

**М. А. ДЖУСУПОВА**  
КГУСТА ИМ. Н.ИСАНОВА,  
БИШКЕК, КЫРГЫЗСКАЯ  
РЕСПУБЛИКА  
E-MAIL: DZMAHAVAT@GMAIL.RU

**М. А. DZHUSUPOVA**  
KSUCTA N. A. N. ISANOV,  
BISHKEK, KYRGYZ REPUBLIC

**ТАЛАНТБЕК К.А.**  
КГУСТА ИМ. Н.ИСАНОВА,  
БИШКЕК, КЫРГЫЗСКАЯ  
РЕСПУБЛИКА  
E-MAIL: [AYDAY-  
TALANTBEKOVA@MAIL.RU](mailto:AYDAY-TALANTBEKOVA@MAIL.RU)  
**TALANTBEK KYZY AIDAI**  
KSUCTA N. A. N. ISANOV,  
BISHKEK, KYRGYZ REPUBLIC

*E.mail. [ksucta@elcat.kg](mailto:ksucta@elcat.kg)*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЗЕРНОВЫХ СОСТАВОВ БЕТОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

## OPTIMIZATION OF GRAIN COMPOSITION OF CONCRETES USING COMPUTER SIMULATIONS

*Макала бетон материалдардын толтургуч оптималдуу гранулометрдик курамын компьютердик моделдөөнү пайдаланып иштеп чыгууга арналган. Иште кум менен шагылдын оптималдуу гранулометрдик курамы эсептелген жана эксперимент жүзүндө текшерилген. Тажрыйбалык жана заводдук (контролдук) курамдарды изилдөөлөрдүн натыйжасында толтургучтун жыштыгын көбөйтүү менен, мурдагыдай эле өлчөмдөгү цементти колдонуп, бетондун бышыктыгы 30-40% га жогорулаган.*

**Чечүүчү сөздөр:** бетон, цемент, гранулометрия, оптималдаштыруу, ПФМ-НЛК кошкон кошумча, компьютердик моделдөө.

*Статья посвящена разработке оптимального гранулометрического состава заполнителей для бетонных изделий с использованием компьютерного моделирования. В работе рассчитан и экспериментально проверен оптимальный гранулометрический состав песка и щебня. Результаты исследований показали увеличение прочности бетона на 30-40% за счет достижения наименьшей межзерновой пустотности заполнителей при одинаковом расходе цемента в опытных и заводских (контрольных) составах.*

**Ключевые слова:** бетон, цемент, заполнитель, гранулометрия, оптимизация, компьютерное моделирование.

*The article is devoted to the development of optimal particle size distribution of aggregates for concrete products using computer simulation. The optimal granulometric composition of sand and gravel is calculated and experimentally tested. The results of the research showed an increase in the strength of concrete by 30-40% due to the achievement of the lowest intergranular emptiness of the aggregates with the same cement consumption in experimental and factory (control)*



compositions.

**Key words:** concrete, cement, aggregate granulometry, optimization, additive PFM-NLK, computer simulation.

Из всего многообразия строительных композиционных материалов самым динамичным является рынок потребления бетонов на основе различных видов вяжущего. Повышение качества конструкций и изделий из бетонов, снижение их стоимости наряду с другими методами достигается способами подбора составов бетонов. Целью подбора составов бетонов является установление таких соотношений между компонентами, которые обеспечивают получение материала со всеми нормируемыми показателями качества при минимальном расходе цемента. Для достижения этой цели необходимо проведение оптимизационных исследований.

Расчет состава бетона по известным методам требует проверки и корректировки по результатам проведенных опытных экспериментов, что предполагает выполнение достаточно трудоемких экспериментальных исследований. Как правило, строительные лаборатории на предприятиях стройиндустрии проводят исследования и дают рекомендации по оптимальным составам бетона с учетом накопившегося опыта производства. На практике из одних и тех же материалов обычно приходится готовить бетоны различных классов с разной консистенцией бетонной смеси.

Исследователями как у нас в стране, так и за рубежом при оптимизации бетонов на основе опытных работ варьируются виды и объемное содержание их компонентов. С целью оптимизации составов при разработке плана эксперимента практикуется использование компьютерного моделирования.

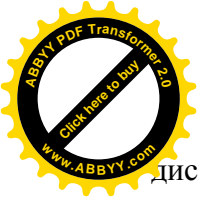
Неотъемлемой частью исследований по разработке рациональных составов композиционных материалов является оптимизация гранулометрического состава заполнителя, которая является основными характеристиками зернистого сырья [3,4].

Получение материала с наименьшей межзерновой пустотностью гарантирует повышение его эксплуатационных характеристик. Заполнители и наполнители, нанодисперсные модификаторы являются компонентами, формирующими объемную структуру бетона и оказывает значительное влияние на соотношение исходных компонентов бетонной смеси. Это позволяет сократить расход цемента, увеличивает прочность и модуль деформации бетона, уменьшает деформацию конструкций под нагрузкой, ползучесть бетона, определяет реологические свойства бетона [1,7].

Эффективность гранулометрического состава зернистого компонента в композиционных материалах предусматривает обеспечение наибольшей плотности упаковки его частиц, требуемой удельной поверхности при необходимом числе фракций в полидисперсной смеси и заданной подвижности формулой массы. Гранулометрический состав определяет, прежде всего, насыпную плотность и плотность упаковки частиц в смеси и является основной характеристикой зернистого сырья грубой, средней и тонкой дисперсности. А количество вяжущего определяется объемом межзерновых пустот и удельной поверхностью заполнителя. Если удельная поверхность увеличивается (с уменьшением) размера зерен, то плотность их упаковки (относительный объем межзерновых пустот) зависит от соотношения средних размеров зерен фракционированного зернистого сырья и количества каждой фракции в смеси. Плотность упаковки зерен в смеси определяет эффективность зернового сырья рядом технико-экономических показателей строительных конгломератов. Поэтому характеристики зернистого сырья должны быть оптимизированы в соответствии с требуемой прочностью, видом и содержанием вяжущего, формируемостью (реологией) композиционного материала.

*Целью данной работы* является оптимизация зернового состава заполнителей для обеспечения требуемой прочности бетона.

Высокую плотность упаковки в смеси можно получить для заполнителей грубой



дисперсности (щебень, песок, отсев дробления горных пород) в производстве бетона. Если гранулометрический состав рационально подобран с учетом плотности, вида материала или изделия, то удельная поверхность должна быть достаточно высокой для протекания физико-химических процессов в твердо- и жидкофазных системах. Топологические свойства композиций вытекают из распределения его зерен в смеси: плотность упаковки, фазо-топологическое состояние, подвижность, расход твердой фазы и др. [3].

При проведении экспериментов использовалась ускоренная методика расчета оптимального гранулометрического состава заполнителей для бетона по уравнению «идеальных» кривых распределения частиц по объему – формулы Функа/Дингера, Болемея [1,2]. Расчет оптимального соотношения крупного и мелкого заполнителей производился с помощью специальной компьютерной программы [6]. Достоинством данного метода расчета являются: быстрота выполнения вычислительных операций и проверки условия оптимальности, а также возможность нахождения «наилучшего» решения из комбинации возможных, путем автоматического уменьшения погрешности при достижении заданного количества возможных решений.

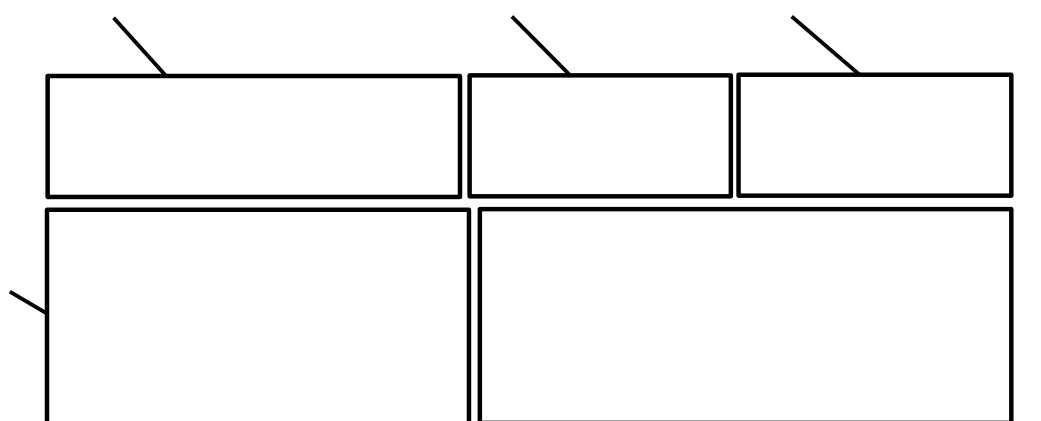
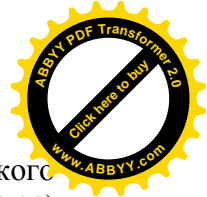
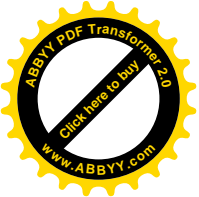


Рис. 1.1 – Исходный зерновой состав смеси; 2 – эталонный зерновой состав; 3 – окончательный зерновой состав смеси; 4 – гранулометрический график; 5 – блок регулировки содержания корректирующих фракций

В процессе проектирования рассчитывается гранулометрический состав смеси, имеющий максимальное приближение к эталонной кривой, но поскольку результирующий состав определяется гранулометрией исходных компонентов, расхождение расчетной кривой и эталонной не всегда сводится к нулю, поэтому в работе применялся программа модуля корректировки зернового состава (рис. 1), позволяющий корректировать компоненты – «узких» фракций материала.

Данный модуль позволяет пересчитать зерновой состав проектируемой смеси с учетом добавления «недостающих» фракций в объемном и массовом соотношении. Программный комплекс позволяет рассчитать эквивалентные зерновые составы исходных компонентов и итоговой смеси, аппроксимируя форму зерен материала идеальными сферами. Данная функция позволяет приблизительно оценить вероятную плотность упаковки выделенных в системе сферофракций, а также их удельную поверхность. Расчет количества эквивалентных сферофракций производится автоматически до того момента, пока дифференциальные гранулометрические графики исходного состава и эквивалентного полностью не совпадут.

Методика и программа оптимизации была реализована при оптимизации гранулометрического состава заполнителей для заводских бетонов (контрольных) М350 В25 (ЗАО ЖБИ «Кум-Шагыл»).



В исследованиях использовались заводские составы бетонов: в качестве мелкого заполнителя используется смесь песков Чуйского (М<sub>к</sub>-2,8) и Аламединского (М<sub>к</sub>-3,39) месторождений в соотношении 50:50.

В качестве исходных материалов использованы пески с модулями крупности: 2,8 и 3,39, щебень фракции 5-20, портландцемент М400 Д20 ГОСТ 10178-85, 30515-97 и добавка ПФМ-НЛК (Полифункциональный модификатор) ГОСТ 24211-08.

Испытания проводились в лаборатории завода ЖБИ «Кум-Шагыл». Количество воды в составах подбиралось по минимальной требуемой осадке конуса 10 см. Гранулометрический состав крупного и мелкого заполнителей подбирался путем смешивания «узких» фракций при одном и соответствующем расходе цемента. Для каждой пробы определялась подвижность (осадка конуса) по ГОСТ 10181-2014 опыт №1 ОК-8,6, опыт №2 ОК-10 и плотность бетонной смеси по ГОСТ 10181-2014 опыт №1  $\rho=2476$ , опыт №2  $\rho=2442$  и изготовлены опытные контрольные образцы-кубы с ребром 100 мм. Условия хранения и твердения образцов – в камере нормального твердения при температуре  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  и влажности не менее 95 %.

Образцы бетона в 7 и 28 суточном возрасте испытывались по ГОСТ 10180-2012.

Рассчитанный оптимальный зерновой состав песка и щебня, отвечающий требованию минимальной пустотности по уравнению «идеальных» гранулометрических кривых – Функа-Дингера с коэффициентами  $\alpha=0$  и  $n=0,5$  представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Зерновые составы смесей заполнителей (полные проходы в процентах через сита указанных размеров)

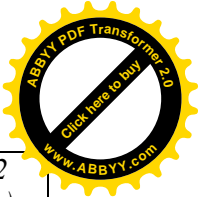
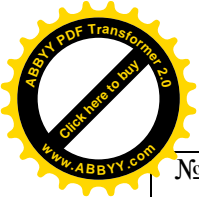
№ смеси	Размеры отверстий сит, мм									Уравнение	Соотношение П <sub>ч</sub> :П <sub>а</sub> :Щ
	25	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14		
<i>а) Смеси на песке Чу+Аламединский 50:50% (контрольный образец)</i>											
1	100	88,59	60,27	40,25	27,09	16,08	9,07	4,04	0	-	20:20:60
<i>б) Смеси на песке Чу (Опыт №1)</i>											
2	100	93,39	47,62	39,3	33,76	30,27	20,18	3,1	0,39	Функ	41,25:58,75
<i>в) Смеси на песке Аламединском (Опыт №2)</i>											
3	100	94,1	53,24	45,81	29,05	24,05	13,61	5,44	0,68	Функ	47,25:52,75

Установлено, что оптимальное соотношение П:Щ в зерновых составах смеси заполнителей, соответствующие экспериментально определенным экстремумам насыпной плотности, т.е. наибольшей плотности упаковки их зерен составили: «Аламединский песок + Щебень фр. «5-20»(П:Щ) - 47,25:52,75 при меньшем содержании цемента 33 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона.

Оптимальный гранулометрический состав с использованием только песка Чу (Опыт №1) позволяет получить проектную прочность бетона при меньшем содержании цемента на 51 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона. Рецепт сырьевых материалов на 1 м<sup>3</sup> и результаты испытаний бетона представлена в таблице 2. Изменение прочности в 7 и 28 сут. возрасте показаны на рисунке 2 и 3.

Таблица 2 - Расход сырьевых материалов на 1 м<sup>3</sup> и результаты испытаний бетона

№	Наименование материала	Контрольный образец	Опыт №1(Чу)	Опыт №2 (Аламедин)
1	Щебень фр.5-20	1060	1069	982
2	Песок М <sub>к</sub> -2,8 (Чуйский)	325	758	-
3	Песок М <sub>к</sub> -3,39 (Аламединский)	325	-	806
4	Портландцемент М400 Д20	500	449	467
5	Добавка ПФМ-НЛК	5	-	5
6	Вода	200	199	186



№	Наименование материала	Контрольный образец	Опыт №1 (Чу)	Опыт №2 (Аламедин)
7	Прочность 7 суток твердения, МПа	22	21,8	30,12
8	Прочность 28 суток твердения, МПа	30,2	29,93	40,1
9	Изменение прочности в 7 сут. возрасте, %	-	-	36
10	Изменение прочности в 28сут. возрасте,%	-	-	45



Рис.2. Прочность 7 суток твердения

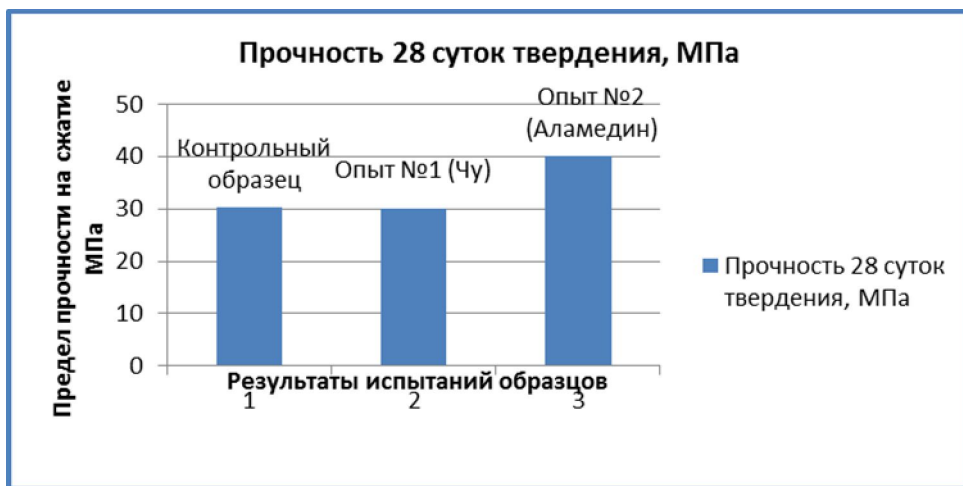


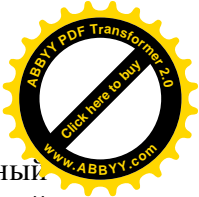
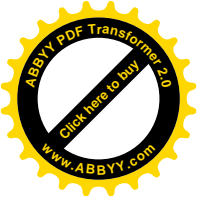
Рис.3. Прочность 28 суток твердения

Выводы: Оптимизация гранулометрического состава крупного и мелкого заполнителя с использованием компьютерной программы позволила в кратчайшие сроки скорректировать заводские составы бетона М350 В25 (ЗАО ЖБИ «Кум-Шагыл»).

- при использовании смеси заполнителей оптимального гранулометрического состава на песке Чу (Опыт №1) обеспечивается проектная прочность бетона М350 В25 при пониженном содержании цемента на 51 кг на 1 м<sup>3</sup>.

- при использовании смеси заполнителей оптимального гранулометрического состава (П:Щ) - 47,25:52,75 на песке Аламедин прочность при сжатии образцов бетона в 7 суточном возрасте составляет 31,48 МПа, что на 36% выше заводского и при меньшем количестве цемента на 33 кг на 1 м<sup>3</sup>.

- при использовании смеси заполнителей оптимального гранулометрического состава (П:Щ) - 47,25:52,75 на песке Аламедин прочность при сжатии образцов бетона в 28 суточном возрасте составляет 40,1 МПа, что на 45 % выше заводского и при меньшем количестве цемента на 33 кг на 1 м<sup>3</sup>.



Таким образом, экспериментально установлено, что рассчитанный оптимальный гранулометрический состав смеси, имеющий максимальное приближение к эталонной кривой показывает положительные результаты по физико-механическим характеристикам бетона и позволяет значительно сократить расход дефицитного компонента цемента.

### Список литературы

1. Мамыркулов М.И. Математическое моделирование структуры пористых материалов » [Текст] / М.И. Мамыркулов и др. // Популярное бетоноведение. - 2008. - № 4. - С. 77–78.
2. Хархардин А.Н. Технологические свойства зернистых композиций. Ресурсосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций [Текст]: Тез. докл. XII научн. Чтений // БТИСМ – Белгород: 1993. - ч.2. - с.17-18.
3. Хархардин А.Н. Способы оптимизации гранулометрического состава зернистого сырья » [Текст] // Строительные материалы. - 1994. - №11. - с.24-25.
4. Образцов И.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010617267 «Подбор оптимальной гранулометрии заполнителя строительного композита» от 29.10.2010 г.)
5. Соломатов В.И. Строительные биотехнологии и биоконпоизты [Текст]: монография / В.И. Соломатов, В.Д. Черкасов, В.Т. Ерофеев. – М.: Изд-во Московский государственный университет путей сообщения, 1998. – 165 с.