164	0,13	1,59	1,74	0,08
600	16*	$K_{ТР,в}=0,3579 + 0,5296(\Delta l / l)_{ТР}$	0,296	1,159	2,14	0,156	0,13	1,44	1,70	0,078
800	17	$K_{ТР,в}=0,453 - 0,195(\Delta l / l)_{ТР}$	0,482	2,13	2,13	0,177	0,14	1,60	1,66	0,086
Зависимость вычисленного изменения линейных размеров фибробетона за счет образования трещин от величины отношения расчетных нерелаксированных растягивающих структурных напряжений в матрице к прочности матрицы на растяжение:										
110-1100	30	$(\Delta l / l)_{ТР} = 0,0139(\sigma_{МФБ} / R_{МФБ,Р}) + 0,0244(\sigma_{МФБ} / R_{МФБ,Р})$ (с фиброй ФСПВ 15х0,3)	0,89	10,32	2,04	0,104	0,22	0,22	1,65	0,038

Продолжение таблицы 6.

Тем- пера- тура, оС	n	Уравнение аппроксимации	Параметры и результаты статистического анализа исследуемой зависимости							
			r	t <sub>r</sub>	t <sub>0,95</sub>	S <sub>oc</sub>	S <sub>v</sub>	F <sub>a</sub>	F <sub>0,95</sub>	Δy
110- 1100	18	$(\Delta l / l)_{TP} = 0,004(\sigma_{MФБ} / R_{MФБ.P}) + 0,003$ (с фиброй ФСП-А 30x0,3)	0,069	0,28	2,10	0,042	0,20	0,044	1,83	0,021
110- 1100	24	$(\Delta l / l)_{TP} = 0,063(\sigma_{MФБ} / R_{MФБ.P}) + 0,040$ (с фиброй ФСПВ 30x0,8)	0,32	1,55	2,07	0,059	0,21	0,078	1,78	0,025
110- 1100	24	$(\Delta l / l)_{TP} = 0,0175(\sigma_{MФБ} / R_{MФБ.P})^2 + 0,00035(\sigma_{MФБ} / R_{MФБ.P})$ (с фиброй ФСЛ 40x0,)	0,939	12,81	2,07	0,196	0,25	0,61	1,72	0,082
110- 1100	30	$(\Delta l / l)_{TP} = 0,0097(\sigma_{MФБ} / R_{MФБ.P})^2 + 0,0193(\sigma_{MФБ} / R_{MФБ.P})$ (с фиброй Herex 32x1,2)	0,856	8,76	2,04	0,148	0,24	0,34	1,65	0,054
110- 1100	126	$(\Delta l / l)_{TP} = 0,0485\sigma_{MФБ} / R_{MФБ.P}$ (все виды фибр)	0,621	8,82	2,0	0,146	0,23	0,63	1,35	0,026
Зависимость вычисленного изменения размеров фибробетона за счет образования трещин от величины отношения расчетных растягивающих микроструктурных напряжений в матрице, рассчитанных без учета их релаксации, к вычисленной прочности матрицы на растяжение:										
110	21	$(\Delta l / l)_{TP} = 0,0393\sigma_{MФБ} / R_{MФБ.P}$	0,507	3,08	2,09	0,0397	0,19	0,04	1,84	0,017
200	21	$(\Delta l / l)_{TP} = 0,0175\sigma_{MФБ} / R_{MФБ.P} + 0,0232$	0,374	1,75	2,09	0,058	0,20	0,08	1,84	0,025
400	21	$(\Delta l / l)_{TP} = 0,012\sigma_{MФБ} / R_{MФБ.P}$	0,484	2,41	2,09	0,0295	0,18	0,03	1,84	0,013
600	21	$(\Delta l / l)_{TP} = 0,0181\sigma_{MФБ} / R_{MФБ.P}$	0,442	2,14	2,09	0,074	0,26	0,08	1,84	0,032
800	21	$(\Delta l / l)_{TP} = 0,0652$ $\sigma_{MФБ} / R_{MФБ.P}$	0,603	3,29	2,09	0,233	0,29	0,06	1,84	0,11
1100	21	$(\Delta l / l)_{TP} = 0,0593$ $\sigma_{MФБ} / R_{MФБ.P}$	0,665	3,88	2,09	0,227	0,20	1,28	1,84	0,10

\*- при обработке были отброшены значения, имеющие наибольшие, anomalно отличающиеся от остальных, отклонения от линии аппроксимации.

Характерно, что зависимости коэффициентов  $K_{TP}$ ,  $K_{TP,y}$  и  $K_{TP,w}$  от  $(\Delta l / l)_{TP}$  являются не только убывающими функциями с близкими параметрами, как это должно быть при влиянии на свойства сталефибробетонов только образования трещин. Параметры при различных

температурах отличаются, а в ряде случаев зависимости коэффициентов  $K_{тр}$ ,  $K_{тр,y}$  и  $K_{тр,w}$  от  $(\Delta l / l)_{тр}$  являются не убывающими, а возрастающими функциями. Это свидетельствует о том, что кроме образования трещин, происходит дополнительная гидратация цементного камня матрицы за счет проникновения влаги к негидратированным частям клинкера по образующимся трещинам.

Как видно из таблицы 6 коэффициенты корреляции  $r$  установленных в работе аппроксимирующих функций для зависимостей  $K_{тр}$ ,  $K_{тр,y}$  и  $K_{тр,w}$  от  $(\Delta l / l)_{тр}$  составляют в основном от 0,1 до 0,59. В соответствии с известной шкалой Чеддока это соответствует наличию слабой ( $r = 0,1 - 0,3$ ), умеренной ( $r = 0,3 - 0,5$ ) и заметной ( $r = 0,5 - 0,7$ ) корреляции между исследуемыми параметрами.

Для большинства этих зависимостей статистически значимой корреляции не наблюдается, так как  $t_r < t_p$ . Причем это имеет место даже при отбрасывании значений, имеющих наибольшие, аномально отличающиеся от остальных, отклонения от линии аппроксимации. Только после нагревания при 800 °С для зависимостей  $K_{тр,v}$  и  $K_{тр,w}$  от  $(\Delta l / l)_{тр}$  корреляция статистически значима.

Коэффициенты корреляции  $r$ , установленных в работе аппроксимирующих функций для зависимостей  $(\Delta l / l)_{тр}$  от  $\sigma_{МФБ} / R_{МФБ.Р}$  составляют в основном от 0,32 до 0,939. В соответствии с шкалой Чеддока это соответствует наличию умеренной ( $r = 0,3 - 0,5$ ), заметной ( $r = 0,5 - 0,7$ ), высокой ( $r = 0,7 - 0,9$ ) и весьма высокой ( $r = 0,9 - 1$ ) корреляции между исследуемыми параметрами.

Для большинства зависимостей  $(\Delta l / l)_{тр}$  от  $\sigma_{МФБ} / R_{МФБ.Р}$  наблюдается статистически значимая корреляция, так как  $t_r > t_p$ . Корреляция статистически не значима только для объединенной зависимости после 200 °С

и отдельных зависимостей для сталефибробетонов с фибрами ФСП-А 30x0,3 и ФСПВ 30x0,8.

Отсутствие во многих случаях статистически значимой корреляции между исследуемыми факторами, по-видимому, связано с уже отмеченными ранее относительно большими погрешностями при определении исследуемых величин вследствие особенностей материала и вследствие определения исследованных параметров, как разностей и частных от деления, когда погрешности суммируются. В связи с этим, для проверки возможности использования полученных аппроксимирующих выражений, более важной является проверка адекватности выбранных линий аппроксимации полученным данным.

Результаты проверки адекватности всех установленных аппроксимирующих выражений также показаны в таблице 4. Видно, что все установленные аппроксимирующие выражения при отбрасывании значений, имеющих наибольшие, аномально отличающиеся от остальных, отклонения от линии аппроксимации, адекватно (при  $F_a \leq F_p$ ) описывают рассматриваемые зависимости с учетом погрешностей определения исследуемых параметров. Это доказывает возможность использования выбранных моделей и полученных аппроксимирующих аналитических выражений для прогнозирования влияния параметров дисперсного армирования на термические изменения сталефибробетонов. Погрешности прогнозирования аппроксимирующими выражениями коэффициентов  $K_{TR}$ ,  $K_{TR,V}$ ,  $K_{TR,W}$  и  $(\Delta l / l)_{TR}$  приведены в таблице 6 как  $\Delta u$ .

Вместе с тем для аппроксимирующих выражений, описывающих зависимость  $K_{TR,V}$  от  $(\Delta l / l)_{TR}$  (для изменений скорости прохождения ультразвука) после нагревания при 110, 200, 600 и 800 °С, влияние явно не значимо. В связи с этим значения  $K_{TR,V}$  после воздействия этих температур

---

можно считать постоянными величинами в исследуемом диапазоне  $(\Delta l / l)_{\text{ГР}}$  (то есть не зависящими от  $(\Delta l / l)_{\text{ГР}}$ ).

### **Основные положения методики прогнозирования термических изменений сталефибробетонов**

На основании результатов исследований, опубликованных ранее в работах [22, 23], а также полученных в настоящей работе сформулирована методика прогнозирования термических изменений сталефибробетонов, характеризующих стойкость сталефибробетонов к термическим воздействиям, при различных параметрах дисперсного армирования.

Исходными данными методики являются:

- значение воздействующей температуры нагревания  $T$ ;
- технологический состав матрицы сталефибробетона;
- плотность, модуль деформации, прочность при растяжении матрицы;
- вид, параметры, объемное содержание, модуль упругости материала фибры;
- относительные термические деформации и изменения массы, плотности, прочности при изгибе, водонепроницаемости, при необходимости скорости ультразвука матрицы.

Прогнозирование проводится с использованием полученных в работе аппроксимирующих выражений, описывающих установленные с использованием выбранных моделей закономерности и зависимости, в следующей последовательности:

1. Определяется влияние фибры на плотность матрицы в составе сталефибробетона в виде значения относительной плотности матрицы в составе сталефибробетона  $k_{\gamma_{\text{МФБ}}}$ , представляющего отношение плотности  $\gamma_{\text{МФБ}}$  матрицы в составе сталефибробетона к плотности  $\gamma_{\text{М}}$  матрицы без фибры

2. На основании  $k_{\gamma_{\text{МФБ}}}$  выполняется учет влияния отличия плотности матрицы в составе сталефибробетона от плотности матрицы без фибры на свойства, термические деформации и термические изменения свойств матрицы.

3. На основании данных о параметрах дисперсного армирования, термических деформациях матрицы, прочности на растяжение и модуля деформации матрицы рассчитываются значения нерелаксированных структурных растягивающих напряжений в матрице  $\sigma_{\text{ФБМ}}$  и отношение  $\sigma_{\text{МФБ}}/R_{\text{МФБ.Р}}$  этих напряжений к прочности матрицы на растяжение после нагревания при температуре  $T$ .

4. На основании величины  $\sigma_{\text{МФБ}}/R_{\text{МФБ.Р}}$  и температуре  $T$  определяются относительное изменение линейных размеров сталефибробетонов за счет образования трещин.

5. На основании данных о термических деформациях матрицы, фибры и изменений линейных размеров сталефибробетона за счет образования трещин рассчитываются термические изменения размеров сталефибробетон.

6. На основании данных об относительном изменении размеров сталефибробетонов за счет образования трещин и температуре определяются значения коэффициентов  $K_{\text{тр}}$ ,  $K_{\text{тр.В}}$  и  $K_{\text{тр.В}}$ , по которым на основании данных о термических изменениях свойств матрицы в составе фибробетона определяются термические изменения свойств сталефибробетона.

7. На основании относительных изменений массы и линейных размеров матрицы, а также размеров фибробетона определяются относительные изменения плотности сталефибробетона.

### Заключение

Результаты расчетных исследований, выполненных ранее в работах [22, 23], а также полученных в настоящей работе на основании опубликованных

---

ранее в работах [20, 21] экспериментальных исследований, выполненных с целью разработки методики прогнозирования стойкости сталефибробетонов к термическим воздействиям, при различных параметрах дисперсного армирования позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Результаты исследований показали, что модели, выбранные для аналитического описания процессов термических изменений свойств сталефибробетонов относительно изменений свойств матрицы с учетом параметров дисперсного армирования, можно использовать в качестве основы для проведения расчетных исследований по обоснованию и разработке методики прогнозирования термических изменений сталефибробетонов, характеризующих их стойкость к термическим воздействиям.

2. В связи с установленным ранее в работах [22, 23] влиянием фибры на плотность и термические изменения массы матриц в составе сталефибробетонов, в расчетных исследованиях использовали фактические термические деформации и изменения свойств матрицы в составе исследованных сталефибробетонов, вычисленные в работе [23], что позволило выполнить более корректные расчетные исследования.

Установлено, что вычисленные термические изменения линейных размеров фибробетонов после нагревания за счет образования трещин зависят от содержания и вида фибры, температуры нагревания. Однако степень влияния этих факторов различна в разных диапазонах значений этих факторов и часто искажается (маскируется) наблюдаемым разбросом полученных экспериментальных данных из-за погрешностей измерений, вследствие особенностей материала и вследствие определения исследуемого параметра, как разности между термическими изменениями размеров сталефибробетонов и матрицы, когда погрешности суммируются. Это потребовало проводить анализ полученных результатов отдельно после

---

воздействия различных температур и проводить проверку адекватности полученных аппроксимирующих зависимостей.

На основании расчетных исследований, в соответствии с принятой гипотезой и выбранными моделями исследованы зависимости термических изменений свойств сталефибробетонов относительно изменений матрицы, как коэффициентов, равных отношению после нагревания относительного значения свойств фибробетонов к относительному значению свойств матрицы, от изменений линейных размеров за счет образования трещин в фибробетоне. Установлено, что влияние изменений размеров за счет образования трещин существенно на коэффициенты изменения прочности при изгибе и водонепроницаемость, но в основном незначительно на коэффициенты изменения скорости ультразвука.

3. Установлено, что после воздействия каждой из исследованных температур наблюдается различная для каждой температуры корреляционная зависимость между коэффициентами изменения прочности при изгибе и водонепроницаемостью от изменения линейных размеров за счет образования трещин в фибробетоне, что подтверждает правильность принятой рабочей гипотезы, принятых допущений и выбранных моделей.

Расчетным путем исследована зависимость вычисленных термических изменений линейных размеров сталефибробетонов за счет образования трещин с фиброй разного вида различного их содержания по объему после нагревания до 110-1100 °С от величины отношения расчетных нерелаксированных растягивающих структурных напряжений в матрице к прочности матрицы на растяжение. Установлено, что при рассмотрении этих соотношений отдельно для различных температур, но объединенных для всех фибробетонов на разных фибрах имеется различная для каждой температуры корреляция. По результатам статистических исследований коэффициенты корреляции  $r$  установленных в работе зависимостей составляют в основном

---



от 0,1 до 0,939, что соответствует наличию слабой ( $r = 0,1 - 0,3$ ), умеренной ( $r = 0,3 - 0,5$ ), заметной ( $r = 0,5 - 0,7$ ), высокой ( $r = 0,7 - 0,9$  и весьма высокой ( $r = 0,9 - 1$ ) корреляции между исследуемыми параметрами. В связи с этим для многих зависимостей статистически значимой корреляции не наблюдается, что в основном связано с относительно большими погрешностями при определении исследуемых величин вследствие особенностей структуры материала и вследствие определения исследованных параметров, как разностей и частных от деления, когда погрешности суммируются.

4. Результаты статистической проверки адекватности свидетельствуют о том, что большинство установленных аппроксимирующих аналитических выражений адекватно описывают рассматриваемые зависимости с учетом погрешностей определения исследуемых параметров, а остальные близки к условию адекватности. Это доказывает возможность использования выбранных моделей и полученных аппроксимирующих аналитических выражений для прогнозирования влияния параметров дисперсного армирования на термические изменения сталефибробетонов. Определены погрешности прогнозирования аппроксимирующими выражениями коэффициентов при определении термических деформаций и свойств сталефибробетонов.

5. На основании выполненных исследований сформулирована методика прогнозирования термических деформаций и изменений массы, размеров за счет образования трещин, прочности при изгибе, водонепроницаемости сталефибробетонов, характеризующих стойкость сталефибробетонов к термическим воздействиям, на основании термических деформаций и изменений свойств матрицы, параметров дисперсного армирования.

### Литература

1. Красновский Р.О., Денисов А.В., Рогачев К.В. Фибробетон - новый материал для строительства АЭС // Энергетик № 12, 2013. С. 46-47.
2. Стиховин В.Е., Распопов С.И. Опыт изготовления сталефибробетонных изделий для атомной промышленности. URL: [tehnobeton.ru/category/tb-9-10-2018-26-28](http://tehnobeton.ru/category/tb-9-10-2018-26-28).

3. Рабинович. Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. Монография. М.: Издательство АСВ, 2011. 642 с.

4. Страданченко С.Г., Плешко М.С., Армейсков В.Н. Разработка эффективных составов фибробетона для подземного строительства//Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1995.

5. Маилян А.Л., Айвазян Э.С., Маилян Л.Р. Расчетная оценка прочностных и деформативных характеристик и диаграмм деформирования фибробетонов с агрегированным распределением волокон//Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1760.

6. Талантова К.В., Михеев Н.М. Исследование влияния свойств стальных фибр на эксплуатационные характеристики сталефибробетонных конструкций // Ползуновский вестник 2011, № 1. С.194-198.

7. Блещик Н.П. Коваль И.В. Физико-механические и технологические свойства сталефибробетона, особенности применения и перспективы развития сталефибробетонных конструкций//Третий международный симпозиум проблемы современного бетона и железобетона. №3, 2011. С.7-14.

8. Капустин Д.Е. Несъемная сталефибробетонная опалубка как несущий конструктивный элемент железобетонных конструкций зданий и сооружений АЭС: дис. канд. техн. наук. М., 2016. 282 с.

9. Deepthy S. Nair Performance of steel fiber reinforced concrete under elevated temperature //Journal of Mechanical and Civil Engineering, Volume 13, Issue 3, Ver. II, May- Jun. 2016. Pp. 13-17.

10. Aminuddin J, Izni S., Ibrahima, Hamizah S., Yazana, Nor A. A. Mechanical properties of steel-polypropylene fibre reinforced concrete under elevated temperature//The 5 thInternational Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5), Procedia Engineering 125, 2015. Pp.818 – 824.

---

11. J Novák J., Kohoutková A. Stress-Strain Relation for Hybrid Fiber Reinforced Concrete at Elevated Temperature//World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Structural and Construction Engineering, Vol. 11, No 9, 2017. Pp. 1317-1323.

12. Hossain A., Karim R., Islam M.N., Paul D.K.,. Temperature susceptibility of fiber reinforced cement mortar//31st Conference on Our world in concrete & structures: 16 - 17 August 2006, Singapore. Article Online Id: 100031021. URL: cipremier.com/100031021.

13. Kim J., Lee G.P., Moon D.Y. Evaluation of mechanical properties of steel-fibre reinforced concrete exposed to high temperatures by double-punch test//Construction and Building Materials, 79, 2015. Pp.182–191.

14. Sideris K.K., Manita P., Papageorgiou A., Chaniotakis E. Mechanical Characteristics of High Performance Fibre Reinforced Concretes at Elevated Temperatures//ACI Special Publication, Vol .212, ,06.01.2003. Pp.973-988.

15. Wasan I. Khalil Influence of high temperature on steel fiber reinforced concrete//Journal of Engineering and Development, Vol. 10, No. 2, June 2006. Pp. 139-150.

16. Petrus C., Azharb H.A., Deea G.L., Ismaila R., Alisibramulisi A. Compressive strength of concrete with fibres at elevated temperature //Journal Technology (Sciences & Engineering). 2016. 78:5–4. Pp. 71–74.

17. Zheng W., Luo B., Wang Y. Stress – strain relationship of steel-fibre reinforced reactive powder concrete at elevated temperatures//Materials and Structures. 2015. Vol. 48. Pp. 2299–2314.

18. Tai Y., Pan H., Kung Y. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C. Nuclear Engineering and Design. 2011. V. 241. No 7. Pp. 2416-2424.



19. Lau. A. Effect of high temperatures on normal strength concrete and high performance concrete containing steel fibers: Dissertation theses. The Hongkong polytechnic university, 2003. URL: [hdl.handle.net/10397/3456](http://hdl.handle.net/10397/3456).

20. Zaitsev D.V. Thermal changes in the mass, size and density of steel fiber concrete after calefaction// International Scientific Conference “FarEastCon” 2020. ISSN: 16629795. Vol. 887. Pp 434-439.

21. Зайцев Д. В. Термические изменения сталефибробетонов с различными параметрами дисперсного армирования после воздействия высоких температур // Инженерный вестник Дона. 2021. №5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6945](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6945).

22. Денисов А.В., Зайцев Д. В. Влияние стальной фибры на плотность цементно-песчаной матрицы в составе сталефибробетона для АЭС//Актуальные проблемы строительной отрасли и образования: сборник докладов Первой Национальной конференции (г. Москва, 30 сентября 2020 г.). М.: Издательство МИСИ – МГСУ, 2020. С. 641–647. URL: [mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/](http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/).

23. Денисов А.В., Зайцев Д.В. Влияние параметров дисперсного армирования на плотность и термические изменения матрицы в составе сталефибробетонов//Техника и технология силикатов. Том 28, № 4 С 209-217.

24. Денисов А.В., Рогачев К.В., Иваненко С.В. Результаты проверки модели структуры фибробетона, разработанной для аналитического определения его термических и радиационных изменений, по экспериментальным данным усадки при твердении// «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №4 (2016). URL: [naukovedenie.ru/PDF/43TVN416.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/43TVN416.pdf).

25. Несветаев Г.В., Та Ван Фан. Тепловыделение при гидратации и предел прочности цементного камня// «НАУКОВЕДЕНИЕ». № 3(16), 2013 URL: [naukovedenie.ru/PDF/29trgsu313.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/29trgsu313.pdf)

---

26. Шейкин А.Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня. М.: Стройиздат, 1974, 192 с.

### References

1. Krasnovskij R.O., Denisov A.V., Rogachev K.V. Fibrobeton -. Energetik No 12, 2013.Pp.46-47.

2. Stihovin V.E., Raspopov S.I. Opyt izgotovleniya stalefibrobetonnyh izdelij dlya atomnoj promyshlennosti. [Experience in the manufacture of steel fiber concrete products for the nuclear industry]. URL:tehnobeton.ru/category/tb-9-10-2018-26-28

3. Rabinovich. F.N. Kompozity na osnove dispersno armirovannyh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstrukcii.[ Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, construction]. Monografiya. M.: Izdatel'stvo ASV, 2011. 642 p.

4. Stradanchenko S.G., Pleshko M.S., Armejskov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, No 4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1995/

5. Mailjan A.L., Ajvazjan Je.S., Mailjan L.R., Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1760

6. Talantova K.V., Miheev N.M. Polzunovskij vestnik 2011, № 1. Pp. 194-198.

7. Bleshchik N.P., Koval I.V. Tretij mezhdunarodnij simpozium problemy sovremennogo betona i zhelezobetona. №3, 2011. Pp.7-14.

8. Kapustin D.E. Nesiemnaya stalefibrobetonnaya opalubka kak nesushchij konstruktivnij element zhelezobetonyh konstrukcij zdaniy i sooruzhenij AES [Non-removable steel-fiber-reinforced concrete formwork as a bearing structural element of reinforced concrete structures of buildings and structures of nuclear power plants]: dis. kand. tekhn. nauk. M., 2016. 282 p.

9. Deepthy. S. Nair. Journal of Mechanical and Civil Engineering, Volume 13, Issue 3, Ver. II, May- Jun. 2016, Pp. 13-17.

10. Aminuddin J, Izni S., Ibrahima, Siti Hamizah S., Yazana, Siti Nor A. A. Rahim Mechanical properties of steel-polypropylene fibre reinforced concrete under elevated temperature. The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5), Procedia Engineering 125, (2015). Pp. 818 – 824.

11. Novák J., Kohoutková A. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Structural and Construction Engineering Vol. 11, No 9, 2017. Pp. 1317-1323.

12. Hossain A., Karim R., Islam M.N., Paul D.K., Temperature susceptibility of fiber reinforced cement mortar. 31st Conference on Our world in concrete & structures: 16 - 17 August 2006, Singapore. Article Online Id: 100031021. URL: [cipremier.com/100031021](http://cipremier.com/100031021)

13. Kim J., Lee G.P., Young D. Construction and Building Materials, 79, 2015. Pp. 182–191.

14. Sideris K.K., Manita P., Papageorgiou A., Chaniotakis E. ACI Special Publication, Vol. 212, 06.01.2003. Pp. 973-988.

15. Wasan I. Khalil, Journal of Engineering and Development, Vol. 10, No. 2, June 2006. Pp. 139-150.

16. Petrus C., Azharb H.A., Deea G.L., Ismaila R., Alisibramulisi A. Journal Technology (Sciences & Engineering). 2016. 78:5–4. Pp. 71–74.

17. Zheng W., Luo B., Wang Y. Materials and Structures. 2015. Vol. 48. Pp. 2299–2314.

18. Tai Y., Pan H., Kung Y. Nuclear Engineering and Design. 2011. V. 241. No 7. Pp. 2416-2424.

19. Lau. A. Effect of high temperatures on normal strength concrete and high performance concrete containing steel fibers: Dissertation theses. The Hongkong polytechnic university, 2003. URL: [hdl.handle.net/10397/3456](http://hdl.handle.net/10397/3456).

20. Zaitsev D.V. Thermal changes in the mass, size, and density of steel fiber concrete after calefaction// International Scientific Conference “FarEastCon” 2020. ISSN: 16629795.Vol. 887. Pp 434-439.

21. Zajcev D.V. Inzhenernyj Vestnik Dona.: 2021. №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6945.

22. Denisov A.V., Zajcev D.V. Vliyanie stalnoj fibry na plotnost cementno-peschanoj matricy v sostave stalefibrobetona dlya AES [Influence of steel fiber on the density of the cement-sand matrix in the composition of steel fiber reinforced concrete for nuclear power plants]. Aktualnye problemy stroitelnoj otrasli i obrazovaniya: sbornik dokladov Pervoj Nacionalnoj konferencii (g. Moskva, 30 sentyabrya 2020 g.). M.: Izdatelstvo MISI – MGSU, 2020. URL: mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/. Pp. 641-647.

23. Denisov A.V., Zajcev D.V. Tekhnika i tekhnologiya silikatov. Tom 28, № 4 Pp. 209-217.

24. Denisov A.V., Rogachev K.V., Ivanenko S.V. «NAUKOVEDENIE» Tom 8, №4 (2016). URL: naukovedenie.ru/PDF/43TVN416.pdf.

27. Nesvetaev G.V., Ta Van Fan. «NAUKOVEDENIE». № 3(16), 2013 URL: naukovedenie.ru/PDF/29trgsu313.pdf

25. Shejkin A.E. Struktura, prochnost i treshchinostojkost cementnogo kamnya [Structure, strength and crack resistance of cement stone].M.:Strojizdat, 1974, 192 p.