

UDC 691.32:625.073

Author: NIZINA Tatyana Anatolevna, Doctor of Engineering, Professor of Department «Building Constructions», National Research Mordovia State University; Bolshevistskaya Str., 68, Saransk, Russian Federation, 430005, nizinata@yandex.ru;

Author: SELYAEV Vladimir Pavlovich, Academician of RAACS, Doctor of Engineering, Head of Department «Building Constructions», National Research Mordovia State University; Bolshevistskaya Str., 68, Saransk, Russian Federation, 430005, ntorm80@mail.ru;

Author: BALYKOV Artemy Sergeevich, Postgraduate student of Department «Building Constructions», National Research Mordovia State University; Bolshevistskaya Str., 68, Saransk, Russian Federation, 430005, artbalrun@yandex.ru;

Author: VOLODIN Vladimir Vladimirovich, Student, National Research Mordovia State University; Bolshevistskaya Str., 68, Saransk, Russian Federation, 430005, volodinvv1994@gmail.com;

Author: KOROVKIN Dmitry Igorevich, Student, National Research Mordovia State University; Bolshevistskaya Str., 68, Saransk, Russian Federation, 430005, asfkorovkin@yandex.ru

OPTIMIZATION OF COMPOSITIONS OF MULTICOMPONENT FINE-GRAINED FIBER CONCRETES MODIFIED AT DIFFERENT SCALE LEVELS

EXTENDED ABSTRACT:

The paper deals with perspectives of modification of cement composites at different scale levels (nano-, micro-, macro-). Main types of micro- and nanomodifiers used in modern concrete technology are presented. Advantages of fullerene particles applied in nanomodification of cement concretes have been shown. Use of complex modifiers based on dispersed fibers, mineral additives and nanoparticles is proposed.

These are the basic components of the fiber fine-grained concretes: cement of class CEM I 42,5R produced by JSC «Mordovcement», river sand of Novostepanovskogo quarry (Smolny settlement, Ichalkovsky district, Republic of Mordovia), densified condensed microsilica (DCM-85) produced by JSC «Kuznetskie Ferrosplavy» (Novokuznetsk), highly active metakaolin white produced by LLC «D-Meta» (Dneprodzerzhinsk), waterproofing additive in concrete mix «Penetron Admix» produced by LLC «Waterproofing materials plant «Penetron» (Ekaterinburg), polycarboxylate superplasticizer Melflux 1641 F (Construction Polymers BASF, Germany). Dispersed reinforcement of concretes was provided by injection of the fibers of three types: polypropylene multifilament fiber with



Key words: optimization, nanomodifier, disperse fiber, mineral additive, fine-grained concrete, tensile strength in bending, tensile compressive strength.

MACHINE-READABLE INFORMATION ON CC-LICENSES (HTML-CODE) IN METADATA OF THE PAPER

[a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/"><a>
Optimization of compositions of multicomponent fine-grained fiber concretes modified at different scale levels by <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2017, Vol. 9, no. 2, pp. 43–65. DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-2-43-65. \(In Russian\)." property="cc:attributionName" rel="cc:attributionURL">Nizina T.A., Selyaev V.P., Balykov A.S., Volodin V.V., Korovkin D.I. is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
Based on a work at <a xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-2-2017/" rel="dct:source">http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-2-2017/
Permissions beyond the scope of this license may be available at <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="nizinata@yandex.ru" rel="cc:morePermissions">nizinata@yandex.ru.](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

1. *Artamonova O.V., Sergutkina O.R.* Stroitel'nye nanomaterialy: tendentsii razvitiya i perspektivy [Building materials: trends and prospects]. Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser.: Fiziko-khimicheskie problemy i vysokie tekhnologii stroitel'nogo materialovedeniya [Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Ser.: Physical-chemical problems and high technology of building materials]. 2013. Vol. 6. pp. 13-23. (In Russian).



2. *Selyaev V.P., Osipov A.K., Pisareva A.S.* Nanochastitsy, poroshki, struktury, tekhnologii: analiticheskii obzor [Nanoparticles, powders, structures, technologies: analytical review]. Saransk, 2010. 84 p. (In Russian).
3. *Bazhenov Yu.M., Falikman V.R., Bulgakov B.I.* Nanomaterialy i nanotekhnologii v sovremennoi tekhnologii betonov [Nanomaterials and nanotechnology in modern concrete technology]. Vestnik MGSU [Bulletin of MSUCE]. 2012. No. 12. pp. 125–133. (In Russian).
4. *Voitovich V.A.* Nanonauka. Nanotekhnologiya. Nanobetony [Nanoscience. Nanotechnology. Nanoconcretes]. Ekspozitsiya. Betony & Sukhie smesi [Exposure. Concretes & Dry mixes]. 2009. 2B (85). pp. 5–7. (In Russian).
5. *Figovsky O.L., Beilin D.A., Ponomarev A.N.* Successful implementations of nanotechnologies in building materials. Nanotekhnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. – 2012. Vol. 4, no. 3, pp. 6–21. Available at: http://nanobuild.ru/en_EN/ (date of access: 12.01.17). (In Russian).
6. *Voitovich V.A.* Stroitel'nye nanomaterialy [Construction nanomaterials]. Rukovoditel' stroitel'noi organizatsii [Head of construction organization]. 2011. No. 2. P. 49. (In Russian).
7. *Gusev B.V., Falikman V.R.* Beton i zhelezobeton v epokhu ustoichivogo razvitiya [Concrete and reinforced concrete in the era of sustainable development]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. 2016. No. 2. pp. 30–38. (In Russian).
8. *Kalashnikov V.I.* Evolyutsiya razvitiya sostavov i izmenenie prochnosti betonov. Betony nastoyashchego i budushchego. Chast' 1. Izmenenie sostavov i prochnosti betonov [Evolution of development of concretes compositions and change in concrete strength. Concretes of present and future. Part 1. Change in compositions and strength of concretes]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2016. No. 1–2. pp. 96–103. (In Russian).
9. *Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I.* Modifitsirovannye vysokokachestvennye betony [Modified high-quality concretes]. Moscow, Publishing Association of Building Universities, 2006. 368 p. (In Russian).
10. *Usharov-Marshak A.V.* Betony novogo pokoleniya – betony s dobavkami [New generation of concretes – concretes with additives]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 2011. No. 1. pp. 78–81. (In Russian).
11. *Usharov-Marshak A.V.* Khimicheskie i mineral'nye dobavki v beton [Chemical and mineral additives in concrete]. Kharkiv, Publishing House «Kolorit», 2005. 280 p. (In Russian).
12. *Kaprielov S.S., Sheinfel'd A.V., Kardumyan G.S.* Novye modifitsirovannye betony [New modified concretes]. Moscow, Printing House «Paradise», 2010. 258 p. (In Russian).
13. *Forster S.W.* High-Performance Concrete – Stretching the Paradigm. Concrete International. October 1994. Vol. 16. No. 10. pp. 33–34.
14. *Aitcin P.-C.* High Performance Concrete. London and New York, E&FN Spon, 2004. 591 p.
15. *Richard P., Cheyrezy M.* Composition of Reactive Powder Concrete. Scientific Division Bouygues. Cement and Concrete Research. 1995. Vol. 25. No. 7. pp. 1501–1511.



16. *Selyaev V.P., Nizina T.A., Balbalin A.V.* Mnogofunkcionalnye modifikatory cementnykh kompozitov na osnove mineralnykh dobavok i polikarboksilatnykh plastifikatorov [Multi-functional modifiers of cement composites based on mineral admixtures and polycarboxylate plasticizers]. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Construction. Series: Construction and architecture]. 2013. No. 31 (50), part 2. pp. 156–163. (In Russian).
17. *Nizina T.A., Balykov A.S.* Analiz kompleksnogo vliyaniya modificiruyushchikh dobavok i dispersnogo armirovaniya na fiziko-mekhanicheskie harakteristiki melkozernistykh betonov [Analysis of the combined effect of the modifier additives and particulate reinforcement on physico-mechanical characteristics of fine-grained concretes]. Regionalnaya arhitektura i stroitel'stvo [Regional Architecture and Construction]. 2015. No. 4. pp. 25–32. (In Russian).
18. *Nizina T.A., Balykov A.S., Saraikin A.S.* Eksperimentalnye issledovaniya dispersno-armirovannykh melkozernistykh betonov s polifunktsionalnymi modifikatorami [Experimental studies of disperse-reinforced fine-grained concretes with the polyfunctional modifiers]. URALNIIPROEKT RAASN [Ural SRI project of RAABS]. 2015. No. 4. pp. 91–96. (In Russian).
19. Tekhnologicheskii reglament na proektirovaniye i vypolneniye rabot po gidroizolyatsii i antikorrozionnoy zashchite monolitnykh i sbornykh be tonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy [Technological regulation for design and execution of works on waterproofing and corrosion protection of monolithic and precast concrete and reinforced concrete structures]. SRO RSPPPG [Self-regulating organization Russian Union of Manufacturers and Suppliers of Penetrating Waterproofing]. Moscow, 2008. 64 p. (In Russian).
20. *Falikman V.R.* Polikarboksilatnye giperplastifikatory: vchera, segodnya, zavtra [Polycarboxylate hyper plasticizers: yesterday, today, tomorrow]. Populyarnoe betonovedeniye [Popular concrete science]. 2009. No. 2 (28). pp. 86–90. (In Russian).
21. *Usharov-Marshak A.V., Babaevskaya T.V., Marek Tsiak.* Metodologicheskie aspekty sovremennoi tekhnologii betona [Methodological aspects of modern concrete technology]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 2002. No. 1. pp. 6–7. (In Russian).
22. *Vasilik P.G., Golubev I.V.* Osobennosti primeneniya polikarboksilatnykh giperplastifikatorov Melflux® [Application features of polycarboxylate hyper plasticizers Melflux®]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2003. No. 9. pp. 24–26. (In Russian).
23. *Rabinovich F.N.* Kompozity na osnove dispersno armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruktsii: Monografiya [Composites based on disperse reinforced concretes. Questions of theory and design, technology, constructions: Monograph]. Moscow, Publishing house ASV, 2004. 560 p. (In Russian).
24. *Nizina T.A., Ponomarev A.N., Balykov A.S.* Melkozernistye dispersno-armirovannyye betony na osnove kompleksnykh modifitsiruyushchikh dobavok [Fine-grained fibre concretes on the basis of complex modifying additives]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2016. No. 7. pp. 68–72. (In Russian).



25. *Rabinovich F.N.* Ob urovnyakh dispersnogo armirovaniya betonov [About levels of particulate reinforcement of concretes]. *Izvestiya Vuzov. Stroitel'stvo* [Proceedings of higher educational institutions. Building.]. 1981. No. 11. pp. 30–36. (In Russian).
26. *Chernyshov E.M., Korotkikh D.N.* Povyshenie treshchinostoykosti tsementnogo betona pri mnogourovnevnom dispersnom armirovanii ego struktury [Increasing the crack resistance of cement concrete in multilevel disperse reinforcement of its structure]. *Modern problems of building materials: seventh academic reading of RAABS. Belgorod*, 2001. pp. 587–598. (In Russian).
27. *Gur'eva V.A., Belova T.K.* Svoistva tsementnykh rastvorov, dispersno armirovannykh modifitsirovannym mikrovoloknom [Properties of cement mortars dispersed reinforced modified microfiber]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Orenburg State University]. 2015. No. 13. pp. 124–127. (In Russian).
28. *Ponomarev A.N.* Vysokokachestvennye betony. Analiz vozmozhnostei i praktika ispol'zovaniya metodov nanotekhnologii [High-quality concretes. Analysis of possibilities and practice of use of nanotechnological methods]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* [Magazine of Civil Engineering]. 2009. No. 6. pp. 25–33. (In Russian).
29. *Garkina I.A., Danilov A.M., Korolev E.V., Smirnov V.A.* Preodolenie neopredelennosti tselei v zadache mnogokriterial'noi optimizatsii na primere razrabotki sverkhtyazhelykh betonov dlya zashchity ot radiatsii [Overcoming aim uncertainties in the task of multi-objective optimization by the example of the development of ultraheavy concretes for the protection against radiation]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 2006. No. 8. pp. 23–26. (In Russian).
30. *Voznesensky V.A., Lyashenko T.V., Dougan A.D.* Kompromissnaya mnogofaktornaya optimizatsiya garantirovannogo kachestva shlakoshchelochnykh vyazhushchikh (povyshenie prochnosti i morozostoykosti, minimizatsiya raskhoda resursov) [Compromise multifactor optimization of guaranteed quality of slag-alkali binders (strength and freeze resistance increase, minimization of resource rate)]. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Modern industrial and civil engineering]. 2007. Vol. 3, No. 1. pp. 5–15. (In Russian).
31. *Lyashenko T.V.* Oblasti dopustimyykh tekhnologicheskikh reshenii v polnom i lokal'nykh polyakh svoistv kompozitov [Areas of admissible technology solutions in complete and local fields of composite material characteristics]. *Vestnik Odes. DABA. Odessa, Mesto Maistriv* [Visnik Odes. DABA. Odessa, Misto Maistriv]. 2001. No. 5. pp. 75–80. (In Russian).
32. *Voznesenskii V.A., Lyashenko T.V., Ivanov Ya. P., Nikolov I.I.* EVM i optimizatsiya kompozitsionnykh materialov [Computer and optimization of composite materials]. *Kiev, Budivel'nyk Publ*, 1989. 240 p. (In Russian).
33. *Voznesenskii V.A., Lyashenko T.V.* ES-modeli v komp'yuternom stroitel'nom materialovedenii [ES-models in computer construction material engineering]. *Odessa, Astroprint Publ.*, 2006. 116 p. (In Russian).
34. *Nizina T.A., Kislyakov P.A.* Optimizatsiya svoistv epoksidnykh kompozitov, modifitsirovannykh nanochastitsami [Optimization of properties of epoxy composites modified



- nanoparticles]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 2009. No. 9. pp. 78–80. (In Russian).
35. *Nizina T.A., Balykov A.S., Makarova L.V.* Primenenie modelei «sostav – svoistvo» dlya issledovaniya svoystv modifitsirovannykh dispersno-armirovannykh melkozernistykh betonov [Application of models «composition – property» to study the properties of modified fiber-reinforced fine-grained concretes]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov]. 2016. No. 12. pp. 15–21. (In Russian).
36. *Nizina T.A., Balykov A.S.* Eksperimentalno-statisticheskie modeli svoystv modifitsirovannykh dispersno-armirovannykh melkozernistykh betonov [Experimental-statistical models of properties of modified fiber-reinforced fine-grained concretes]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* [Magazine of Civil Engineering]. 2016. No. 2. pp. 13–25. (In Russian).
37. *Lyashenko T.V.* Optimizatsiya napolnitelei poliefirnykh svyazuyushchikh na osnove modelei novogo klassa: dis... kand. tekhn. nauk [Optimization of fillers of polyester binding materials using new class models: PhD thesis]. Odessa. 1984. 236 p. (In Russian).

DEAR COLLEAGUES!**THE REFERENCE TO THIS PAPER HAS THE FOLLOWING CITATION FORMAT:**

Nizina T.A., Selyaev V.P., Balykov A.S., Volodin V.V., Korovkin D.I. Optimization of compositions of multicomponent fine-grained fiber concretes modified at different scale levels. *Nanotekhnologii v stroitel'stve* = Nanotechnologies in Construction. 2017, Vol. 9, no. 2, pp. 43–65. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-2-43-65](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-2-43-65). (In Russian).



УДК 691.32:625.073

Автор: НИЗИНА Татьяна Анатольевна, д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные конструкции», Национальный исследовательский Мордовский государственный университет; ул. Большевистская, 68, г. Саранск, Российская Федерация, 430005, nizinata@yandex.ru;

Автор: СЕЛЯЕВ Владимир Павлович, академик РААСН, д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Строительные конструкции», Национальный исследовательский Мордовский государственный университет; ул. Большевистская, 68, г. Саранск, Российская Федерация, 430005, ntorm80@mail.ru;

Автор: БАЛЫКОВ Артемий Сергеевич, аспирант кафедры «Строительные конструкции», Национальный исследовательский Мордовский государственный университет; ул. Большевистская, 68, г. Саранск, Российская Федерация, 430005, artbalrun@yandex.ru;

Автор: ВОЛОДИН Владимир Владимирович, студент, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет; ул. Большевистская, 68, г. Саранск, Российская Федерация, 430005, volodinvv1994@gmail.com;

Автор: КОРОВКИН Дмитрий Игоревич, аспирант кафедры «Строительные конструкции», Национальный исследовательский Мордовский государственный университет; ул. Большевистская, 68, г. Саранск, Российская Федерация, 430005, asfkorovkin@yandex.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ФИБРОБЕТОНОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НА РАЗЛИЧНЫХ МАСШТАБНЫХ УРОВНЯХ

АННОТАЦИЯ К СТАТЬЕ (АВТОРСКОЕ РЕЗЮМЕ, РЕФЕРАТ):

В статье изложены перспективы модифицирования цементных композитов на разных масштабных уровнях (нано-, микро-, макро-). Представлены основные виды микро- и наномодификаторов, используемых в современной технологии бетонов. Показаны преимущества применения фуллереноподобных частиц для наномодифицирования цементных бетонов. Предложено использование комплексных модификаторов на основе дисперсных волокон, минеральных добавок и наночастиц.

В качестве основных компонентов дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов использовались: цемент класса ЦЕМ I 42,5Б производства ОАО «Мордовцемент», речной песок Новостепановского карьера (п. Смольный Ичалковского района Республики Мордовия), микрокремнезем конденсированный уплотненный (МКУ-85) производства ОАО «Кузнецкие ферросплавы» (г. Новокузнецк), высокоактивный метакраолин белый производства



ООО «Мета-Д» (г. Днепропетровск), гидроизоляционная добавка в бетонную смесь «Пенетрон Адмикс» производства ООО «Завод гидроизоляционных материалов «Пенетрон» (г. Екатеринбург), поликарбоксилатный суперпластификатор Melflux 1641 F (BASF Construction Polymers, Германия). Дисперсное армирование бетонов обеспечивалось введением трех видов фибр: полипропиленовое мультифиламентное волокно с длиной резки 12 мм, полиакрилонитрильное синтетическое волокно FibARM Fiber WB с длиной резки 12 мм, модифицированная астраленами базальтовая микрофибра «Астрофлекс-МБМ» длиной 100÷500 мкм.

Анализ результатов исследования насыщенного D-оптимального плана осуществлялся по полиномиальным моделям типа «смесь I, смесь II, технология – свойства», учитывающим влияние 6 варьируемых факторов. С помощью метода экспериментально-статистического моделирования выявлены оптимальные области варьирования компонентов модифицированных мелкозернистых дисперсно-армированных бетонов. Построены полигоны распределения уровней факторов модифицированных цементных дисперсно-армированных бетонов, что позволило проследить изменение полей предела прочности при сжатии и на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток в зависимости от требуемой характеристики и варьируемых параметров.

Ключевые слова: оптимизация, наномодификатор, дисперсное волокно, минеральная добавка, мелкозернистый бетон, предел прочности на растяжение при изгибе, предел прочности при сжатии.

DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-2-43-65](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-2-43-65)

МАШИНОЧИТАЕМАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СС-ЛИЦЕНЗИИ В МЕТАДАННЫХ СТАТЬИ (HTML-код):

```
<a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/"></a><br />Произведение «<span xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://purl.org/dc/dcmitype/Text" property="dct:title" rel="dct:type">Оптимизация составов многокомпонентных мелкозернистых фибробетонов, модифицированных на различных масштабных уровнях </span>» созданное автором по имени <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="Нанотехнологии в строительстве. – 2017. – Том 9, № 2. – С. 43–65. – DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-2-43-65" property="cc:attributionName" rel="cc:attributionURL">Низина Т.А., Селяев В.П., Балыков А.С., Володин В.В., Коровкин Д.И. </a>, публикуется на условиях <a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная</a>.<br />Основано на произведении с <a xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://nanobuild.ru/ru_RU/nanobuild-2-2017/" rel="dct:source">http://nanobuild.ru/ru_RU/nanobuild-2-2017/</a>.<br />Разрешения, выходящие за рамки данной лицензии, могут быть доступны на странице <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="nizinata@yandex.ru" rel="cc:morePermissions">nizinata@yandex.ru</a>.
```



Введение

В последние десятилетия при создании высокофункциональных строительных композитов все большее значение отводится методам управления их структурой на различных уровнях – макро-, мезо-, микро-, вплоть до понимания важности наноразмерного уровня организации строения материи [1]. Нанотехнологии – методы (технологии) производства, основанные на использовании физических, химических и биологических явлений и наноразмерных объектов для создания материалов, изделий, свойства которых определяются их структурой в нанометровом диапазоне [2]. Одной из задач нанотехнологии в строительстве является синтез и использование определенного вида и состава наночастиц как инструментов регулирования и улучшения эксплуатационных свойств и характеристик строительных материалов.

Как известно, бетоны являются многокомпонентными композиционными материалами, структура которых формируется из разномасштабных элементов: гидратных фаз цемента, наночастиц модификаторов размерами до 100 нм, зерен портландцемента, компонентов химических добавок и минеральных наполнителей преимущественно микрометрового размера, частиц заполнителей миллиметрового размера и т.д. К перспективным наномодификаторам цементных систем, способствующим целенаправленному изменению свойств композитов (прочность, долговечность и др.), относят [3]:

- наночастицы SiO_2 с удельной поверхностью не менее $180 \text{ м}^2/\text{г}$, способствующие достижению кардинально новых прочностей и структур цементного камня за счет улучшенной упаковки и пониженной пористости, а также позволяющие контролировать реакции образования и превращения гидросиликатов кальция C–S–H, ответственных за долговечность композитов и ряд эксплуатационных характеристик (ползучесть, усадку и др.);
- наночастицы Fe_2O_3 , повышающие прочность бетона на сжатие и растяжение, а также придающие эффект «самозондирования», заключающийся в возможности регистрации собственных сжима-



ющих напряжений цементных систем через изменение объемного электрического сопротивления растворов с данными наночастицами;

- наночастицы Al_2O_3 и наночастицы глины (алюмосиликаты), позволяющие значительно увеличить модуль упругости, повысить сопротивление проникновению хлоридов, снизить усадку бетонов;
- наночастицы TiO_2 , являющиеся фотокатализаторами при формировании самоочищающихся поверхностей бетона за счет открытого явления гидрофильности (выделение атомарного кислорода из паров воды или атмосферного кислорода), что позволяет поддерживать и сохранять эстетический вид построенных объектов на требуемом уровне в течение продолжительного времени.

Дополнительные возможности при синтезе композиционных материалов с повышенной прочностью, жесткостью и долговечностью предоставляют производимые в настоящее время в промышленных масштабах углеродные наночастицы. К подобным наночастицам можно отнести высокоупорядоченные кластеры углерода, такие как фуллерены, нанотрубки и нановолокна, астралены, свободные наноразмерные плёнки – графены и т.д. [3–5]. С целью снижения трудоемкости и, как следствие, себестоимости наномодифицирующих веществ российскими учеными была получена целая группа углеродных нанокластеров, названных «фуллероиды» [6].

Кроме приемов наномодифицирования, на сегодняшний день в бетоне отмечаются важность модификации структуры цементных композитов и на микроуровне. В многочисленных публикациях отечественных и зарубежных авторов [7–15], а также по результатам собственных исследований [16–18], установлена значительная эффективность применения тонкодисперсных активных минеральных добавок природного и техногенного происхождения (микрокремнезема конденсированного, дегидратированного метаксаолина, золь ТЭС, металлургических шлаков, тонкомолотых кварцевых песков, известняковой муки и др.), вводимых в значительных (до 30% и более от массы вяжущего) количествах. Данные модификаторы отличаются преимущественно силикатным или алюмосиликатным составом, могут иметь заметное количество наноразмерных частиц, хотя, в основном, это продукты с распределением частиц по размерам, которые лежат в диапазоне размеров типичных коллоидных систем (10^{-5} – 10^{-7} м).



Еще одним видом модифицирующих добавок, который также можно отнести к активным минеральным, являются модификаторы гидроизоляционного типа, в частности система материалов «Пенетрон» одноименного завода гидроизоляционных материалов (г. Екатеринбург), позволяющая повысить стойкость бетона к воздействию агрессивных сред [19].

Нельзя не отметить особую роль применения в высококачественных составах бетонных смесей высокоэффективных добавок-разжижителей, особенно суперпластификаторов IV поколения. Это поверхностно-активные вещества на основе поликарбоксилатов и акрилатов, обеспечивающих возможность значительного снижения водоцементного отношения и водопотребности бетонных смесей (до 35–40%). Способность разжижения у них значительно выше, чем у традиционных пластификаторов на основе лигносульфоната, сульфомеламинформальдегида и сульфонафталинформальдегида [20–22]. При этом существуют и некоторые сложности применения пластификаторов нового поколения вследствие избирательной преимущественной адсорбции поликарбоксилатов на гидросульфоалюминатах и подавления пластифицирующего действия за счет перекрывания зон стерических эффектов при дальнейшем фазообразовании. Поэтому при проектировании молекулы суперпластификаторов необходимо учесть конкурентные скорости адсорбции и гидратации для того, чтобы обеспечить требуемую продолжительность их действия [3].

Таким образом, пластификаторы и суперпластификаторы постепенно становятся неотъемлемой частью рецептуры цементных композитов, а в высокофункциональных бетонах нового поколения являются основными средствами повышения эффективности тонкодисперсных минеральных компонентов [8–11].

Следует отметить и другое перспективное направление модификации композитов – дисперсное армирование, способствующее повышению вязкости разрушения, предела прочности на срез и на растяжение при изгибе, ударной и усталостной прочности, снижению усадочных деформаций, предотвращению трещинообразования, увеличению эластичности, сопротивлению удару и истиранию, повышению морозостойкости, водонепроницаемости и т.д. [23, 24]. На сегодняшний день передовым опытом является применение многоуровневого армирования, исходящего из гипотезы о конгруэнтности (соразмерности, соот-



ветствия) армирующих элементов «блокируемым» трещинам соответствующего уровня структуры (микро-, мезо-, макро-) – цементирующего вещества (новообразований), цементного микробетона, мелкозернистого бетона [25, 26]. Известны примеры использования высокомодульных волокон (в частности, отходов базальтовой фибры) в качестве твердых носителей, позволяющих более равномерно распределять крайне малое количество наноинициаторов по объему бетонной смеси [27, 28].

Таким образом, в настоящее время усложнение композиционного состава бетона, ставшего 6–7-ми и более компонентным, становится необходимой реальностью. Многочисленные добавки в бетоне являются своеобразным «ключом» к решению многих технологических задач. Полифункциональность и многокомпонентность применяемых модификаторов позволяет эффективно управлять процессами структурообразования на различных этапах приготовления бетона и получать композиты с высокими эксплуатационными характеристиками [7–18].

Увеличение числа компонентов, а тем самым и рост общего числа рецептурно-технологических факторов цементных композиций приводит к необходимости преодоления трудностей, вызванных так называемым «проклятием размерности» [29–30]. Кроме того, при оптимизации составов должны быть гарантированы уровни большого числа эксплуатационных и технологических свойств материала, включая критерии ресурсосбережения. Координаты оптимумов исследуемых критериев качества системы при этом, как правило, не совпадают. Решение подобных многокритериальных задач возможно при комплексной реализации рациональных и по теоретическим предпосылкам, и по исполнению физических и вычислительных экспериментов многокритериальных задач, а также оптимизации их результатов, при которой возникают сложности, связанные с принятием компромиссных решений.

Многокритериальная оптимизация составов и свойств дисперсно-армированных модифицированных мелкозернистых бетонов, несомненно, является актуальной задачей, для качественного решения которой необходимо использование математического моделирования и компьютерных методов анализа. При этом наибольший интерес представляет метод экспериментально-статистического (ЭС) моделирования [32, 33], предложенный В.А. Вознесенским и активно развиваемый в настоящее время [34–36].



Важную роль в технологических задачах играет поверхность, соответствующая требуемому уровню $Y = Y_{\text{треб.}}$. Данная граница разделяет поля свойств материала на область допустимых решений ($Y \geq Y_{\text{треб.}}$) и запрещенную область ($Y < Y_{\text{треб.}}$). При этом одним из основных обобщающих показателей исследуемого факторного пространства, выраженного, как правило, в виде нормализованных переменных, является величина объема допустимой области Ω ($0 \leq \Omega \leq 100\%$), характеризующая устойчивость технологии. Чем ближе значение к нулю, тем сложнее (или дороже) технологу реализовать выбранное в этой области эффективное решение [31, 34].

Экспериментальные исследования

Целью данной работы являлось исследование эффективности дисперсного армирования и модифицирования активными минеральными и химическими добавками составов дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов на разных масштабных уровнях структуры, а также оптимизация разработанных составов по нескольким физико-механическим критериям эффективности.

Планирование экспериментального исследования осуществлялось на основе D-оптимального плана, содержащего 15 опытов [37]. При этом варьировались две группы факторов – вид и содержание используемых добавок: v_1 (микрокремнезем конденсированный уплотненный производства ОАО «Кузнецкие ферросплавы» (МКУ)); v_2 (высокоактивный метакраолин белый производства ООО «Мета-Д» (ВМК)); v_3 (гидроизоляционная добавка в бетонную смесь «Пенетрон Адмикс» (Адмикс)), а также вид и содержание применяемой фибры: w_1 (полипропиленовое мультифиламентное волокно с длиной резки 12 мм, диаметром 25÷35 мкм, плотностью 0,91 г/см³ (ППН)); w_2 (полиакрилонитрильное синтетическое волокно специальной обработки для бетонов FibARM Fiber WB с длиной резки 12 мм, диаметром 14÷31 мкм, плотностью 1,17±0,03 г/см³ (ПАН)); w_3 (модифицированная астраленами базальтовая микрофибра под фирменным названием «Астрофлекс-МБМ» длиной 100÷500 мкм, средним диаметром 8÷10 мкм, насыпной плотностью 800 кг/м³, с содержанием астраленов 0,0001÷0,01% от массы фибры (МБМ)). Уровни варьирования исследуемых факторов приведены в табл.



Таблица

Уровни варьирования исследуемых факторов

Факторы			Уровни варьирования			
			0	0,333	0,5	1
Вид добавки	v_1	МКУ, % от массы цемента	0	6,667	10	20
	v_2	ВМК, % от массы цемента	0	2	3	6
	v_3	Адмикс, % от массы цемента	0	0,5	0,75	1,5
Вид фибры	w_1	ППН, % от массы цемента	0	0,333	0,5	1
	w_2	ПАН, % от массы цемента	0	0,5	0,75	1,5
	w_3	МБМ, % от массы цемента	0	1,667	2,5	5

При составлении плана экспериментального исследования обеспечивалось выполнение следующих условий:

$$0 \leq v_1 \leq 1; \sum v_i = 1; i = 1, 2, 3; 0 \leq w_i \leq 1; \sum w_i = 1; i = 1, 2, 3. \quad (1)$$

В ходе экспериментальных исследований изготавливались серии образцов-призм $40 \times 40 \times 160$ мм из равноподвижных фибробетонных смесей, в рецептуре которых наряду с приведенными выше модификаторами использовались: портландцемент класса ЦЕМ I 42,5 Б; мелкозернистый заполнитель – природный кварцевый песок Новостепановского карьера (п. Смольный, Ичалковский район, Республика Мордовия) с размером зерна менее 5 мм – 65% от массы твердой фазы; суперпластификатор Melflux 1641 F – 0,5% от массы вяжущего. В ходе экспериментальных исследований было изучено изменение водопотребности, плотности в нормальных влажностных условиях (ГОСТ 12730.1-78), предела прочности при сжатии (ГОСТ 310.4) и на растяжение при изгибе (ГОСТ 310.4) в возрасте 28 суток [18].

Технология приготовления дисперсно-армированной бетонной смеси включала несколько этапов. На первом этапе осуществлялось введение



ние и перемешивание в сухом состоянии требуемого количества вяжущего, заполнителя и модифицирующих добавок; на втором – вводились дисперсные волокна с первой порцией воды ($B/C = 0,2$); на третьем – производилась корректировка составов водой для получения равноподвижных составов.

По результатам эксперимента осуществлялось построение [35, 36] экспериментально-статистических моделей зависимости исследуемых физико-механических показателей качества мелкозернистых фибробетонов от вида и содержания модифицирующих добавок (смесь I) и дисперсных волокон (смесь II). Обобщенные ЭС-модели прочностных показателей задавались в виде приведенного полинома $M_I M_{II} Q$ «смесь I, смесь II – свойство» вида:

- для предела прочности на растяжение при изгибе –

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{р.из.}} = & 0,65 \cdot v_1 \cdot v_2 - 3,28 \cdot v_1 \cdot v_3 - 1,02 \cdot v_2 \cdot v_3 + 2,16 \cdot w_1 \cdot w_2 + \\ & + 1,02 \cdot w_1 \cdot w_3 + 3,03 \cdot w_2 \cdot w_3 + 4,70 \cdot v_1 \cdot w_1 + 3,69 \cdot v_2 \cdot w_1 + \\ & + 4,73 \cdot v_3 \cdot w_1 + 4,92 \cdot v_1 \cdot w_2 + 5,88 \cdot v_2 \cdot w_2 + 4,82 \cdot v_3 \cdot w_2 + \\ & + 3,68 \cdot v_1 \cdot w_3 + 5,59 \cdot v_2 \cdot w_3 + 5,13 \cdot v_3 \cdot w_3. \end{aligned} \quad (2)$$

- для предела прочности при сжатии –

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{сж.}} = & 12,65 \cdot v_1 \cdot v_2 - 25,24 \cdot v_1 \cdot v_3 - 2,98 \cdot v_2 \cdot v_3 + 24,16 \cdot w_1 \cdot w_2 + \\ & + 29,04 \cdot w_1 \cdot w_3 + 11,09 \cdot w_2 \cdot w_3 + 29,17 \cdot v_1 \cdot w_1 + 31,09 \cdot v_2 \cdot w_1 + \\ & + 36,32 \cdot v_3 \cdot w_1 + 28,21 \cdot v_1 \cdot w_2 + 53,36 \cdot v_2 \cdot w_2 + 40,76 \cdot v_3 \cdot w_2 + \\ & + 24,12 \cdot v_1 \cdot w_3 + 42,26 \cdot v_2 \cdot w_3 + 38,29 \cdot v_3 \cdot w_3. \end{aligned} \quad (3)$$

На следующем этапе экспериментальных исследований осуществлялась оптимизация составов модифицированных мелкозернистых дисперсно-армированных бетонов. Определение рациональных составов велось на полях основных прочностных свойств (пределов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе), описанных структурированными ЭС-моделями (2), (3). С целью определения устойчивости применяемой технологии для оптимизируемых прочностных параметров были определены объемы допустимой области Ω на основе анализа более 4 тыс. предсказанных значений.



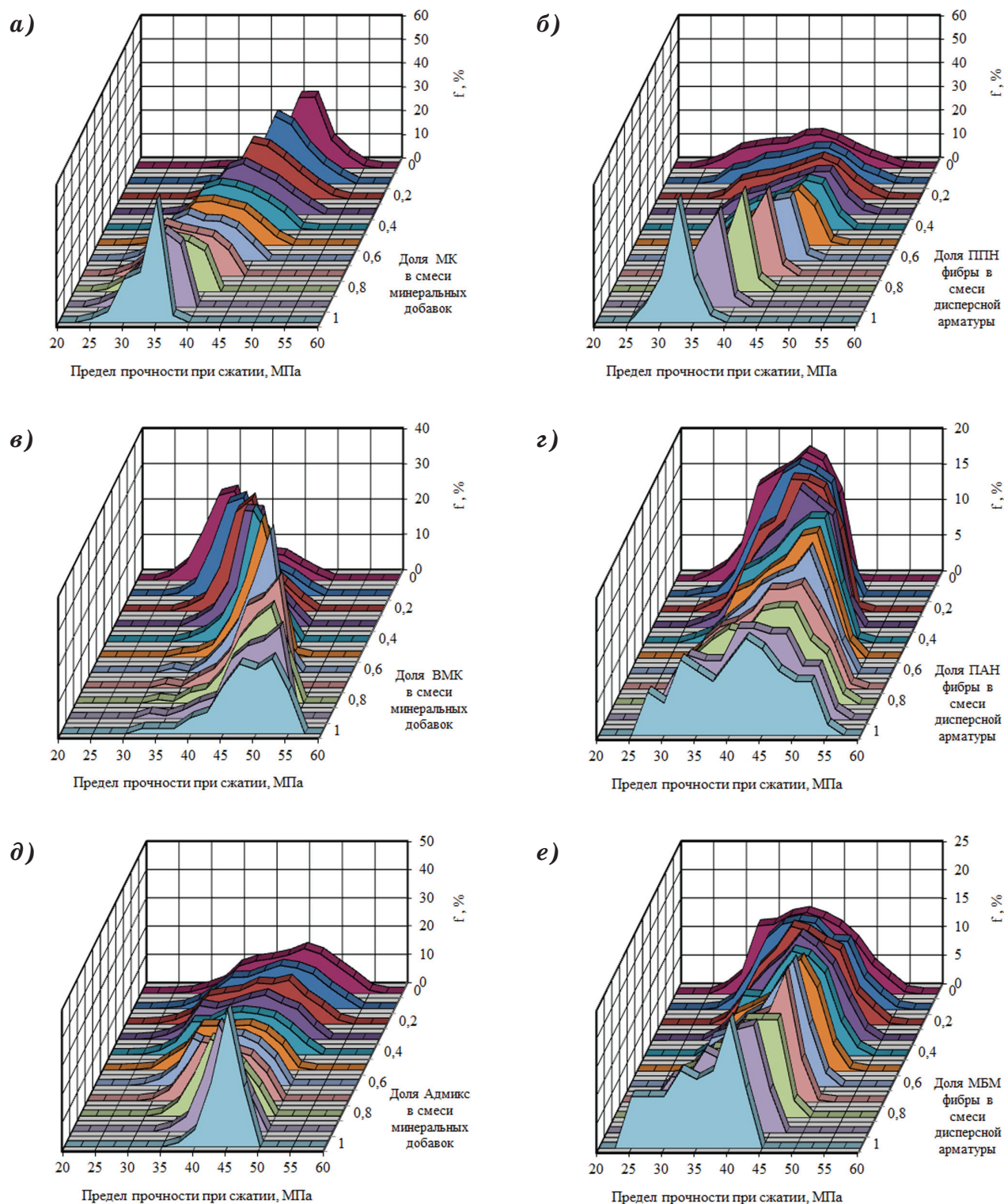


Рис. 1. Полигоны распределения предела прочности при сжатии составов мелкозернистых фибробетонов с учетом содержания: модифицирующих добавок (а – МК, в – ВМК, д – Адмикс) и дисперсных волокон (б – ППН, г – ПАН, е – МБМ)



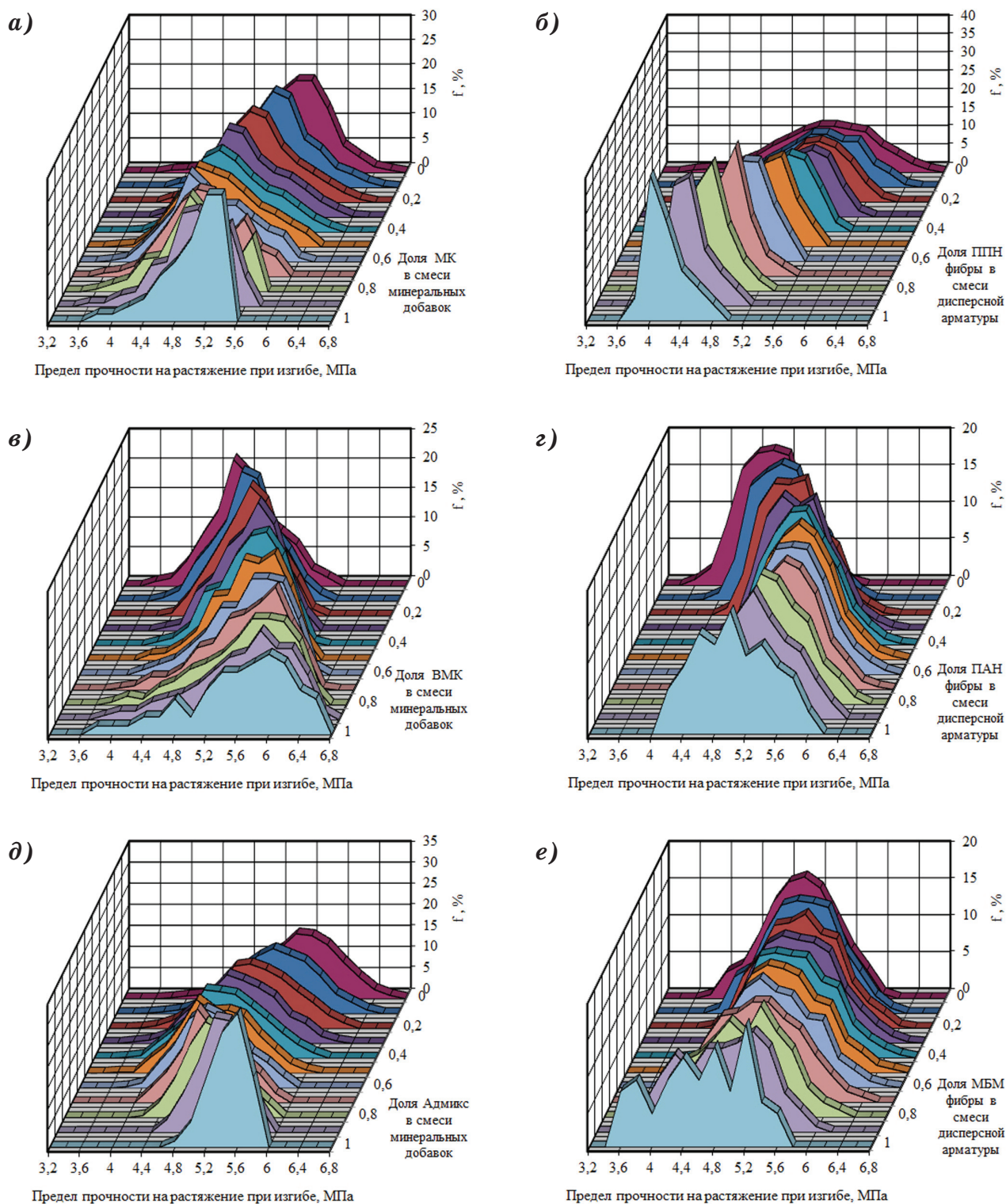


Рис. 2. Полигоны распределения предела прочности на растяжение при изгибе составов мелкозернистых фибробетонов с учетом содержания: модифицирующих добавок (а – МК, в – ВМК, д – Адмикс) и дисперсных волокон (б – ППН, г – ПАН, е – МБМ)



Выявление оптимальных областей компромиссных решений по каждому фактору в отдельности осуществляли с помощью полигонов частот (рис. 1, 2), являющихся одним из наиболее наглядных способов графического представления плотности вероятности случайной величины [32, 33]. Установлено, что повышение доли метаксаолина в общей массе активных минеральных добавок (рис. 1, 2, в) приводит к росту граничных значений прочностных показателей. При максимальном содержании ВМК (6% от массы портландцемента) возможно получить фибробетоны с широким диапазоном прочностных характеристик – $32,5 \div 55,0$ МПа при сжатии и $3,8 \div 6,6$ МПа на растяжение при изгибе.

Введение в бетонные смеси микрокремнезема конденсированного уплотненного (рис. 1, 2, а) приводит к снижению диапазона исследуемых прочностных показателей фибробетонов, а также его граничных значений, что свидетельствует о более негативном влиянии МКУ на процессы структурообразования цементных композитов по сравнению с другими видами применяемых добавок. Составы с максимальным содержанием МКУ характеризуются невысокими значениями предела прочности при сжатии и на растяжение при изгибе – $25,0 \div 37,5$ и $3,8 \div 5,4$ МПа соответственно.

Эффективность ВМК по сравнению с МКУ можно объяснить: большей (примерно в 2–2,5 раза) пуццоланической активностью метаксаолина; разной химической природой добавок (силикатной – у МКУ, алюмосиликатной – у ВМК); ускорением протекания реакции ВМК с известью по сравнению с МКУ, что обеспечивает её надежное связывание в первые сутки твердения; более высокой пластичностью и технологичностью бетонных и растворных смесей, отсутствием поверхностной липкости бетона с добавкой ВМК, присущих бетонам с МКУ; меньшей водопотребностью смесей с ВМК, а тем самым и меньшим требуемым расходом суперпластификаторов для достижения одинаковой подвижности бетонных смесей.

При увеличении содержания в составе минеральной добавки Адмикс максимальные значения прочностных показателей несколько снижаются, а минимально возможные – повышаются; при этом сужается область допустимых решений (рис. 1, 2 д) – от $25,0 \div 55,0$ до $37,5 \div 47,5$ МПа при сжатии и от $3,8 \div 6,6$ до $4,8 \div 5,8$ МПа на растяжение при изгибе.



Объяснения приведенного эффекта лежат в формирующихся новообразованиях гидросульфоалюминатов и гидрокарбоалюминатов кальция при взаимодействии компонентов добавки Пенетрон Адмикс с продуктами гидратации цемента. Данные новообразования, образующиеся с увеличением объема, наряду с первоначальным уплотнением структуры, при неоптимальном использовании могут вызвать в ней негативные внутренние напряжения. Учитывая это, необходимо тщательным образом выбирать дозировку добавки с целью рационального управления кристаллизационного процесса и формирования структуры цементных композитов.

Введение дисперсных волокон ППН и МБМ в составы цементных композитов приводит к увеличению водопотребности равноподвижных фибробетонных смесей, уменьшению области допустимых решений предела прочности при сжатии (для ППН, рис. 1 б), а также к снижению граничных значений допустимых прочностных интервалов (для МБМ, рис. 1 е). Повышение доли ПАН-фибры (рис. 1 г) в общей массе применяемых модификаторов позволяет расширить возможный диапазон допустимых решений при сжатии и повысить его граничные значения с $25,0 \div 47,5$ до $27,5 \div 55,0$ МПа.

Анализируя области допустимых решений при исследовании влияния дисперсных волокон на предел прочности на растяжение при изгибе, можно сделать вывод об эффективности армирования мелкозернистых бетонов ПАН-волокном и МБМ (рис. 2 г, е), причем наиболее высокие прочностные показатели в диапазоне $6,4 \div 6,6$ МПа получены при использовании комплекса фибр ПАН+МБМ с равными (по 50%) долями. Это свидетельствует о целесообразности и эффективности многоуровневого армирования мелкозернистых бетонов с использованием углеродных наноструктур (применение полиакрилонитрильного волокна – армирование на макромасштабном уровне структуры; модифицированной астраленами базальтовой микрофибры – на верхнем микромасштабном уровне).

Повышение процентного содержания полипропиленового волокна приводит к снижению предела прочности на растяжение при изгибе цементных композитов (рис. 2 б), при этом уменьшается и область допустимых решений данного показателя – $3,8 \div 4,8$ МПа; в составах с ПАН-волокном данный диапазон составляет от 4,2 до 6,0 МПа; с МБМ – $3,6 \div 5,6$ МПа (рис. 2 г, е).



Заключение

По результатам экспериментальных исследований произведена оценка эффективности модифицирующих добавок и дисперсных волокон на прочностные показатели мелкозернистых бетонов. Выявлено, что наибольшие прочностные показатели цементных композитов достигаются при введении в состав высокоактивного метаксаолина. Совместное использование полиакрилонитрильного синтетического волокна и модифицированной астраленами базальтовой фибры, вводимых в равном соотношении, позволяет добиться наибольшего повышения предела прочности мелкозернистых бетонов на растяжение при изгибе. Определены области допустимых решений, показывающие возможный диапазон и объем допустимой области исследуемых показателей качества (предела прочности при сжатии и на растяжение при изгибе) в зависимости от рецептуры и процентного содержания применяемых модификаторов. Показана перспективность использования информативных многофакторных экспериментально-статистических моделей, позволяющих установить взаимосвязь и количественные соотношения между показателями качества материала, рецептурно-технологическими и эксплуатационными факторами, а также представить их в наглядном графическом виде.



УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

**ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАТЕРИАЛА ДАННОЙ СТАТЬИ
ПРОСИМ ДЕЛАТЬ БИБЛИОГРАФИЧЕСКУЮ ССЫЛКУ НА НЕЁ:**

Низина Т.А., Селяев В.П., Бальков А.С., Володин В.В., Коровкин Д.И. Оптимизация составов многокомпонентных мелкозернистых фибробетонов, модифицированных на различных масштабных уровнях // Нанотехнологии в строительстве. – 2017. – Том 9, № 2. – С. 43–65. – DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-2-43-65](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-2-43-65).

DEAR COLLEAGUES!

THE REFERENCE TO THIS PAPER HAS THE FOLLOWING CITATION FORMAT:

Nizina T.A., Selyaev V.P., Balykov A.S., Volodin V.V., Korovkin D.I. Optimization of compositions of multicomponent fine-grained fiber concretes modified on different scale levels. *Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*. 2017, Vol. 9, no. 2, pp. 43–65. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-2-43-65](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-2-43-65). (In Russian).

Библиографический список:

1. *Артамонова О.В., Сергуткина О.Р.* Строительные наноматериалы: тенденции развития и перспективы // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2013. – Вып. 6. – С. 13–23.
2. *Селяев В.П., Осипов А.К., Писарева А.С.* Наночастицы, порошки, структуры, технологии: аналитический обзор. – Саранск, 2010. – 84 с.
3. *Баженов Ю.М., Фаликман В.Р., Булгаков Б.И.* Наноматериалы и нанотехнологии в современной технологии бетонов // Вестник МГСУ. – 2012. – № 12. – С. 125–133.
4. *Войтович В.А.* Нанонаука. Нанотехнология. Нанобетоны // Экспозиция. Бетоны & Сухие смеси. – 2009. – 2/Б (85). – С. 5–7.
5. *Фиговский О.Л., Бейлин Д.А., Пономарев А.Н.* Успехи применения нанотехнологий в строительных материалах // Нанотехнологии в строительстве. – 2012. – Том 4, № 3. – С. 6–21. – URL: http://nanobuild.ru/ru_RU/ (дата обращения: 12.01.17).
6. *Войтович В.А.* Строительные наноматериалы // Руководитель строительной организации. – 2011. – № 2. – С. 49.
7. *Гусев Б.В., Фаликман В.Р.* Бетон и железобетон в эпоху устойчивого развития // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 2. – С. 30–38.



8. *Калашников В.И.* Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего. Часть 1. Изменение составов и прочности бетонов // Строительные материалы. – 2016. – № 1–2. – С. 96–103.
9. *Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И.* Модифицированные высококачественные бетоны. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. – 2006. – 368 с.
10. *Ушеров-Маршак А.В.* Бетоны нового поколения – бетоны с добавками // Бетон и железобетон. – 2011. – № 1. – С. 78–81.
11. *Ушеров-Маршак А.В.* Химические и минеральные добавки в бетон. – Харьков: Колорит, 2005. – 280 с.
12. *Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардунян Г.С.* Новые модифицированные бетоны. – М.: Типография «Парадиз», 2010. – 258 с.
13. *Forster S.W.* High-Performance Concrete – Stretching the Paradigm // Concrete International. – October 1994. – Vol. 16. – No. 10. – pp. 33–34.
14. *Aitcin P.-C.* High Performance Concrete // London and New York: E&FN Spon, 2004. – 591 p.
15. *Richard P., Cheyrezy M.* Composition of Reactive Powder Concrete. Scientific Division Bouygues // Cement and Concrete Research. –1995. – Vol. 25. – No. 7. – pp. 1501–1511.
16. *Селяев В.П., Низина Т.А., Балбалин А.В.* Многофункциональные модификаторы цементных композитов на основе минеральных добавок и поликарбоксилатных пластификаторов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – Вып. 31 (50), Ч. 2. – С. 156–163.
17. *Низина Т.А., Балыков А.С.* Анализ комплексного влияния модифицирующих добавок и дисперсного армирования на физико-механические характеристики мелкозернистых бетонов // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 4. – С. 25–32.
18. *Низина Т.А., Балыков А.С., Сарайкин А.С.* Экспериментальные исследования дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов с полифункциональными модификаторами // УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. – 2015. – № 4. – С. 91–96.
19. Технологический регламент на проектирование и выполнение работ по гидроизоляции и антикоррозионной защите монолитных и сборных бетонных и железобетонных конструкций. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., СРО «РСПППГ», 2008. – 64 с.
20. *Фаликман В.Р.* Поликарбоксилатные гиперпластификаторы: вчера, сегодня, завтра // Популярное бетоноведение. – 2009. – № 2 (28). – С. 86–90.
21. *Ушеров-Маршак А.В., Бабаевская Т.В., Марек Циак.* Методологические аспекты современной технологии бетона // Бетон и железобетон. – 2002. – № 1. – С. 6–7.
22. *Василик П.Г., Голубев И.В.* Особенности применения поликарбоксилатных гиперпластификаторов Melflux® // Строительные материалы. – 2003. – № 9. – С. 24–26.
23. *Рабинович Ф.Н.* Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 560 с.



24. Низина Т.А., Пономарев А.Н., Балыков А.С. Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны на основе комплексных модифицирующих добавок // Строительные материалы. – 2016. – № 7. – С. 68–72.
25. Рабинович Ф.Н. Об уровнях дисперсного армирования бетонов // Известия Вузов. Строительство. – 1981. – № 11. – С. 30–36.
26. Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Повышение трещиностойкости цементного бетона при многоуровневом дисперсном армировании его структуры // Современные проблемы строительного материаловедения: Седьмые академические чтения РААСН. – Белгород, 2001. – С. 587–598.
27. Гурьева В.А., Белова Т.К. Свойства цементных растворов, дисперсно армированных модифицированным микроволокном // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – № 13. – С. 124–127.
28. Пономарев А.Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 6. – С. 25–33.
29. Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В., Смирнов В.А. Преодоление неопределенностей целей в задаче многокритериальной оптимизации на примере разработки сверхтяжелых бетонов для защиты от радиации // Строительные материалы. – 2006. – № 8. – С. 23–26.
30. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Довгань А.Д. Компромиссная многофакторная оптимизация гарантированного качества шлакощелочных вяжущих (повышение прочности и морозостойкости, минимизация расхода ресурсов) // Современное промышленное и гражданское строительство. – Т. 3, № 1. – 2007. – С. 5–15.
31. Ляшенко Т.В. Области допустимых технологических решений в полном и локальных полях свойств композитов // Вісник Одес. ДАБА. Одеса: Місто майстрів. – 2001. – Вип. 5. – С. 75–80.
32. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Иванов Я.П., Николов И.И. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов. – Киев: Будивэльник, 1989. – 240 с.
33. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. – Одесса: Астропринт, 2006. – 116 с.
34. Низина Т.А., Кисляков П.А. Оптимизация свойств эпоксидных композитов, модифицированных наночастицами // Строительные материалы. – 2009. – № 9. – С. 78–80.
35. Низина Т.А., Балыков А.С., Макарова Л.В. Применение моделей «состав – свойство» для исследования свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 12. – С. 15–21.
36. Низина Т.А., Балыков А.С. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Инженерно-строительный журнал. – 2016. – № 2. – С. 13–25.
37. Ляшенко Т.В. Оптимизация наполнителей полиэфирных связующих на основе моделей нового класса: дис... канд. техн. наук. – Одесса, 1984. – 236 с.

