













$$f_{ck.cube}=f_{cm}(1-1,64C_v), \quad (3)$$

где  $C_v$  – коэффициент вариации прочности бетона.

Затем определяют водоцементное отношение, необходимое для обеспечения требуемой удобоукладываемости бетонной смеси и прочности затвердевшего бетона:

$$B/\Pi=AR_{ц}/(f_{cm}+0,5AR_{ц}), \quad (4)$$

где  $R_{ц}$  – активность используемого цемента;  $A$  – коэффициент, значение которого принимается по нормам.

После определения требуемого водоцементного отношения определяют требуемый расход цемента на кубометр бетона для обеспечения необходимой прочности бетона:

$$\Pi=B:B/\Pi. \quad (5)$$

Необходимый расход воды ( $B$ ) на кубометр бетонной смеси рассчитывают по нормам в зависимости от требуемой удобоукладываемости бетонной смеси и максимальной крупности заполнителя.

Стандартами, минимальный класс бетона предусмотрен С8/10, поэтому проектировщики этот класс бетона и закладывают в проекты для конструкций, в которых высокая прочность не требуется. При обеспечении этого класса бетона средняя прочность на сжатие образца бетона в виде куба с размером ребра 150 мм ( $f_{cm}$ ) должна составлять 12,85 МПа. Для бетонной подготовки под перекрытие, устраиваемое по безопалубочной технологии, достаточно средней кубиковой прочности 5–7 МПа.

## 5. Результаты исследования прочности бетона и необходимого расхода цемента

Для решения поставленной в работе задачи был произведен расчет требуемого расхода цемента для нескольких видов тяжелого бетона на гранитном щебне фракции 20 мм (табл. 4).

Таблица 4

Расход цемента на кубометр бетона и его прочность

№ сост.	$f_{ck.cube}$ , МПа	$f_{cm}$ , МПа	$B/\Pi$	$\Pi$ , кг/м <sup>3</sup>	$K_{эф.ц}=10f_{cm}/\Pi$
$R_{ц}$ 30 МПа; ОК=5–7 см; $A=0,6$ ; $B=200$ дм <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>					
1	5	6,43	1,16	172,4	0,37
2	10	12,85	0,82	243,9	0,53
3	15	19,28	0,64	312,5	0,62
4	20	25,71	0,52	384,6	0,67
$R_{ц}$ 30 МПа; ОК=5–7 см; $A=0,6$ ; $B=180$ дм <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>					
5	5	6,43	1,16	155,2	0,41

6	10	12,85	0,82	219,5	0,59
7	15	19,28	0,64	281,2	0,69
8	20	25,71	0,52	346,1	0,74
$R_{ц}$ 40 МПа; ОК=5–7 см; $A=0,6$ ; $B=200 \text{ дм}^3/\text{м}^3$					
9	5	6,43	1,3	153,8	0,42
10	10	12,85	0,97	206,2	0,62
11	15	19,28	0,77	259,7	0,74
12	20	25,71	0,64	312,5	0,82
$R_{ц}$ 40 МПа; ОК=5–7 см; $A=0,6$ ; $B=180 \text{ дм}^3/\text{м}^3$					
13	5	6,43	1,3	138,5	0,46
14	10	12,85	0,97	185,6	0,69
15	15	19,28	0,77	233,8	0,82
16	20	25,71	0,64	281,2	0,91

В табл. 5 приведены результаты испытания образцов затвердевшего бетона.

Таблица 5

Составы бетона с наполнителем из отходов обогащения железных руд

№ со- става	Расход материалов на $\text{м}^3$ , кг						$f_{cm}$ , МПа	$K_{эф.п} = 10f_{cm}/Ц$
	Ц	Н	П	Щ	В	ПФС, %		
1	75	425	550	1175	180	0,5Ц+0,25Н	9,7	1,29
2	75	130	820	1200	180	0,5Ц+0,25Н	5,3	0,71
3	100	400	550	1175	180	0,5Ц+0,25Н	14,8	1,48
4	100	130	800	1200	180	0,5Ц+0,25Н	8,2	0,82
5	125	375	550	1175	180	0,5Ц+0,25Н	18,4	1,47
6	125	130	775	1200	180	0,5Ц+0,25Н	12,1	0,97
7	150	350	550	1175	180	0,5Ц+0,25Н	21,5	1,43
8	150	130	750	1200	180	0,5Ц+0,25Н	13,9	0,93
9	175	325	550	1175	180	0,5Ц+0,25Н	24,2	1,38
10	175	130	725	1200	180	0,5Ц+0,25Н	16,8	0,96

Примечания: Ц – цемент; Н – наполнитель (отходы обогащения железных руд); Щ – щебень; П – песок; В – вода

Часть составов бетона, приведенных в табл. 5, рассчитывали по требованиям норм, а часть с учетом полученных нами ранее закономерностей, соблюдая соотношение крупных, средних и мелких компонентов равном 52:23:25.

На рис. 1, 2 показаны зависимости коэффициента использования цемента от прочности бетона.



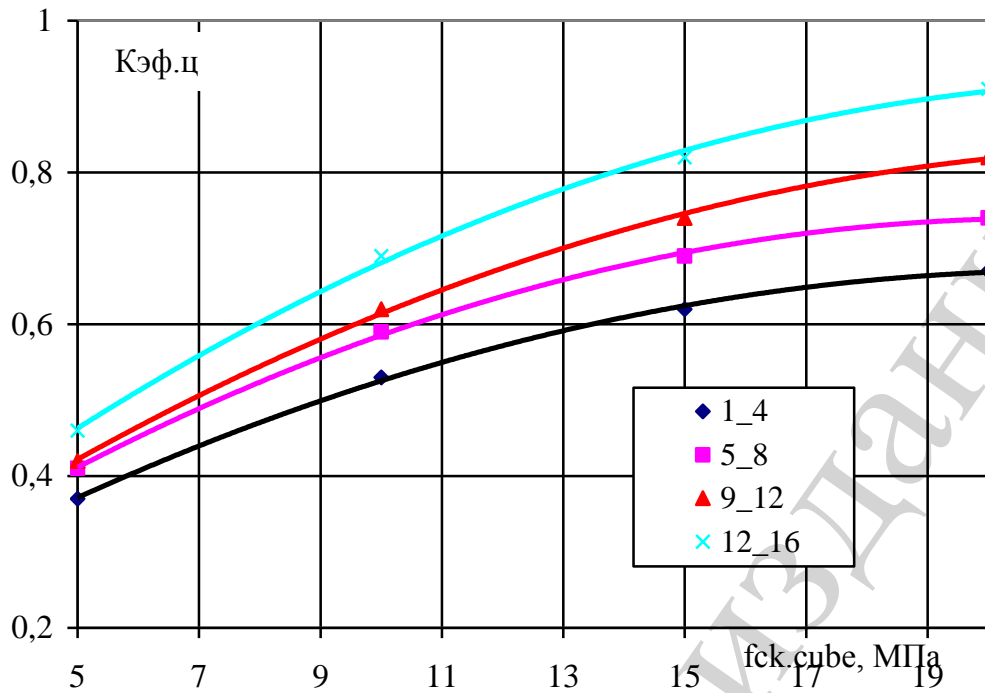


Рис. 1. Зависимость коэффициента использования цемента от прочности бетона: 1\_4 – составы бетона №1 – 4 по табл. 4; 5\_8 – составы бетона № 5 – 8 по табл. 4; 9\_12 – составы бетона № 9 – 12 по табл. 4; 12\_16 – составы бетона №12 – 16 по табл. 4.

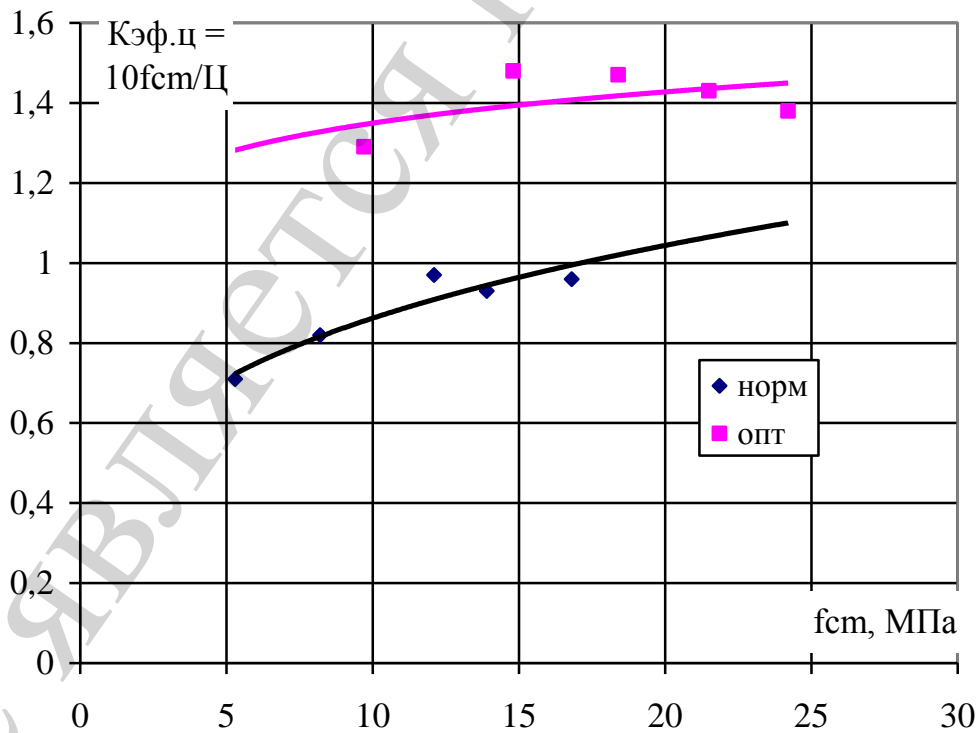


Рис. 2. Зависимость коэффициента использования цемента от прочности бетона

## 6. Обсуждение результатов исследований прочности бетона

Анализом результатов исследований, представленных в табл. 4, 5 и на рис. 1 и 2, установлены следующие закономерности.

При определении минимально необходимого расхода цемента для такого бетона по традиционным методикам (табл. 4) коэффициент эффективности использования цемента почти в два раза меньше чем для бетонов более высокой прочности.

Проведенными ранее исследованиями установлено, что причиной такого резкого снижения коэффициента эффективности использования цемента в бетонах низкой прочности, является нерациональный зерновой состав компонентов бетонной смеси [9]. Рациональным гранулометрическим составом компонентов, обеспечивающим пониженную дефектность структуры бетона, а, следовательно, и эффективное использование портландцемента, установлен состав с соотношением крупного, среднего и мелкого компонентов по массе 52:23:25 [9]. При отклонении от этого соотношения каждого из компонентов в пределах 2–3 частей эффективность использования цемента, выражаемая соответствующим коэффициентом, определяемом по формуле (1), практически не изменяется. Средний размер зерен крупных, средних и мелких компонентов должен составлять примерно 100:10:1 с возможным изменением в пределах 10–15 %.

Введение добавки-наполнителя из отходов обогащения железных руд, а также рационального количества пластифицирующей добавки обеспечивает существенное улучшение прочности затвердевшего бетона. А также, соответственно, и коэффициента эффективности использования цемента по сравнению с прогнозируемым, определяемым по требованиям норм (составы 1, 5, 9, 13 табл. 4 и составы 7–10 табл. 5). Введение рекомендуемого количества отходов обогащения железных руд в 1,4–1,8 раза повышает эффективность использования цемента по сравнению с составами, содержащими максимальное рекомендуемое количество по требованиям норм.

Для обеспечения получения бетона класса С8/10 по прочности при введении рекомендуемого нормами количества отходов обогащения железных руд  $130 \text{ кг/м}^3$  и рационального количества пластифицирующей добавки достаточно примерно  $125 \text{ кг/м}^3$  цемента (состав 6 табл. 5). Это значительно меньше, чем рассчитанное по требованиям норм количество такого же цемента (состав 10, 14 табл. 4) без отходов обогащения железных руд. Но бетон этого же класса по прочности можно получить с запасом прочности 15 % при расходе цемента  $100 \text{ кг/м}^3$  и введением  $400 \text{ кг/м}^3$  отходов обогащения железных руд, обеспечивая рациональный зерновой состав компонентов бетонной смеси.

Бетон прочностью около 10 МПа можно получить и при расходе цемента  $75 \text{ кг/м}^3$  бетонной смеси и  $425 \text{ кг/м}^3$  вторичных продуктов обогащения железных руд, обеспечивая рациональный гранулометрический состав компонентов бетонной смеси (состав 1 табл. 5).

Но при таком низком расходе цемента требуется очень тщательное перемешивание компонентов бетонной смеси, чтобы обеспечить равномерное распределение вяжущего.

Визуальными наблюдениями установлена хорошая однородность, связность, нерасслаиваемость и хорошее уплотнение смесей с рациональным зерновым составом компонентов (составы 1, 3, 5, 7, 9 табл. 5).

Бетоны с расходом цемента 300–450 килограммов и минеральными добавками до 130 килограммов на кубометр бетона, составы которых определяются по требованиям норм, практически отвечают определенным нами требованиям рационального зернового состава компонентов. Поэтому для обеспечения повышенного коэффициента эффективности использования цемента в бетонах низкой прочности необходимо целенаправленно обеспечивать определенный ранее рациональный зерновой состав компонентов 52:23:25.

При проектировании состава бетонной смеси с рациональным гранулометрическим составом компонентов к крупному заполнителю следует отнести зерна крупностью более 5 мм, к среднему – от 5 мм до 0,14 мм, а к мелкому – от 0,14 мм и менее. Следовательно, если в составе щебня фракций крупностью 5–0,14 мм 97–98 %, его можно отнести к крупной фракции. А из представленного в табл.1 фракционного состава песка 92 % следует отнести к средней фракции, а 8 % – к мелкой. В гранулометрическом составе отходов обогащения железных руд (табл. 5) около 90 % относятся к мелкой фракции (минеральным добавкам наполнителям), а около 10 % – к средней фракции. К мелкой фракции относится также весь цемент, зерна которого менее 0,1 мм (100мкм).

В составе кубического метра тяжелого бетона сухих компонентов 2200–2250 кг. Для определения расхода каждого из них из вышеприведенного условия обеспечения рационального гранулометрического состава компонентов примем их суммарный расход 2200 кг на кубометр бетонной смеси. Поскольку содержание мелких фракций в составе песка примерно такое же, как в отходах обогащения железных руд, можно содержание каждой составляющей определять по соотношению крупной средней и мелкой фракций равном 52:23:25 без учета поправок на содержание других фракций. Следовательно в проектируемых составах по нашей методике необходимо: щебня (Щ)  $\text{Щ} = 2200 \cdot 0,52 = 1144$  кг; песка (П)  $\text{П} = 2200 \cdot 0,23 = 506$  кг; цемента (Ц) и минеральной добавки из отходов обогащения железных руд (Д)  $\text{Ц} + \text{Д} = 2200 \cdot 0,25 = 550$  кг.

Результаты проведенных исследований позволяют сократить на 15-20 % расход цемента при производстве бетонов низкой прочности. Однако при этом следует учитывать изменчивость гранулометрического состава отходов обогащения железных руд. Это влечет за собой необходимость строгого контроля свойств указанных отходов и оперативную корректировку, при необходимости, составов бетона.

Результаты проведенных исследований позволяют увеличить использование отходов обогащения железных руд, что приведет к улучшению экологической обстановки в районах добычи и переработки железных руд. Областью применения результатов исследований, приведенных в данной работе, является монолитное возведение зданий и сооружений и, в первую очередь, для устройства бетонной подготовки под перекрытия при строительстве подземных паркингов по технологии «сверху-вниз».

Данные исследования являются частью многолетних исследований возможности и области применения отходов обогащения железных руд в производстве строительных материалов и поиска путей сокращения расхода цемента при производстве бетонов.

Результаты данных исследования могут быть основой для совершенствования рациональных составов бетонов путем применения гиперпластификаторов, мицеллярного катализа и других современных решений в области строительного материаловедения.

## 7. Выводы

1. Определена степень влияния гранулометрического состава компонентов низкопрочного бетона на его прочность. Подтверждено, что оптимальным является состав заполнителя с соотношением крупного, среднего и мелкого компонентов по массе 52:23:25.

2. Определена степень влияния количества отходов обогащения железных руд на прочность низкопрочных бетонов, которая обеспечивает повышение коэффициента использования цемента в данных бетонах в 1,4 раза до уровня высокопрочных.

## Литература

1. Вильман Ю. А. Технология строительных процессов и возведения зданий, современные и прогрессивные методы. Москва, 2014. 336 с.
2. Вандоловский А. Г., Чайка В. М. Міцнісні властивості особливодрібнозернистого бетону на відходах гірничо-збагачувальних комбінатів у ролі заповнювача // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. 2016. № 160. С. 17–24.
3. Шишкин А. А., Шишкина А. А., Щерба В. В. Особенности использование отходов горно-обогатительных комбинатов в производстве строительных материалов // Вісник ДНАБА. 2013. № 1. С. 8–12.
4. Ashok P., Sureshkumar M. P. Experimental Studies on Concrete Utilising Red Mud as a Partial Replacement of Cement With Hydrated Lime // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). 2013. P. 1–10.
5. Исследование возможности использования отходов флотации железных руд для получения смешанных цементов / Шаповалов Н. А., Загороднюк Л. Х., Тикунова И. В., Щекина А. Ю., Ширяев О. И., Крайний А. А. и др. // Фундаментальные исследования. 2013. № 10. С. 1718–1723.
6. Порошковые бетоны с применением техногенного сырья / Толстой А., Лесовик В., Задорожний Л., Ковалева И. // Вестник МГСУ. 2015. № 11. С. 101–109. doi: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2015.11.101-109>
7. Erdem T. K., Kırca Ö. Use of binary and ternary blends in high strength concrete // Construction and Building Materials. 2008. Vol. 22, Issue 7. P. 1477–1483. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.026>
8. Swamy R. N., Sakai M., Nakamura N. Role of Superplasticizers and Slag for Producing High Performance Concrete // The Fourth CANMET/ACI International Conf. on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete: ACI SP-148-1. Proceedings. Detroit (USA), 2006. P. 1–26.

9. Shetty K. K., Nayak G., Vijayan V. Effect of red mud and iron ore tailings on the strength of self-compacting concrete // European Scientific Journal. 2014. Vol. 10, Issue 21. P. 168–176

10. Shishkin A., Netesa M., Scherba V. Effect of the iron-containing filler on the strength of concrete // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5, Issue 6 (89). P. 11–16. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109977>

11. Shishkina A., Shishkin A. Research into effect of complex nanomodifiers on the strength of fine-grained concrete // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 2, Issue 6 (92). P. 29–33. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127261>

Не является переизданием