

**Смоляков Алексей Владимирович**, научный сотрудник, Научно-исследовательская и испытательная лаборатория бетона и строительных материалов, Белорусский национальный технический университет, Филиал «Научно-исследовательский политехнический институт» (г. Минск, Беларусь)

## **ВЛИЯНИЕ ЦЕМЕНТА С МИНЕРАЛЬНЫМИ ДОБАВКАМИ ИЗ МОЛОТОГО ПРИРОДНОГО ПЕСКА И ГРАНИТНОГО ОТСЕВА НА СВОЙСТВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА**

© РУП «Институт БелНИИС», 2019

Institute BelNIIS RUE, 2019

### **АННОТАЦИЯ**

*В материале статьи приведены результаты экспериментальной оценки физико-механических свойств тяжелого конструкционного бетона, полученные в сравнительном варианте: при его приготовлении на чистоклинкерном (бездобавочном) вяжущем, а также с использованием песчанистого цемента, содержащего ~20 % молотого природного кварцевого песка, и цемента с 20 %-ой минеральной добавкой из гранитного отсева, при соблюдении правила «прочих равных условий».*

*Бетон во всех случаях готовили на вяжущем марки «М500» (класс по прочности «42,5»); исследования осуществили по стандартизированным методикам (оценка прочности, усадки, морозостойкости и др.) и нестандартизированным при определении упруго-деформативных характеристик бетона. В результате экспериментов установлено, что бетон на песчанистом цементе характеризуется ростом деформаций усадки на 70 % и повышенной предрасположенностью к трещинообразованию, что приводит к снижению прочности на сжатие до 10 %, на растяжение при изгибе до 27 %, к снижению водонепроницаемости и морозостойкости на 1...2 марки и упруго-деформативных свойств по сравнению с бетоном на цементе с добавкой гранитного отсева,*

*а кроме этого, им не обеспечивается защитная способность по отношению к стальной арматуре. Причиной является переизмельчение его клинкерной части при совместном помоле клинкера с песком, что вызывает рост водопотребности, изменения в механизме гидратации цемента и сопровождается повышенной усадкой и трещинообразованием в цементном камне и бетоне.*

*На этом основании сделан вывод о необходимости и рациональности замены природного песка на гранитный отсеv в производстве вяжущего с минеральной добавкой белорусскими производителями цемента. С учетом изложенного экспериментально обосновано рациональное содержание добавки из гранитного отсева в цементе (в количестве до 20 % его массы) и исследовано ее влияние на технологические свойства бетонных смесей (увеличивается на 25...50 % время сохранения формуемости, снижается водоотделение до ~10...15 % и раствоpоотделение до 10...20 %), а также на прочностные, упруго-деформативные и эксплуатационные свойства бетона, что позволило обосновать вывод о возможности использования полученного цемента для конструкционного бетона классов C12/15...C32/40 общестроительного назначения без ограничений, включая изделия (конструкции) с преднапрягаемой арматурой.*

**Ключевые слова:** помол, цементный камень, бетон, прочность, усадка бетона, изгиб, прочность на сжатие бетона, водопоглощение, водонепроницаемость, морозостойкость, коррозия.

**Для цитирования:** Смоляков, А. В. Влияние цемента с минеральными добавками из молотого природного песка и гранитного отсева на свойства тяжелого бетона / А. В. Смоляков // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 271–287. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-17>

**Aleksey Smolyakov**, Researcher, Research and Testing Laboratory for Concrete and Building Materials, Belarusian National Technical University, Branch "Research Polytechnic Institute" (Minsk, Belarus)

## **INFLUENCE IN CEMENT OF MINERAL ADDITIVES FROM MILKED NATURAL SAND AND GRANITE BALANCE ON THE PROPERTIES OF HEAVY CONCRETE**

### **ABSTRACT**

*The article presents the results of an experimental evaluation of the physicomaterial properties of heavy structural concrete, obtained in a comparative version: when manufactured on a pure linker (additive-free) binder, as well as using sandy cement containing ~ 20% ground natural quartz sand, and cement with mineral addition (in the amount of 20%) from granite screening and observance of the "other equal conditions" rule.*

*Concrete in all cases made on the binder brand "M500" (strength class "42.5"); studies were carried out according to standardized methods (strength, shrinkage, frost resistance, etc.) and non-standardized in determining the elastic-deformative characteristics of concrete. As a result of the experiments, the following was established. Concrete on sandy cement (due to overgrinding of its clinker part, which causes an increase in water demand, changes in the hydration mechanism and is accompanied by increased shrinkage) is characterized by an increase in shrinkage deformations by 70% and an increased susceptibility to cracking, which leads to a decrease in compressive strength up to 10%, tensile bending up to 27%, elastic-deformative properties, as well as reduction of water resistance and frost resistance - by 1 ... 2 marks in comparison with concrete on cement with the addition of granite sifting, and does not provide protective ability in relation to steel reinforcement. Taking into account the above, a rational content of an additive from granite sifting in cement in an amount of up to 20% of its mass and its influence on the technological properties of concrete mixtures (an increase of (25 ... 50) % of the time to maintain moldability, reduction of water separation to ~ (10 ... 15) % and dissolution to (10 ... 20) %), as well as the strength, elastic-deformative and operational properties of concrete,*

*which made it possible to substantiate the conclusion that the obtained cement can be used for structural concrete of classes C12 / 15 ... C32 / 40 of general construction Nogo destination without limitation, including articles (structures) with prestressing reinforcement.*

**Keywords:** grinding, cement stone, concrete, strength, shrinkage of concrete, bending compressive strength of concrete, water absorption, water tightness, frost resistant, corrosion.

**For citation:** Smolyakov A. Influence in cement of mineral additives from milked natural sand and granite balance on the properties of heavy concrete. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 11. 2019. pp. 271–287. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-17> (in Russian)

## **ВВЕДЕНИЕ**

В стремлении снизить энергетические затраты на получение цемента и его стоимость наши цементные заводы производят песчанистый цемент, в который на стадии помола клинкера вводят природный песок до 20 % от массы вяжущего. Этот вид цемента (первые патенты Германии на него датируются 1892–1893 гг.) характеризуется переизмельчением его клинкерной части при совместном помоле с песком. Это следствие того, что кварцит характеризуется большей твердостью (по Моосу ~7 ед.), чем клинкер (~6 ед.), и выступает в роли дополнительных мелющих тел.

По данным профессора А. В. Волженского, при  $S_{\text{уд.цем.}} \sim 3700 \dots 3800 \text{ см}^2/\text{г}$  степень измельчения клинкерной части достигает  $S_{\text{уд.кл.}} \sim 5000 \dots 6000 \text{ см}^2/\text{г}$  [1, 2]. Такое вяжущее быстро гидратируется и набирает прочность в раннем возрасте, но одновременно обладает повышенной усадкой и провоцирует трещинообразование в бетоне, снижает устойчивость последнего при переменном увлажнении-высушивании, при воздействии солевой среды и снижает морозостойкость. Однако наиболее опасны ускоренная гидратация и твердение [2] песчанистого цемента в железобетоне, потому что в вяжущем отсутствуют крупные зерна клинкера (фактически для песчанистого цемента

остаток на сите № 008 составляет менее 1 % при допустимых по действующему стандарту до 15 %), гидратация которых в течение длительного периода обеспечивает поддержание щелочности среды в бетоне эксплуатируемых конструкций на уровне, необходимом для сохранения в нем стальной арматуры ( $pH \geq 11,8$  ед.) [3, 4]. Снижение уровня «рН-фактора» и карбонизация со временем защитного слоя бетона создают реальную угрозу коррозии арматуры железобетонных конструкций. Особенно это опасно в конструкциях, перекрывающих пролеты, – балках, фермах, ригелях, плитах перекрытий и др. При этом в современных условиях хозяйствования в нашей стране песчанистый цемент выпускают в значительных объемах и реализуют в сборном и монолитном железобетоне. Это несмотря на то, что еще в 60-х годах XX века его целевое назначение (как «специального» вида цемента) было рекомендовано к применению при изготовлении асбестоцементных изделий [5]. По технологии их изготовления (например, шифера) отформованные изделия «запаривают» автоклавированием. В результате быстро гидратирующийся песчанистый цемент обеспечивает ускоренный набор прочности, и процесс гидратации практически завершается. В строительных железобетонных конструкциях должно быть наоборот – процесс гидратации цемента должен поддерживаться весь период их эксплуатации, чтобы обеспечить безопасный для стальной арматуры уровень щелочности в объеме бетона [3, 4 и др.]. А это возможно только при наличии в вяжущем крупных фракций его клинкерной составляющей.

Материал настоящей статьи подтверждает обоснованность разработанных еще в Советском Союзе ограничений к применению песчанистого цемента в железобетоне.

## **УСАДКА И УПРУГО-ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНА НА СРАВНИВАЕМЫХ ВИДАХ ЦЕМЕНТА**

*Усадка бетона* вызывается физико-химическими процессами, происходящими в бетоне (а по существу – в цементном камне) при твердении, а также изменении его влажности. Суммарная величина деформаций усадки складывается из ряда составляющих,

среди которых наиболее существенное значение имеют влажностные, контракционные и «карбонизационные» деформации, названные так по виду определенного фактора.

Усадку оценивали на образцах-балочках из мелкозернистого бетона (состав – Ц : П = 1 : 3, при расходе цемента в 500 кг и В/Ц ~0,4 доли ед.) в процессе твердения (после распалубки через 24 ч. от момента изготовления) в воздушно-сухих условиях помещения лаборатории ( $t \sim 22 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\varphi \sim 60 \pm 5 \%$ ) в течение 70 суток. Результаты испытаний, выполненных в варианте сравнения по оценке роли разных видов вяжущего в величине деформаций усадки мелкозернистого бетона, приведены в таблице 1.

Таблица 1

### Значение усадки образцов бетона

Вид вяжущего в бетоне	Порядковый номер образца	Усадка образцов бетона, мкм, в возрасте, сут.								Относительные изменения усадки бетона (%) в возрасте, сут.:	
		3	7	14	21	28	42	56	70	3	42
Портландцемент без минеральных добавок	1	49	88	117	130	140	147	149	154	-	-
	2	47	87	114	125	134	142	143	145	-	-
	3	52	90	121	132	140	150	153	155	-	-
	Среднее	49	-	-	-	-	146	-	-	100	100
Портландцемент с 20 % гранитного отсева	1	53	90	122	135	154	161	163	164	-	-
	2	58	96	129	141	159	166	166	167	-	-
	3	60	98	131	150	162	170	172	173	-	-
	Среднее	57	-	-	-	-	166	-	-	116	114
Портландцемент с 20 % природного песка	1	91	160	205	226	255	269	275	285	-	-
	2	94	164	211	229	251	276	277	285	-	-
	3	89	160	203	221	243	259	266	269	-	-
	Среднее	91	-	-	-	-	266	-	-	186	182

Оценку «абсолютной» величины (в мкм) усадки по продольной оси (относительно длины образцов сразу после распалубки) начали на 3-и сутки после их изготовления; показания индикатора округляли до микрометра (мкм).

Очевидно, что наиболее интенсивно деформации усадки «развивались» в первые 3...7 суток твердения образцов и стабилизировались к 42 суткам твердения для образцов бетона на бездобавочном вяжущем и с добавкой гранитного отсева и к 56 суткам – на песчаном цементе. При этом величина усадки существенно различается в зависимости от вида использованного вяжущего. Так, если для образцов мелкозернистого бетона на вяжущем с 20 % гранитного отсева к 3-м и 42-м суткам твердения она увеличилась на ~16 % и ~14 %, то для образцов на песчаном цементе на 86 % и 82 % соответственно относительно усадки образцов мелкозернистого бетона на бездобавочном цементе. Причины повышенной усадки песчаного цемента кроются в переизмельчении клинкерной составляющей вяжущего (как уже отмечалось, ее удельная поверхность достигает  $S_{уд} \sim 5000...6000 \text{ см}^2/\text{г}$ ), а также в возрастающей водопотребности его ( $K_{нр} \sim 0,285$  доли ед.) относительно бездобавочного цемента ( $K_{нр} \sim 0,275$  доли ед.) и цемента с гранитным отсевом ( $K_{нр} \sim 0,260$  доли ед.), которые были использованы в этих экспериментах. Следствием было увеличение водоцементного отношения цементно-песчаного (мелкозернистого) бетона одинаковой консистенции, составившего величины  $V/C = 0,41$  на бездобавочном цементе,  $V/C = 0,40$  на цементе с гранитным отсевом и  $V/C = 0,43$  доли ед. на песчаном цементе.

В целом при пересчете на 1 м условной длины образца мелкозернистого бетона экспериментально определенная усадка к моменту стабилизации (42 сут.) составила: для мелкозернистого бетона на бездобавочном вяжущем ~0,9 мм/м; на цементе с гранитным отсевом ~1,0 мм/м и ~1,7 мм/м на песчаном цементе. Повышенная усадка, характеризующая этот вид вяжущего, проявилась (как показано далее) в снижении упруго-деформативных и других механических характеристик бетона, твердевшего в более благоприятных (нормально-влажностных) условиях.

*Призменная прочность и деформативность бетона определены в варианте сравнения нестандартным методом. Размер образцов (40x40x160 мм) принят, исходя из возможностей испытательной машины универсального типа фирмы «ZwickRoell» (Германия), обеспечивающей автоматический отсчет показателей деформации образца бетона, приложенной к нему нагрузки, а также оценку упругости бетона при нагрузке «F», «H» соответствующей области упругой «работы» образца бетона.*

На начальном этапе испытаний были определены прочность на сжатие образцов-кубов с ребром 100 мм, призменная прочность образцов-балочек на сжатие (табл. 2), а также оценена деформативность бетона при испытаниях образцов-балочек на изгиб (рисунок 1).

Таблица 2

**Значения прочности бетона на различных вяжущих**

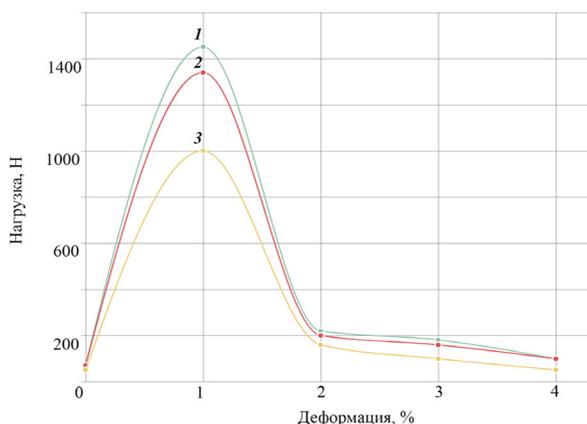
Вид вяжущего в бетон	Прочность бетона на сжатие, МПа	Призменная прочность бетона, МПа	Относительное значение призменной прочности бетона к «кубиковой», %
Портландцемент без минеральных добавок	42,8	35,9	83,9
Портландцемент с 20 % гранитного отсева	41,5	34,2	82,4
Портландцемент с 20 % природного песка	39,6	30,9	78,0

Из результатов испытаний (приведены для серии из 6-ти образцов, как среднее значение по 4-м наибольшим; для образцов-кубов масштабный коэффициент  $\alpha = 0,95$  учтен) следует, что наибольшее снижение прочностных характеристик показали образцы бетона на песчаном цементе.

Как мы считаем, это следствие повышенной усадки и вызываемого ей трещинообразования в объеме цементного камня, а также в зонах его контакта с поверхностью зерен заполнителя, т. к. в этих экспериментах использовали предварительно промытые и высушенные песок и гранитный щебень. Данный вывод согласуется с далее приведенными результатами по оценке усадки и всех

последующих испытаний при оценке деформативности и упругости бетона.

Деформативность бетона (в этом случае – мелкозернистого, цементно-песчаного как более однородного по макроструктуре при малом сечении образцов) на разных видах вяжущего оценили по соотношению уровня нагрузки на изгибаемый образец и развивающихся при этом в «теле» бетона деформаций, фиксированных в процессе испытаний образцов-балочек на изгиб (рисунок 1).



- 1 – образец на вяжущем без минеральных добавок;  
2 – образец с 20% гранитного отсева; 3 – образец с 20 % природного песка.

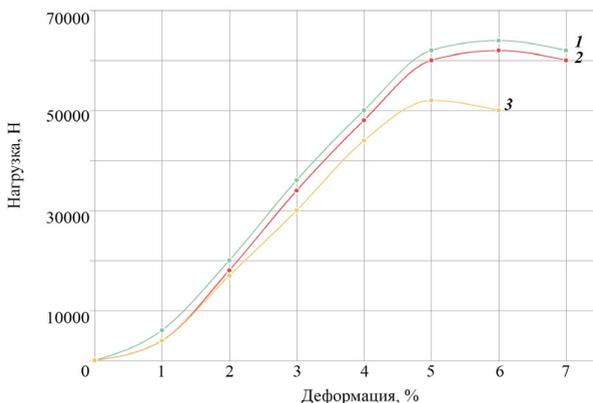
**Рисунок 1.** Соотношение «нагрузка-деформация» образцов при изгибе

Из экспериментальных данных очевидно резкое снижение деформативности образцов бетона на песчаном цементе (график № 3). Считаем, что это следствие повышенной усадки данного вида цемента, проявляющейся в трещинообразовании в объеме цементного камня, что провоцирует развитие трещин в растянутой зоне изгибаемого бетонного элемента и снижение его деформативности. Играет роль также и ухудшение сцепления заполнителей с цементным камнем в бетоне в присутствии в цементе инертной добавки.

По этому показателю бетону на бездобавочном вяжущем уступает также и бетон, приготовленный на цементе с гранитным

отсевом. Однако в этом случае снижение нагрузки к моменту разрушения образцов в среднем составило с 1480 Н до 1350 Н, т. е. 8...9 %, а для образцов на песчанистом цементе до 1060 Н, т. е. 2...30 %.

Оценка упругости бетона. На рисунке 2 приведены графические зависимости, отражающие развитие деформаций при испытаниях отдельных образцов-балочек на сжатие. Пластические деформации бетона (класса С25/30; состав: цемента 350 кг, песка 800 кг (Мк – 2,1 доли ед.), щебня 1150 кг, В/Ц – 0,45, осадка конуса – 5...6 см) в начальной фазе эксперимента связаны с тем, что по условиям испытаний в используемом оборудовании торцы образцов не запирали в опорные обоймы. Частичное начальное смятие неровностей поверхности бетона опорных плоскостей образцов отражается в этих деформациях, после чего бетон начинает «работать» упруго. Учитывая, что прочие условия испытаний были идентичными, а сами испытания имели сравнительный характер, полученные результаты объективно отражают взаимосвязь упруго-деформативных свойств бетона от примененного цемента без минеральных добавок (№ 1) и с 20 %-ми гранитного отсева (№ 2) или природного песка (№ 3).



- 1 – образец на вяжущем без минеральных добавок;
- 2 – образец с 20 % гранитного отсева;
- 3 – образец с 20 % природного песка

**Рисунок 2.** Соотношение «нагрузка-деформация» образцов при сжатии

Оценка соотношения «нагрузка-деформация» показала, что средние значения по 4-м наибольшим показаниям нагрузки в сериях образцов, изготовленных из бетона одного класса прочности на сжатие и твердевших в одинаковых (нормально-влажных) условиях, существенно различаются в зависимости от использованного вяжущего. Так, для всех вариантов консистенции бетонной смеси, из которой были изготовлены образцы для этих испытаний, наибольшие значения нагрузок при оценке упругости бетона закономерно соответствовали образцам на бездобавочном вяжущем.

На 2...4 % меньший уровень нагрузок характеризовал бетон с использованием цемента с 20 % минеральной добавки гранитного отсева и на 7...10 % при использовании песчанистого цемента с таким же количеством миндобавки.

Причиной этих явлений, как уже указывалось, являются повышенная усадка песчанистого цемента и вызываемое ей трещинообразование как в объеме цементного камня, так и в зоне контакта его с поверхностью зерен заполнителя в бетоне. Следствием является снижение всех определенных в настоящем разделе физико-механических характеристик бетона.

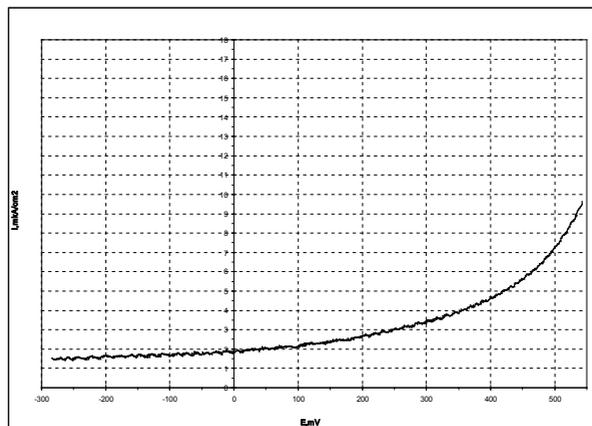
Эти результаты явились побудительным мотивом для оценки защитных свойств бетона, приготовленного на песчанистом цементе, по отношению к стальной арматуре при внешней агрессии среды. Для этого были изготовлены армированные образцы (сечение 70x70 мм, длина – 140 мм; по геометрическому центру расположен стальной (шлифованный) стержень Ø10 мм) бетона для исследований по «направлению 2» по СТБ 1168-99 [6]. Однако испытания не состоялись, так как после первых 1–2-х циклов насыщения в 5 % растворе NaCl и высушивания по методике указанного стандарта на образцах бетона появились трещины (рисунок 3), что недопустимо по положениям данного нормативного документа.

Очевидно, что визуально различимые трещины на образцах бетона – это проявление повышенной усадки песчанистого цемента. Естественно, что испытания были остановлены, т. к. проводить их бесполезно. Здесь следует еще раз отметить, что изначально песчанистый цемент (первые производственные партии в Советском Союзе были реализованы в 50-ые годы XX века) рекомендовался для производства асбоцементных изделий [5].



**Рисунок 3.** Фотографии образцов бетона на песчаном цементе после 1–2-х циклов насыщения-высушивания

На рисунке 4 приведены результаты испытаний (по СТБ 1118-99 [6]) по оценке защитной способности бетона на цементе с 20 %-ой добавкой из гранитного отсева, определенной на образцах-аналогах, приведенных на рисунке 3. Одновременно проверяли возможные изменения свойств цемента с добавкой гранитного отсева при хранении в течение 90 суток.



**Рисунок 4.** Поляризационная кривая образца после 10 циклов насыщения-высушивания в 5 %-ом р-ре NaCl; бетон на цементе после 90 суток хранения

Исследован бетон, приготовленный на цементе с содержанием минеральной добавки в 0,10 и 20 % от его массы как на цементе «свежемолотом» (~15 суток хранения); так и на цементе с 20 % минеральной добавки после 60 и 90 суток хранения. В качестве арматуры использованы стержни  $\varnothing = 10$  мм из стали ст. 3 по ГОСТ 5781, которые были очищены, отшлифованы и обезжирены ацетоном и забетонированы по центральной оси образцов в соответствии с СТБ 1168-99.

По результатам испытаний установлено, что бетон на цементе с гранитным отсевом стабильно обеспечивает его защитную способность по отношению к стальной арматуре и может применяться в железобетоне с обычным и преднапряженным армированием.

### **ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНА**

В таблице 3 и 4 приведены экспериментальные данные, характеризующие основные свойства конструкционного тяжелого бетона, приготовленного из равноподвижных смесей марки П2 в зависимости от вида вяжущего (таблица 3) и приготовленного на цементе с гранитным отсевом при различном 0...30 % содержании этой минеральной добавки от массы вяжущего (таблица 4).

Как следует из экспериментальных данных таблиц 1 и 3, усадка бетона на цементе с 20 % миндобавки из молотого гранитного отсева на ~14...16 % превышает усадку бетона на бездобавочном цементе, но при этом ее величина на ~70 % меньше, чем у бетона на песчанистом портландцементе с 20 % миндобавки в виде молотого природного (кварцевого) песка. Как следствие, по причине повышенной предрасположенности к трещинообразованию при усадке цементного камня и бетона на песчанистом цементе использование его в качестве вяжущего сопровождалось снижением всех исследованных показателей бетона: прочности на сжатие (кубиковой и призмной), при изгибе, упруго-деформативных и других свойств, включая не обеспечиваемую защитную способность бетона на этом цементе по отношению к стальной арматуре. На этом основании подтвержден вывод о нецелесообразности

использования песчанистого портландцемента в железобетоне (с позиций обеспечения его эксплуатационной надежности и долговечности), а также об обоснованности замены его гранитным отсевом в производстве вяжущего с миндобавкой цементными заводами Беларуси.

Одновременно установлено (таблица 4), что цемент, содержащий до 20 % по массе гранитного отсева, обеспечивает достаточный для конструкционного тяжелого бетона общестроительного назначения уровень его прочностных и эксплуатационных свойств, незначительно уступающий бетону на бездобавочном вяжущем. А в случае его применения в бетоне в сочетании с качественным пластификатором (при соответствующем снижении начального водосодержания) превосходит этот уровень.

Производственное использование на предприятиях сборного железобетона и строительными организациями цемента с добавкой гранотсева, выпущенного ОАО «Кричевцементношифер» в количестве ~93,8 тыс. тонн, а также опытно-производственной партии этого цемента, выпущенной ОАО «БЦЗ» в 2019 г., подтвердило его эффективность.

Таблица 3

### Физико-механические свойства и характеристики бетона в зависимости от вида цемента

Вид применяемого цемента (все марки «М500»)	Усадка бетона в мкм (%)		Прочность на сжатие бетона класса С25/30 в МПа (%)**		Нагрузка при испытании балок на изгиб (оценка деформативности), кН (%)	Оценка упругих свойств бетона класса С25/30 по уровню нагрузки к началу пластических деформаций по величине кН (%)	Испытания на защитную способность бетона по отношению к стальной арматуре в 5 %-ом растворе NaCl (циклические)
	3 сут	42* сут	Кубы (150x150x150, мм)	призмента ная			
Бездобавочный цемент; S <sub>н</sub> ~3100 см <sup>2</sup> /г.	49 (100 %)	146 (100 %)	42,8 (100 %)	35,9 (100 %)	1,48 (100 %)	63,0 (100)	выдержал
2. Цемент с 20 % добавкой гранитного отсева; S <sub>н</sub> ~3080 см <sup>2</sup> /г.	57 (116 %)	166 (114 %)	41,5 (97 %)	34,2 (95 %)	1,35 (91 %)	57,0 (90,5)	выдержал
3. Цемент песчаный с 20 % добавкой природного (кварцевого) песка; S <sub>н</sub> ~3780 см <sup>2</sup> /г.	91 (186 %)	266 (182 %)	39,6 (92 %)	30,9 (86 %)	1,06 (72 %)	45,0 (71,5)	не выдержал

\* - к 42 сут. стабилизировалась усадка на бездобавочном цементе и цементе с гранитным отсевом; \*\* - значения величин соответствуют нормативным требованиям к классу бетона С25/30.

Таблица 4

### Прочность на сжатие и эксплуатационные свойства бетона на цементе с добавкой гранитного отсева

Состав вяжущего	Прочность в 28 суток		Водопоглощение по массе		Водонепроницаемость		Морозостойкость, циклы	Водо-(соле-)стойкость *** после 30 циклов			
	Клинкерная часть, кг	миндобавка	МПа	%	Кф, см/с	марка		МПа	%		
350	-	-	35,0	100	4,1	-	4,5x10-9	W4	8** (300)	22,0 (26,0)	100 (100)
315	35	10	37,7	108	4,2	+2	4,0x10-9	W4	8** (300)	20,0 (24,0)	91 (92)
280	70	20	34,9	100	4,3	+5	5,5x10-9	W4	7-8** (250...300)	17,0 (22,0)	77 (85)
245	105	30	29,7	85	4,6	+12	0,8x10-8	W2	4*** (150)	-	-
280*	70	20	36,7	105	3,9	-4	1,8x10-9	W6	8-12** (300...400)	23,0 (30,0)	104 (115)

\* - со снижением расхода воды на ~15 % за счет введения пластифицирующей добавки (равноподвижная бетонная смесь); \*\* - замораживание при t ~ -55 °С в 5% растворе NaCl образцов бетона после пропаривания (количество циклов по 1-му методу); \*\*\* - при насыщении в воде (или 5% растворе NaCl) - высушивании.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Из оценки результатов выполненных исследований следует, что уровень установленных свойств тяжелого конструкционного бетона на вяжущем, содержащем до 20 % минеральной добавки из гранитного отсева, удовлетворяет всем необходимым требованиям, предъявляемым к конструкционному бетону общестроительного назначения.

Установлено, что при прочих равных условиях усадка бетона на цементе с 20 % миндобавки из молотого гранитного отсева на ~14...16 % превышает усадку бетона на бездобавочном цементе; при этом ее величина на ~70 % меньше, чем у бетона на песчанистом портландцементе с 20 % миндобавки в виде молотого природного (кварцевого) песка. Как следствие, у бетона на песчанистом цементе снижаются все исследованные показатели: прочность на сжатие (кубковая и призмная), при изгибе, упруго-деформативные и эксплуатационные свойства, включая его защитную способность по отношению к стальной арматуре.

Это позволяет сделать вывод о рациональности использования гранитного отсева в производстве вяжущего с миндобавкой цементными заводами Беларуси.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Волженский, А. В. Минеральные вяжущие вещества / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, В. С. Колокольников ; под ред. А. В. Волженского. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1979. – 476 с.
2. Волженский, А. В. Влияние дисперсности портландцемента и В/Ц на долговечность камня и бетона / А. В. Волженский // Бетон и железобетон. – 1990. – № 10. – С. 16–17.
3. Алексеев, С. Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне / С. Н. Алексеев. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1968. – 231 с.
4. Алексеев, С. Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде /

- С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. – М. : Стройиздат, 1976. – 205 с.
5. Рояк, С. М. Специальные цементы : учеб. пособие / С. М. Рояк, Г. С. Рояк. – М. : Стройиздат, 1969. – 279 с.
  6. Бетоны. Метод контроля коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне и защитных свойств бетона : СТБ 1168-99. – Взамен СТ СЭВ 4421-83 ; введ. РБ 01.01.00. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 1999. – 20 с.

*Статья поступила: 18.11.2019*

## REFERENCES

1. Volzhenskiy A. V., Burov Yu. S., Kolokolnikov V. S. *Mineralnyye vyazhushchiye veshchestva* [Mineral binders]. Moscow: Stroyizdat, 1979. 476 p. (rus)
2. Volzhenskiy A. V. *Concrete and reinforced concrete*. 1990. No. 10. pp. 16-17. (rus)
3. Alekseev S. N. *Korroziya i zashchita armatury v betone* [Corrosion and protection of reinforcement in concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1968. 231 p. (rus)
4. Alekseev S. N., Rosental N. K. *Korrozionnaya stoykost zhelezobetonnykh konstruksiy v agresivnoy promyshlennoy srede* [Corrosion resistance of reinforced concrete structures in an aggressive industrial environment]. Moscow: Stroyizdat, 1976. 205 p. (rus)
5. Royak S. M., Royak G. S. *Spetsialnyye tsementy: uchebnoye posobiye* [Special cements: textbook]. Moscow: Stroyizdat, 1969. 279 p. (rus)
6. *Betony. Metod kontrolya korrozionnogo sostoyaniya stalnoy armatury v betone i zashchitnykh svoystv betona* [Concrete. The method of monitoring the corrosion state of steel armature in concrete and the protective properties of concrete]: STB 1168-99. Introduced: 01.01.2000. Minsk: Ministry of architecture and construction of the Republic of Belarus, 1999. 20 p. (rus)

*Received: 18.11.2019*