

УДК 620.172.212

*ЧЕРНОУСОВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,  
ntotezis@mail.ru*

*ЧЕРНОУСОВ РОМАН НИКОЛАЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,  
ozzgood@inbox.ru*

*СУХАНОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, инженер,  
pm03sav@mail.ru*

*Липецкий государственный технический университет,  
398600, г. Липецк, ул. Московская, д. 30*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ АНКЕРОВКИ СТАЛЬНОЙ ФИБРЫ В МЕЛКОЗЕРНИСТОМ ШЛАКОБЕТОНЕ**

Проведены испытания на выдергивание гладкой стальной фибры и фибры с одиночными отгибами по концам из мелкозернистого шлакобетона. Получены эмпирические зависимости смещения фибры от приложенной нагрузки. На основе результатов анализа эмпирических данных предложены кусочно-линейные диаграммы, описывающие смещение гладкой фибры и фибры с одиночным отгибом на конце из мелкозернистого шлакобетона. Предложены зависимости для определения координат характеристических точек кусочно-линейной диаграммы, описывающей смещение стальной фибры, расположенной под различными углами к оси приложения нагрузки.

**Ключевые слова:** мелкозернистый шлакобетон; фибра; анкеровка; прочность шлакобетона на сжатие.

*NIKOLAI N. CHERNOUSOV, PhD, A/Professor,  
ntotezis@mail.ru*

*ROMAN N. CHERNOUSOV, PhD, A/Professor,  
ozzgood@inbox.ru*

*ANDREI V. SUKHANOV, Engineer,  
pm03sav@mail.ru*

*Lipetsk State Technical University,  
30, Moskovskaya Str., 398600, Lipetsk, Russia*

## **A STUDY OF STEEL FIBER ANCHORING IN FINE-GRAINED SLAG CONCRETE**

The paper presents test results on steel fiber and single-bend fiber pulling out of fine-grained concrete. Empirical curves are obtained for fiber displacements induced by the load. The analysis of empirical data allows constructing piecewise diagrams for both uniform and single-bend fibers displaced in fine-grained concrete. Dependencies are suggested for the determination of characteristic point coordinates on the piecewise diagram that describes the displacement of steel fiber located at different angles to the axial load.

**Keywords:** fine-grained slag concrete; fiber; anchoring; compressive strength

Расширение применения железобетонных конструкций из бетонов, позволяющих использовать для их производства вторичные отходы различных отраслей промышленности и местные заполнители, способствует экономич-

ному потреблению материальных и энергетических ресурсов, снижению стоимости и трудоёмкости технологических процессов. К таким бетонам, в частности, относится мелкозернистый шлакобетон на основе отсева от дробления литого шлакового щебня [1].

В настоящее время мелкозернистый шлакобетон нашёл применение при проектировании конструкций транспортных сооружений: в устройстве оснований дорожных одежд из сталефиброшлакобетона классов бетона-матрицы В10, В15 и др.

Несмотря на столь широкое применение шлакобетонных и сталефиброшлакобетонных конструкций в современном строительстве, многие особенности их прочностных характеристик изучены явно недостаточно. В первую очередь это относится к проблеме моделирования работы отдельного фиброволокна в элементе из мелкозернистого шлакобетона.

Работа композиционных материалов, в частности сталефибробетона (СФБ), регулируется суммарным вкладом механики взаимодействия фибр с мелкозернистым бетоном [2].

В настоящее время не существует идеальной системы тестирования и моделирования, позволяющей полностью предсказывать механику поведения композитов даже в случае одноосного растяжения. Тем не менее, результаты тестов и выводы из экспериментов всегда можно использовать для качественного сравнения типов фибр, их геометрических характеристик и типов бетона.

В обширной номенклатуре известных конструктивных решений стальных фибр наиболее эффективными являются фибры «Драмикс» с одним отгибом по их концам. Эти фибры отличаются высокой прочностью на разрыв и широко используются для армирования бетонных материалов во многих странах. Тем не менее, указанные фибры, как показали испытания, не во всех случаях удовлетворяют требованиям по их анкеровке в бетоне (несмотря на имеющиеся отгибы) [3].

Проведение настоящего исследования обусловлено необходимостью в получении экспериментальных данных, позволяющих строить модели поведения сталефиброшлакобетонных конструкций, работающих в условиях различных видов нагружения.

В проведённых исследованиях в качестве волокна использовались фрагмент фибры (гладкая проволока) и сама фибра «Драмикс» бельгийской фирмы «Бекарт» диаметром 0,8 мм, с временным сопротивлением разрыву  $R_f = 980\text{--}1200$  МПа.

Испытания проводились в специально разработанном устройстве, позволяющем определять смещение фибры при выходе из бетона-матрицы, прочностные характеристики которого приведены в работе [4].

Опытные образцы и схемы анкеровки фибры в образцах представлены на рис. 1.

В исследуемых составах использовались в качестве вяжущего цемент марки ПЦ500-Д0 Липецкого цементного завода и пластифицирующая добавка Реламикс (10%-й раствор), а в качестве заполнителя – отсев от дробления литого шлакового щебня фракции 0–5 мм с насыпной плотностью от 1085 до

1135 кг/м<sup>3</sup>. В исследованиях использовались составы экспериментальных образцов, представленные в таблице.

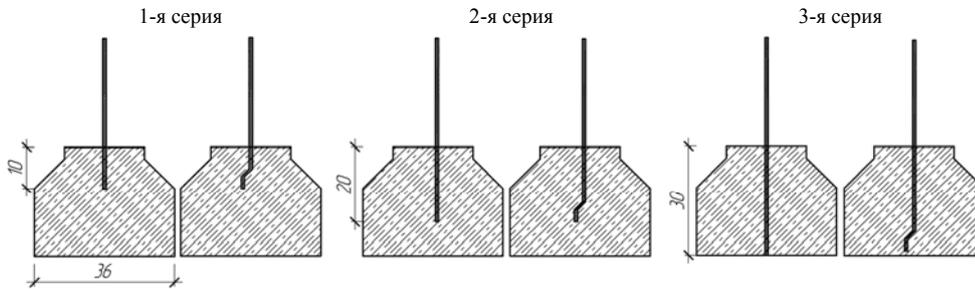


Рис. 1. Опытные образцы

### Составы бетона для каждой серии образцов

№ состава	Класс (марка)	Расход компонентов, кг/м <sup>3</sup>		
		Цемент	Отсев от дробления литого шлакового щебня	Вода
1	B7,5 (M100)	350	1555	190
2	B12,5 (M150)	400	1560	185
3	B15 (M200)	420	1510	190
4	B20 M(250)	440	1463	200

Прочность бетона на сжатие определялась предварительно на стандартных образцах согласно указаниям ГОСТ 10180–90. Твердение бетона происходило в лабораторных условиях в течение 50 сут при температуре  $18 \pm 2$  °C и влажности  $65 \pm 5$  %. Нагружение бетона при испытании на сжатие происходило со скоростью  $0,6 \pm 0,4$  МПа/с. Скорость нагружения зажатого конца фибры при испытании на выдёргивание составляла  $0,35 \pm 0,1$  МПа/с.

Длина заделки составляла 10 мм – 1-я серия, 20 мм – 2-я серия и 30 мм – 3-я серия испытаний.

Целью данного исследования являлось определение зависимости прочности и жесткости анкеровки стальных фибр в мелкозернистом шлакобетоне от прочности бетона на сжатие  $R_m$ .

Эмпирические кривые зависимости «смещение-нагрузка» гладкой фибры и фибры с отгибом на концах представлены на рис. 2.

Большинство исследователей предлагают описывать диаграмму «нагрузка-смещение» посредством характерных точек, полученных из анализа эмпирических кривых выхода гладкой фибры из бетона [5, 6]. Такие диаграммы являются кусочно-линейными и имеют различный вид, который зависит как от прочностных характеристик бетона и фибры, так и от величин, определяющих характер взаимодействия стальной фибры и бетона.

Графики (рис. 2) иллюстрируют влияние прочности бетона на характер поведения гладкой стальной фибры и фибры с одиночным отгибом на конце при действии на неё вытягивающей нагрузки.

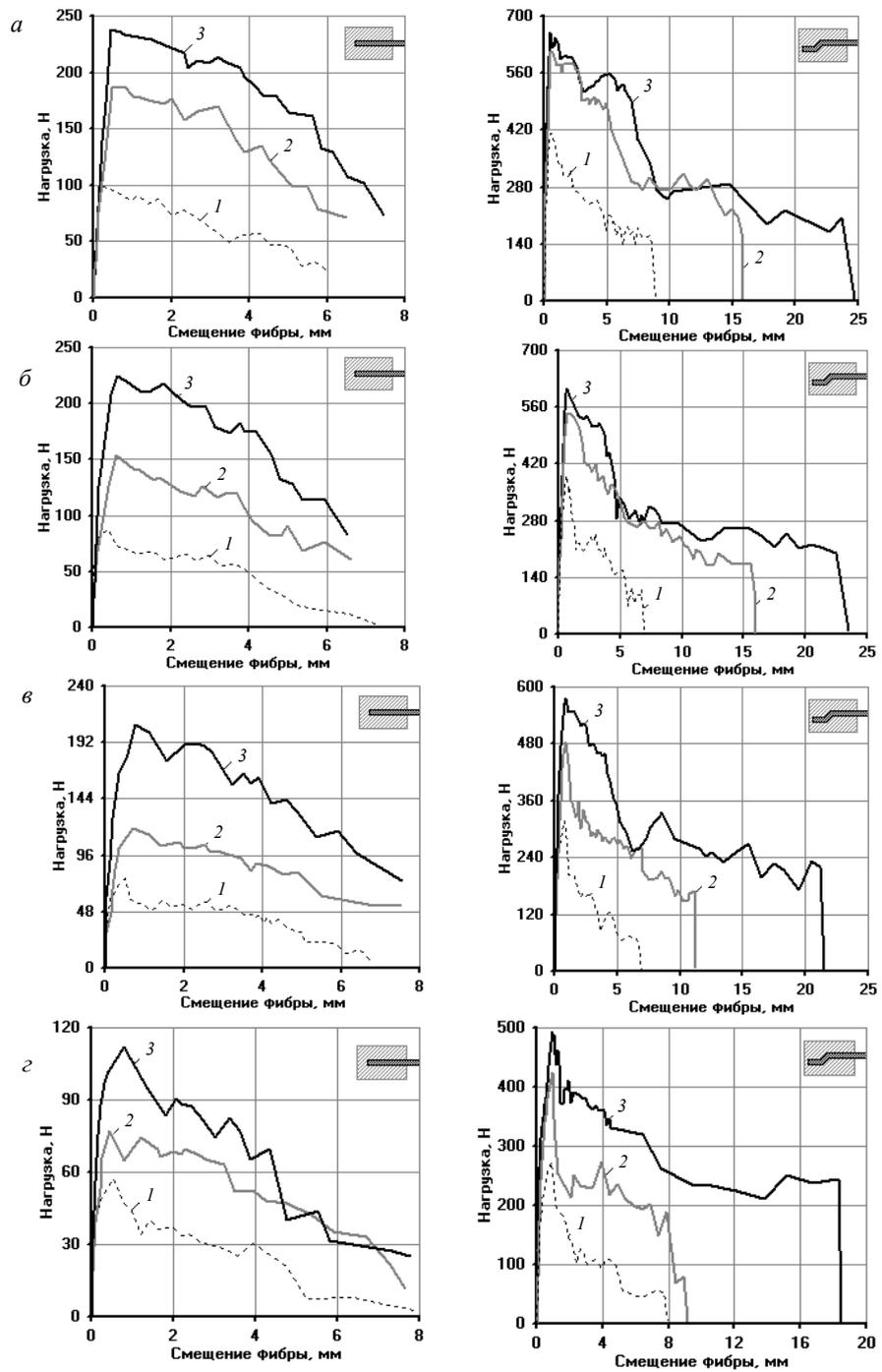


Рис. 2. Экспериментальные зависимости «нагрузка-смещение» загруженного конца гладкой фибры и фибры с отгибом на концах:  
 а – прочность бетона  $R_m = 27,6$  МПа; б – прочность бетона  $R_m = 22,01$  МПа; в – прочность бетона  $R_m = 18,3$  МПа; г – прочность бетона  $R_m = 8,6$  МПа; цифрами обозначены номера серий

Кривую «нагрузка-смещение» загруженного конца гладкой стальной фибры, заделанной в мелкозернистый шлакобетон, можно представить в виде, изображенном на рис. 3. На диаграмме максимальная нагрузка  $P_{S01}$  достигается в точке  $S_{01}$ . До достижения нагрузки значения  $P_{S01}$  имеет место упругая стадия работы фибры и бетона. На этой стадии, до точки  $S_{01}$ , значительное влияние оказывает адгезия цементного камня к стальной фибре; на участке  $b$  происходит постепенный разрыв связей между поверхностью стальной фибры и бетоном. После точки  $b$  диаграмма определяется величиной касательных напряжений, возникающих на поверхности фибры в результате действия сил трения.

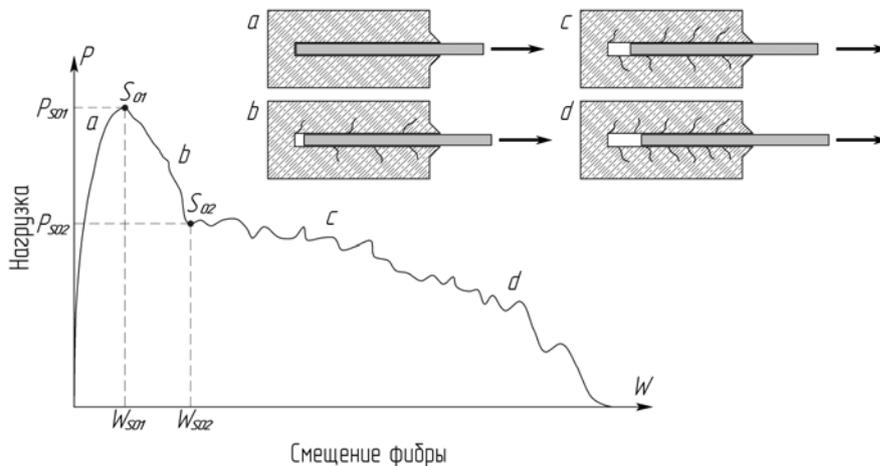


Рис. 3. Условная диаграмма «усилие-смещение» для гладкой стальной фибры

Кривые «нагрузка-смещение» загруженного конца фибры с одиночным отгибом на конце (рис. 4) можно разделить на три типа, которым соответствуют следующие условия.

1. Бетон имеет высокую прочность (класс В20 и выше). Фибра выпрямляется и на выходе имеет вид прямой гладкой проволоки (рис. 4, а). Максимальная нагрузка  $P_{H01}$  достигается в точке  $H_{01}$ . После второго пика в точке  $H_{02}$  нагрузка постепенно снижается до значения  $P_{H02}$ , затем медленно достигает нуля.

2. Бетон имеет среднюю прочность (класс В7,5–В15). Фибра частично выпрямляется, деформируя бетон, и на выходе имеет вид почти прямой гладкой проволоки (рис. 4, б). Первый пик нагрузки достигается в точке  $H_{01}$ , после чего нагрузка достигает второго пика в точке  $H_{02}$ . В большинстве случаев нагрузка  $P_{H01}$  превышает нагрузку  $P_{H02}$ , и максимальная нагрузка достигается в точке  $H_{01}$ . После третьего пика в точке  $H_{03}$  нагрузка падает до значения  $P_{H04}$ , затем медленно достигает нуля.

3. Бетон имеет низкую прочность (В7,5 и ниже). Бетон скалывается или деформируется, фибра не выпрямляется и на выходе имеет первоначальный вид (рис. 4, в). Диаграмма имеет один максимум – при нагрузке  $P_{H01}$ .

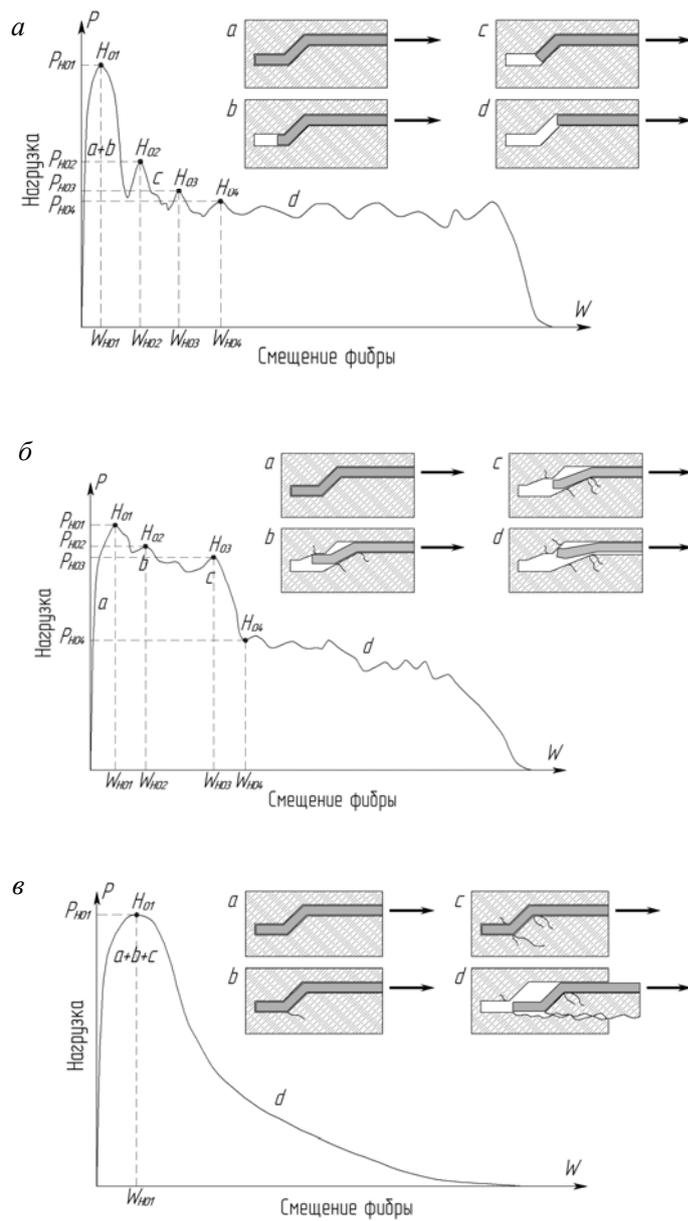


Рис. 4. Условные диаграммы «усилие-смещение» для стальной фибры с одиночным отгибом на конце

Данное деление является условным и допускает множество промежуточных вариантов [2].

На практике диаграмму «нагрузка-смещение» удобно представлять в кусочно-линейном виде посредством ряда характеристических точек. В работе [6] предложены кусочно-линейные диаграммы для описания смещения гладкой стальной фибры и фибры с одиночным отгибом на конце из бетона, представленные на рис. 5.

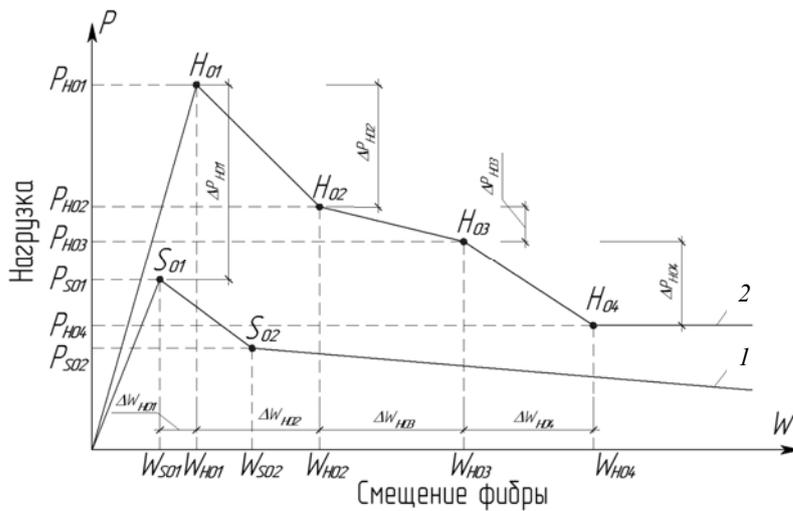


Рис. 5. Кусочно-линейные диаграммы «нагрузка-смещение» для гладкой стальной фибры (1) и для фибры с одиночным отгибом на конце (2)

Анализ экспериментальных данных позволил получить зависимости, определяющие значения координат характеристических точек диаграммы «нагрузка-смещение» для гладкой стальной фибры:

$$\text{– для точки } S_{01} \quad W_{S01} = \frac{R_m \sqrt[3]{l_{an}^2}}{250}, \quad P_{S01} = \frac{R_m l_{an}}{3};$$

$$\text{– для точки } S_{02} \quad W_{S02} = \frac{R_m \sqrt[3]{l_{an}^2}}{100}, \quad P_{S02} = \frac{R_m l_{an}}{3,5}.$$

Для фибры с одиночным отгибом на конце координаты характеристических точек диаграммы «нагрузка-смещение» имеют вид:

$$\text{– для точки } H_{01} \quad W_{H01} = 1 - 0,02R_m,$$

$$P_{H01} = (355 + 11R_m)(0,55 + 0,015l_{an});$$

$$\text{– для точки } H_{02} \quad W_{H02} = 3W_{H01}, \quad P_{H02} = 0,7P_{H01};$$

$$\text{– для точки } H_{03} \quad W_{H03} = 6W_{H01}, \quad P_{H03} = 0,6P_{H01};$$

$$\text{– для точки } H_{04} \quad W_{H04} = 8W_{H01}, \quad P_{H04} = 0,4P_{H01}.$$

Здесь  $l_{an}$  – длина заделки фибры, (мм);  $R_m$  – прочность бетона на сжатие, МПа. Важно, что данные зависимости применимы также для описания работы фибры, заделанной в цементно-песчаный бетон, и могут быть использованы взамен более сложных зависимостей, представленных в работе [2].

На основе данных, полученных из зависимостей, возможно построение аналитических кусочно-линейных кривых «нагрузка-смещение», описывающих работу фибры в мелкозернистом бетоне, ориентированную под углом  $\theta$  по отношению к оси приложения нагрузки. Такая диаграмма представлена на рис. 6.

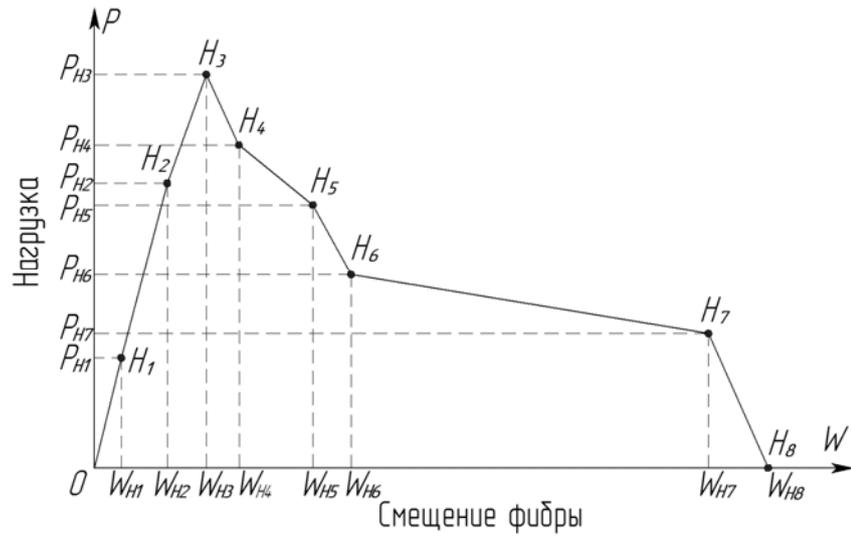


Рис. 6. Кусочно-линейная диаграмма «нагрузка-смещение» для стальной фибры с одиночным отгибом на конце, ориентированной под углом  $\theta$  по отношению к оси приложения нагрузки

Координаты характеристических точек данной кривой определяются с учётом зависимостей, представленных в работе [6], из следующих выражений:

– для точки  $H_1$   $W_{H1} = W_{S01}$ ,  $P_{H1} = P_{S01} \cos \theta$ ;

– для точки  $H_2$

$$W_{H2} = W_{H1} + \frac{l_{an} - 6}{l_{an}} \Delta W_{H01} \cos \theta + 1 - \cos \theta,$$

$$P_{H2} = \left( P_{S01} \left( \frac{l_{an} - 1}{l_{an}} \right) + \Delta P_{H01} \frac{l_{an} - 6}{l_{an}} \right) \cos \theta + \mu P_{S01} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2};$$

– для точки  $H_3$   $W_{H3} = W_{H1} + \Delta W_{H01} \cos \theta + 2(1 - \cos \theta)$ ,

$$P_{H3} = \left( P_{S01} \left( \frac{l_{an} - 2}{l_{an}} \right) + \Delta P_{H01} \right) \cos \theta + \mu P_{H01} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2};$$

– для точки  $H_4$   $W_{H4} = W_{H3} + \Delta W_{H02} \cos \theta$ ,

$$P_{H4} = \left( P_{S01} \left( \frac{l_{an} - 2 + \Delta W_{H02}}{l_{an}} \right) + \sum_{i=1}^2 \Delta P_{H0i} \right) \cos \theta + \mu P_{H01} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2};$$

– для точки  $H_5$   $W_{H5} = W_{H4} + \Delta W_{H03} \cos \theta$ ,

$$P_{H5} = \left( P_{S01} \left( \frac{l_{an} - 2 - \sum_{i=2}^3 \Delta W_{H0i}}{l_{an}} \right) + \sum_{i=1}^3 \Delta P_{H0i} \right) \cos \theta + \mu P_{H01} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2};$$

– для точки  $H_6$   $W_{H6} = W_{H5} + \Delta W_{H04} \cos \theta$ ,

$$P_{H6} = \left( P_{S02} \left( \frac{l_{an} - 2 - \sum_{i=2}^4 \Delta W_{H0i}}{l_{an}} \right) + \sum_{i=1}^4 \Delta P_{H0i} \right) \cos \theta + \mu P_{H01} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2};$$

– для точки  $H_7$   $W_{H7} = l_{an} - 4$ ,

$$P_{H7} = \left( \sum_{i=1}^4 \Delta P_{H0i} \right) \cos \theta + \mu P_{H01} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2};$$

– для точки  $H_8$   $W_{H7} = l_{an} - 2$ ,  $P_{H8} = 0$ .

Здесь  $\theta$  – угол наклона фибры к оси приложения нагрузки;  $\mu$  – коэффициент трения между стальной фиброй и шлакобетоном ( $\mu \approx 0,15$ ).

Данные зависимости являются универсальными и служат для построения аналитических кусочно-линейных кривых «нагрузка-смещение», описывающих работу фибры, заделанной в мелкозернистый цементно-песчаный или шлакобетон и ориентированной под углом  $\theta$  по отношению к оси приложения нагрузки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черноусов, Р.Н. Прочность и деформативность элементов конструкций транспортных сооружений на основе мелкозернистого сталефиброшлакобетона / Р.Н. Черноусов // Научный вестник Воронеж. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2011. – № 1(21). – С. 87–97.
2. Черноусов, Н.Н. Исследование анкеровки стальной фибры в цементно-песчаном бетоне / Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов, А.В. Суханов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 2014. – № 2. – С. 96–103.
3. Рабинович, Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов / Ф.Н. Рабинович. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 560 с.
4. Черноусов, Н.Н. Моделирование прочностных и деформативных свойств мелкозернистого цементно-песчаного бетона при осевом растяжении и сжатии / Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов, А.В. Суханов // Строительные материалы. – 2013. – № 10. – С. 12–14.
5. Bentur, A. Fibre Reinforced Cementitious Composites. Second edition / A. Bentur, S. Midness. – New York, London: Taylor & Francis, 2007. – 604 p.
6. Laranjeira, F. Predicting the pullout response of inclined hooked steel fibers / F. Laranjeira, C. Molins, A. Aguado // Cement and concrete research. – 2010. – No. 40. – Pp. 1471–1487.

#### REFERENCES

1. Chernousov R.N. Prochnost' i deformativnost' elementov konstruktssii transportnykh sooruzhenii na osnove melkozernistogo stalefibroshlakobetonā [Strength and deformation of structural elements of transport facilities based on fine-grained fiber-reinforced concrete]. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2011. No. 1. Pp. 87–97. (rus)

2. *Chernousov N.N., Sukhanov A.V.* Issledovanie ankerovki stal'noi fibry v tsementno-peschanom betone [A study of steel fiber anchoring in fine-grained concrete]. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 2014. No. 2. Pp. 96–103. (rus)
3. *Rabinovich F.N.* Kompozity na osnove dispersno armirovannykh betonov [Fiber-reinforced concrete composites]. Moscow : ASV Publ., 2007. 560 p. (rus)
4. *Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sukhanov A.V.* Modelirovanie prochnostnykh i deformativnykh svoystv melkozernistogo tsementno-peschanogo betona pri osevom rastyazhenii i szhatii [Modeling of strength and deformation properties of fine-grained concrete under axial tension and compression]. *Construction Materials*. 2013. No. 10. Pp. 12–14. (rus)
5. *Bentur A., Midness S.* Fibre reinforced cementitious composites. Second edition. New York, London : Taylor & Francis, 2007. 604 p.
6. *Laranjeira F., Molins C., Aguado A.* Predicting the pullout response of inclined hooked steel fibers. *Cement and Concrete Research*. 2010. No. 40. Pp. 1471–1487.