

Легкий бетон на основе пенополиамидбетонной композиции

УДК 691.32

Маилян Левон Рафаэлович

Член-корр. РААСН, д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительство уникальных зданий и сооружений» ФГБОУ ВО «Донской государственной технической университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: lrm@aanet.ru

Голова Татьяна Александровна

Канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Балаковский инженерно-технологический институт – филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Балаково); e-mail: emelyanova-tanya@mail.ru

Статья получена: 10.01.2019. Рассмотрена: 13.01.2019. Одобрена: 25.01.2019. Опубликовано онлайн: 26.03.2019. ©РИОР

Аннотация. Одной из важнейших задач строительства является применение энергоэффективных однослойных конструкций на основе пенобетонов и повышение их несущей способности за счет применения фибрового армирования, что существенно улучшит эксплуатационные свойства фибропенобетонов. Получены прочностные характеристики фибропенобетона, армированного полиамидными гранулами с различным видом наполнителя, и рекомендации по применению его в строительных конструкциях. Данные экспериментальных исследований позволяют рекомендовать оптимальные составы пенополиамидбетонной композиции.

Ключевые слова: фибропенобетон, армированный полиамидными фибрами, прочностные характеристики.

Пенобетон — один из перспективных материалов для гражданского строительства. Его теплотехнические характеристики в ряде реги-

онов позволяют возводить энергоэффективные здания без применения утеплителей.

Пенобетон относится к легким бетонам и имеет объемный вес в пределах 600–1600 кг/м³, готовые изделия из него позволяют обеспечить хорошую транспортировку и погрузочно-разгрузочные работы, ускорить возведение здания и оптимизировать конструктивные решения; относительно низкая стоимость по сравнению с другими стройматериалами того же назначения; хорошие показатели энергоэффективности (теплопроводность в пределах 0,069–0,234 Вт/(м · °С), что обеспечивает до 30% экономии при отоплении здания; экологичность за счет однослойности и пористости делает стены здания воздухопроницаемыми, способными «дышать», что создает положительный микроклимат помещений; хорошая шумоизоляция; высокая пожаростойкость; легкость в обработке: материал легко пилится и подгоняется под размер; долговечность.

LIGHT CONCRETE BASED ON FOAM POLYAMID-BETONIC COMPOSITION

Levon Mailyan

Corresponding Member RAACS, Doctor of Engineering, Professor of the Department “Construction of Unique Buildings and Structures”, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: lrm@aanet.ru;

Tat'yana Golova

Ph.D. in Engineering, Associate Professor of the Department “Industrial and Civil Construction”, Balakovo Engineering Technological Institute — a branch of the “National Research Nuclear University “MEPhI”, Balakovo; e-mail: emelyanova-tanya@mail.ru

Manuscript received: 10.01.2019. **Revised:** 13.01.2019. **Accepted:** 25.01.2019. **Published online:** 26.03.2019. ©РИОР

Abstract. One of the most important tasks of construction is the use of energy-efficient single-layer structures based on foam concrete and an increase in their bearing capacity due to the use of fiber reinforcement, which will significantly improve the performance properties of fiber-reinforced concrete. Strength characteristics of fibro-foam concrete reinforced with polyamide granules with various types of filler and recommendations for its use in building structures were obtained. These experimental studies allow us to recommend the optimal composition of polyamide concrete compositions.

Keywords: polyurethane fiber-reinforced fibro-concrete, strength characteristics.

Однако у пенобетона существуют и минусы: низкая прочность, приводящая к разрушению пеноблоков при транспортировке и в процессе кладки; большая усадка, вызывающая риск возникновения трещин в стенах в процессе эксплуатации; повышенная пористость, приводящая к высокому влагопоглощению.

Улучшение характеристик пенобетона можно достичь за счет введения в композитную смесь фибр, в частности полиамидной фибры [1–3]. При этом, помимо прочности, снижаются также усадочные деформации. То есть изделия из таких фибропенобетонов при низкой энергоёмкости их изготовления должны будут отличаться улучшенными эксплуатационными свойствами.

Структурообразование пенобетонов неавтоклавно-го твердения может быть основано как на фибрах гранулометрического вида, так и на синтетических волокнах. Полиамидные фибры устойчивы к действию щелочей, что очень важно, поскольку в цементных бетонах имеет место именно щелочная среда [4–5].

В [6] было установлено, что полиамидные дисперсные волокна, представляющие собой протяженные поверхности раздела фаз, способствуют интенсификации процессов кластерообразования и, как следствие, позволяют повысить агрегативную устойчивость. Для этого необходимо правильно подобрать соотношение между количеством фибр и В/Ц соотношением пенобетонных смесей. Волокна оказывают влияние на пространственное расположение жидкой фазы, что определяет прочность вязких связей. Фибра может изменять энергетические и геометрические параметры этих связей между частицами в ранний период структурообразования, это проявляется в повышении пластической прочности системы.

На формирование структуры, помимо В/Ц соотношения, влияют однородность распределения фибр и их параметры — диаметр и длина. Известно, что на свежесформованные смеси длина волокон оказывает незначительное влияние (3,5–7%). Спустя 1,5–2 часа после приготовления смеси пластическая прочность смесей с длинными волокнами составляет 180–197% от прочности смесей с короткими волокнами. А по истечении 3 часов эффективность применения длинных волокон снижается до 13–20% [1].

Фибропенобетоны, в отличие от обычных пенобетонов, обладают сниженным водопоглощением, равновесной и сорбционной влажностью, паропроницаемостью на 14–50%. Также уменьшается теплопроводность, особенно у материалов конструкционно-теплоизоляционного назначения (плотностью более 700 кг/м³). Повышается модуль упругости (на 15–19%), предельная растяжимость (на 40–60%). Повышение прочности пенобетонов при дисперсном армировании объясняется снижением количества дефектов структуры композита и увеличения объема, в котором происходит диссипация энергии от внешней нагрузки. Призмечная прочность дисперсно-армированного пенобетона превышает кубиковую на 30–38%, но в неармированных бетонах наблюдается обратная зависимость [8; 9].

Полиамидные фибры являются прочными, жесткими и эластичными, что предопределяет их использование для армирования материалов на основе минеральных вяжущих сред [10]. Введение полиамидного состава в пенобетонную смесь позволит ограничить пластическую усадку, улучшить механические характеристики композита, повысить стойкость к перепадам температур и снизить длительность набора прочности готового изделия.

Цель работы заключалась в разработке состава и исследовании свойств фибропенополиамидбетонной композиции для получения легкого бетона с плотностью 1000–1200 кг/м³. Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи: установить влияние добавок на формирование прочностных характеристик легкого бетона; подобрать оптимальный состав фибропенополиамидбетонной композиции для получения легкого бетона.

Исследовали 4 состава: 1 (контрольный) — пенобетон без добавок (ПБ), 2 — пенобетон с добавкой в виде продукта измельчения горелого бетона после пожара с модулем крупностью $M_{кр} = 0,63$ (ПБД); 3 — пенобетон с полиамидной фиброй в виде гладких гранул диаметром 3 мм, длиной 4 мм (ФППБг); 4 — пенобетон с полиамидной фиброй в виде дробленки (отходы от первичной обработки полиамидных гранул) длиной 3–7 мм (ФППБд).

В качестве исходных материалов использовались: цемент ПЦ М400 Вольского цементно-

го завода по ГОСТ 10178–85 [11], речной песок с $M_{кр} = 1,8$ по ГОСТ 8736–2014 [12], пенообразователь ПБ-2000 [13]. Для исследуемых составов: соотношение цемента к мелкому заполнителю 1:1,7; содержание полиамидных фибр длиной 3–7 мм — 1,5% массы вяжущего. В/Ц соотношение 0,25–0,26. Вода — по ГОСТ 23732–2011 [14]. Виды составов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Виды состава пенобетона/ фибропенополиамидбетона

№ состава	Цемент, кг	Песок, кг	Добавка, кг	Полиамидная фибра, кг	Вода, мл	Пена, мл	В/Ц
1 ПБ	3,250	5,530	—	—	813	50	0,25
2 ПБД	3,637	4,723	0,732	—	950	60	0,26
3 ФППБг	3,637	5,530	—	0,05	813	60	0,26
4 ФППБд	3,250	5,530	—	0,05	813	50	0,25

Для дисперсного армирования использовали 2 вида полиамидных фибр: первичное сырье — гладкие гранулы из полиамида-6 первичный нетермостабилизированный диаметром 4 [15] мм — и вторичное сырье (из отходов П6): дробленка диаметром 3–7 мм.

Полиамид П6 используется для выпуска широкого ассортимента продукции: нити полиамидной технического назначения, полимерных композиционных материалов с различными свойствами (ударопрочные, морозостойкие, водостойкие, трудногорючие), а также непосредственно для литья под давлением. Технические характеристики П6 представлены в табл. 2.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории «Эксплуатационная надежность строительных материалов и конструкций» Балаковского инженерно-технологического института — филиала НИЯУ МИФИ.

Схема приготовления фибропенополиамидбетонных (ФППБ) смесей заключалась во введении пенообразователя сразу в мокрую смесь из цемента, песка и добавки, получение однородной смеси компонентов, время перемешивания — 90 с. Добавление фибры происходило после получения готовой смеси и проводилось дополнительное перемешивание до равномер-

ного распределения фибры по массе смеси в течение 120 с (рис. 1, табл. 3).

Таблица 2

Технические характеристики полиамида П6

Наименование свойств		Ед. изм.	Относительная вязкость	
			2,70	3,33
Механические свойства	Прочность при растяжении (25 мм/мин)	МПа	72	74
	Относительное удлинение при разрыве (25 мм/мин)	%	110	140
	Модуль упругости при растяжении (1 мм/мин)	МПа	2600	2600
	Изгибающее напряжение (2 мм/мин) ¹	МПа	85	85
	Модуль упругости при изгибе (2 мм/мин)	МПа	2500	2500
	Ударная вязкость		80	95
Другие свойства	Огнестойкость (1,6 мм)	—	V-2	V-2
	Водопоглощение, %	24 ч / 23 °С	3,0	3,0
		30 мин кипячения	%	3,6
	Плотность	г/см ³	1,12	1,12
	Относительная вязкость (H ₂ SO ₄ 96,0 ± 0,15%, 25 ± 0,1 °С)	—	2,70 ± 0,03	3,33 ± 0,03
	Число вязкости	см ³ /г	140–155	185–200
Температура длительной эксплуатации	°С	от –30 до +80		

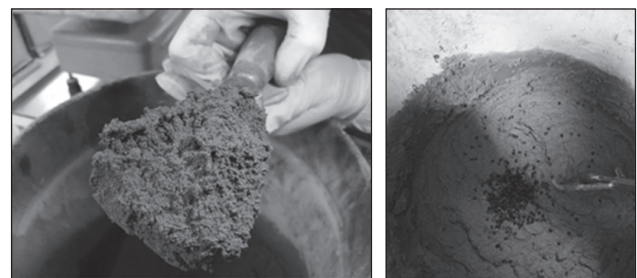


Рис. 1. Приготовление пенобетонной/фибропенополиамидбетонной смесей

Исследования конструктивных свойств ПБ и ФППБ проводились для проверки эффективности предлагаемого состава и включали испытания на осевое сжатие и растяжение по 24 опытными образцами из пенобетона и фибропенополиамидбетона.

В опытах варьировались:

- вид НДС — осевое сжатие и осевое растяжение;

- вид образцов — кубы $10 \times 10 \times 10$ см и балочки $16 \times 4 \times 4$ см (рис. 2);
- возраст бетона — 7, 28 суток;
- режим испытаний — с постоянной скоростью нагружения и деформирования.



Рис. 2. Общий вид образцов для определения НДС

Таблица 3

Размеры образцов для механических испытаний

Номер состава	Средний размер образца	Средний вес, кг
1 ПБ (контрольный состав)	$10 \times 10 \times 10$ см	1,2
	$16 \times 4 \times 4$ см	0,275
2 ПБД	$10 \times 10 \times 10$ см	1,120
	$16 \times 4 \times 4$ см	0,320
3 ФППБг	$10 \times 10 \times 10$ см	1,14
	$16 \times 4 \times 4$ см	0,28
4 ФППБд	$10 \times 10 \times 10$ см	1,16
	$16 \times 4 \times 4$ см	0,28

Прочность бетона определялась по ГОСТ 10180–2012 [16] разрушающим методом. Всего было испытано 48 кубов-образцов разных размеров, испытания проводились на 7-е и 28-е сутки на машине МС-500.

Разрушение образцов на сжатие характеризовалось выкалыванием с боков образцов бетона (рис. 3). Разрушение образцов на растяжение с изгибом произошло в средней трети пролета (рис. 4).

Прочность бетона на сжатие R , МПа, с точностью до 0,1 МПа вычисляются по формуле:

$$R = \alpha \frac{F}{A} K_w.$$

Прочность бетона на растяжение при изгибе R_{ib} , МПа, с точностью до 0,01 МПа вычисляются по формуле:

$$R_{ib} = \delta \frac{Fl}{ab^2} K_w,$$

где F — разрушающая нагрузка, H ; A — площадь рабочего сечения образца, мм; a , b , l — ширина, высота поперечного сечения призмы и расстояние между опорами соответственно при испытании образцов на растяжение при изгибе, мм; α , δ — масштабные коэффициенты для приведения прочности бетона к прочности бетона в образцах базовых размера и формы; K_w — поправочный коэффициент для ячеистого бетона, учитывающий влажность образцов в момент испытания.



Рис. 3. Разрушение образцов при сжатии

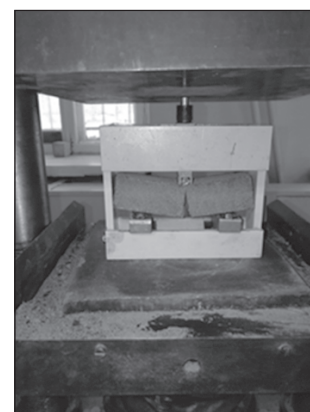


Рис. 4. Разрушение образцов при растяжении

Анализ результатов исследований выявил следующие особенности.

Прочность на сжатие (табл. 4) в возрасте 7 и 28 суток у ПБ, изготовленного без добавок, соответствовала классу по прочности в пределах В5–В7,5, что относится к конструкционным ячеистым бетонам.

Прочность ПБд с добавкой показала, что он соответствует классу по прочности в пределах В1,5–В2, что относится к конструктивно-теплоизоляционным бетонам. Введение тонких частиц в виде продукта измельчения горелого бетона после пожара должно было усилить влияние портландцементных зерен на снижение пористости в пенобетонной смеси. Образцы действительно имели более мелкую пористую структуру, однако это привело к снижению прочности на 30% по отношению к образцам пенобетона без добавок.

Прочность ФППБг показала, что он соответствует классу по прочности В3,5, что отно-

сится к конструкционно-теплоизоляционным бетонам. При этом сцепления между гранулами и пенобетонной смесью не произошло, что привело к снижению прочности на 7,2% по отношению к пенобетону без добавок (рис. 6).

Прочность ФППБд показала, что он соответствует классу по прочности В5–В7,5, что относится к конструкционным ячеистым бетонам. При этом выявлено хорошее сцепление между полиамидной дробленкой и пенобетонной смесью, однако показатели по прочности на сжатие остались теми же, что и у пенобетона без добавок.

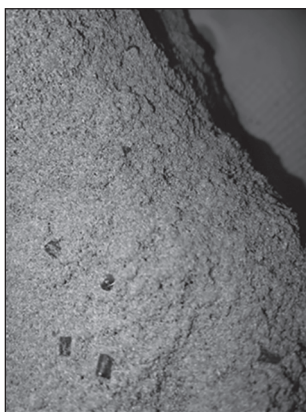


Рис. 5. Общий вид ФППБд Рис. 6. Общий вид ФППБд

Прочность на растяжение (табл. 4) в основном для всех составов варьировалась в одинаковых пределах. Класс бетона на растяжение соответствовал В_{0,8}. При этом для состава 2 ПБд и 3 ФППБг испытание на растяжение

при изгибе не показало низкую прочность, на 30% ниже, чем в контрольных образцах ПБ.

Таблица 4

**Прочность пенобетона/
фибропенополиамидбетона
на осевое сжатие и осевое растяжение**

№ состава	Средняя прочность, МПа, в возрасте, сут.			
	7		28	
	R_b	R_{bt}	R_b	R_{bt}
1	6,25	0,78	8,35	0,981
2	2,92	–	2,92	–
3	4,48	–	5,61	–
4	6,63	0,78	8,29	0,9

В целом рост набора прочности с 7 по 28 сутки оставил от 10% до 25%.

Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы.

1. Разработан матричный состав пенобетонной смеси для введения полиамидной фибры с необходимой плотностью 1100 кг/м³.
2. Использование полиамида в виде дробленки показало улучшенную адгезию с цементной матрицей. Образцы с такой фиброй показали прочностные характеристики, соответствующие контрольным образцам.

Дальнейшие исследования будут направлены на формирование фибропенополиамидбетонной композиции с использованием фибры в виде полиамидного волокна различного диаметра и длины для возможности применения такого бетона в строительстве гражданских зданий.

Литература

1. Моргун Л.В. Структурообразование и свойства фибропенобетонов неавтоклавного твердения: теория и методология рецептурно-технологического регулирования [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Л.В. Моргун. — Ростов н/Д, 2005. — 336 с.
2. Сари М. Армирование волокнами вяжущие композиционные материалы: вклад полиамидных волокон [Текст] / М. Сари, Дж. Лекселент, Р. Решерш // Современные технологии сухих смесей в строительстве «MixBULD»: сб. докладов под редакцией Э.А. Большакова. — СПб.: Изд-во ГУПС, 2001. — С. 48–60.
3. Пат. 2406711 Российская Федерация, МПК С04В38/10, В28С5/38 Способ получения армированной ячеистобетонной смеси [Текст] / Дильдина Н.М.; заявитель и патентообладатель Дильдина Н.М. — № 2009116421/03; заявл. 29.04.2009; опубл. 20.12.2010, бюл. № 235. — 7 с.
4. Андросов В.Ф. Крашение синтетических волокон [Текст] / В.Ф. Андросов. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. — 272 с.
5. Кудрявцев Г.И. Полиамидные волокна [Текст] / Г.И. Кудрявцев, М.П. Носов, А.В. Волохина. — М.: Химия, 1976. — 98 с.
6. Кричевский Г.Е. Диффузия и сорбция в процессах крашения и печатания [Текст] / Г.Е. Кричевский. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1980. — 302 с.
7. Бормотов А.Н. Синергетический подход при выборе оптимальных дисперсных наполнителей композиционных материалов [Текст] / А.Н. Бормотов, А.П. Прошин, Е.В. Королев, В.А. Смирнов // Сб. тр. 8-е акад. чтений. Современное состояние и перспектива развития строительного материаловедения. — Самара: Изд-во СГАСУ, 2004. — С. 87–90.
8. Бруссер М.И. Исследование структурной пористости бетона факторов её определяющих [Текст]: автореф. дис.

- ... канд. техн. наук / М.И. Бруссер. — М.: Изд-во МИСИ, 1971. — 142 с.
9. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса [Текст] / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. — М.: Госиздат, 1963. — 536 с.
 10. Квливидзе В.И. Изучение адсорбированной воды методом ядерного магнитного резонанса [Текст] / В.И. Квливидзе // Связанная вода в дисперсных системах. — М.: МГУ, 1970. — Вып. 1. — С. 41–54.
 11. ГОСТ 10178–85 Портландцемент и шлакопортландцемент [Текст]. Технические условия (действующая редакция).
 12. ГОСТ 8736–2014 Песок для строительных работ [Текст]. Технические условия (с поправкой).
 13. ТУ 2481–185–05744685–01 Пенообразователь использовался ПБ–2000 (действующая редакция) [Текст].
 14. ГОСТ 23732–2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия (действующая редакция) [Текст].
 15. ОСТ 6–06–С9–93 Полиамид 6 [Текст]. Технические условия.
 16. ГОСТ 10180–2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам (действующая редакция) [Текст].

References

1. Morgun L.V. *Strukturoobrazovanie i svoystva fibropenobetonov neavtoklavnogo tverdeniya: teoriya i metodologiya retsepturno-tekhnologicheskogo regulirovaniya. Dokt. Diss.* [Structure formation and properties of non-autoclaved fibro-foam concrete: theory and methodology of prescription-technological regulation. Doct. Diss.]. Rostov-on-Don, 2005. 336 p.
2. Sari M. Armirovanie voloknami vyazhushchie kompozitsionnye materialy: vklad poliamidnykh volokon [Fiber reinforcement binders composite materials: the contribution of polyamide fibers]. *Sovremennye tekhnologii sukhikh smesey v stroitel'stve «MixBULD»* [Modern technologies of dry mixtures in construction "MixBULD"]. St. Petersburg: GUPS Publ. 2001, pp. 48–60.
3. Pat. 2406711 Rossiyskaya Federatsiya, MPK C04B38/10, B28C5/38 Sposob polucheniya armirovannoy yacheistobetonnoy smesi [Pat. 2406711 Russian Federation, IPC C04B38 / 10, B28C5 / 38. Method of producing reinforced concrete mixture]. 7 p.
4. Androsov V.F. *Krashenie sinteticheskikh volokon* [Dyeing of synthetic fibers]. Moscow: Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1984. 272 p.
5. Kudryavtsev G.I., Nosov M.P., Volokhina A.V. *Poliamidnye volokna* [Polyamide fibers]. Moscow: Khimiya Publ., 1976. 98 p.
6. Krichevskiy G.E. *Diffuziya i sorbtsiya v protsessakh krasheniya i pechataniya* [Diffusion and sorption in the processes of dyeing and printing]. Moscow: Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1980. 302 p.
7. Bormotov A.N., Proshin A.P., Korolev E.V., Smirnov V.A. Sinergeticheskiy podkhod pri vybere optimal'nykh dispersnykh napolniteley kompozitsionnykh materialov [A synergistic approach in choosing the optimal dispersed fillers of composite materials]. *Sovremennoe sostoyanie i perspektiva razvitiya stroitel'nogo materialovedeniya* [The current state and future development of building materials]. Samara, SGASU Publ., 2004, pp. 87–90.
8. Brusser M.I. *Issledovanie strukturnoy poristosti betona i faktorov ee opredelyayushchikh. Kand. Diss.* [The study of the structural porosity of concrete and its determining factors. Cand. Diss.]. Moscow: MISI Publ., 1971. 142 p.
9. Lykov A.V., Mikhaylov Yu.A. *Teoriya teplo- i massoperenosa* [Theory of heat and mass transfer]. Moscow: Gosizdat Publ., 1963. 536 p.
10. Kvlividze V.I. *Izuchenie adsorbirivannoy vody metodom yadernogo magnitnogo rezonansa* [The study of adsorbed water by nuclear magnetic resonance]. *Svyazannaya voda v dispersnykh sistemakh* [Bound water in disperse systems]. Moscow: MGU Publ., 1970, I. 1, pp. 41–54.
11. *GOST 10178–85 Portlandtsement i shlakoportlandtsement. Tekhnicheskie usloviya (deystvuyushchaya redaktsiya)* [GOST 10178–85 Portland cement and slag Portland cement. Specifications (current edition)].
12. *GOST 8736–2014 Pesok dlya stroitel'nykh rabot. Tekhnicheskie usloviya (s popravkoy)* [GOST 8736–2014 Sand for construction works. Specifications (as amended)].
13. *TU 2481–185–05744685–01 Penobrazovatel' ispol'zovalsya PB–2000 (deystvuyushchaya redaktsiya)* [TU 2481–185–05744685–01 Frother was used by PB–2000 (current version)].
14. *GOST 23732–2011. Voda dlya betonov i stroitel'nykh rastvorov. Tekhnicheskie usloviya (deystvuyushchaya redaktsiya)* [GOST 23732–2011. Water for concrete and mortar. Specifications (current edition)].
15. *OST 6–06–S9–93 Poliamid 6. Tekhnicheskie usloviya* [OST 6–06–С9–93 Polyamide 6. Specifications].
16. *GOST 10180–2012 Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obraztsam (deystvuyushchaya redaktsiya)* [GOST 10180–2012 Concretes. Methods for determining the strength of the control samples (current version)].