

## FEATURES OF CHOOSING THE OPTIMAL CONFIGURATION OF THE RIBBED DOME

*T.R. Barskaya, S.A. Sokolov, A.S. Dvuzhilov*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article discusses the calculation and design of dome structures, as well as the choice of optimal geometric parameters of the dome depending on the height of the boom and the degree of the sector of the ribs of the structure. The conclusions of the conducted research are presented.

**Keywords:** dome, coating, metal structures, optimal parameters.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*BARKAYA Temur Raufovich* – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

*SOKOLOV Sergey Aleksandrovich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sokolov\_project@mail.ru

*DVUZHILOV Anton Sergeyevich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Resistance, Elasticity and Plasticity Theory, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: anton\_in\_tver@mail.ru

### CITATION FOR AN ARTICLE

Barkaya T.R., Sokolov S.A., Dvuzhilov A.S. Features of choosing the optimal configuration of the ribbed dome // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 5–12.

УДК 691.517

## ПОДБОР ОПТИМАЛЬНОГО ЗЕРНОВОГО СОСТАВА ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДОРОЖНОГО БЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*В.В. Белов, М.А. Смирнов*  
*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Белов В.В., Смирнов М.А., 2025

**Аннотация.** Трудносовместимые требования по высокой пластичности бетонной смеси и высоким эксплуатационным показателям дорожного бетона можно выполнить только на основе научных принципов формирования структуры бетонной матрицы с максимально плотной упаковкой зерен заполнителя, причем с непрерывной гранулометрией, и применением комплекса добавок (микронаполнителей и химических добавок с пластифицирующим и воздухововлекающим (для создания резервной пористости)

действием). Для решения задачи формирования структуры бетонной матрицы с максимально плотной упаковкой зерен заполнителя применялись запатентованные методики и компьютерные программы, разработанные на кафедре производства строительных изделий и конструкций (ПСК) ТвГТУ.

**Ключевые слова:** армирование на микроуровне, оптимальная гранулометрия, наиплотнейшая упаковка частиц, программное моделирование упаковок.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-12-17**

Для получения дорожного бетона с повышенной трещиностойкостью и прочностью необходимо создать особо плотную, монолитную структуру [1, 2]. Этого можно достигнуть при выполнении ряда условий, вытекающих из физических основ структурообразования бетона [3]:

- 1) применении оптимального количества высокопрочных цемента и дисперсных наполнителей;
- 2) рациональной гранулометрии и образовании микропластических зон;
- 3) предельно низком В/Ц соотношении;
- 4) высоком уровне заполнения внутренних пор в монолите;
- 5) особо тщательном перемешивании и уплотнении бетонной смеси;
- 6) создании наиболее благоприятных условий твердения бетона (уход).

Роль модифицирующих добавок и методы их введения описаны в источниках [4, 5]. Процессы структурирования и различные теории твердения бетона приведены в источниках [6–8].

Целью данной работы являлась разработка оптимального состава дорожного бетона с достаточно высокими качественными показателями (БСТ В25 В<sub>тб</sub>3,6 W8 F<sub>200</sub> П4), включающего несколько преимущественно местных видов мелкого и крупного заполнителя. При этом в работе ориентировались на применение двух песков с разной крупностью для получения наиболее благоприятной непрерывной гранулометрии: песка Торжокского крупного и песка Старицкого среднего.

В качестве крупного заполнителя были задействованы щебень из гравия фракции 5–20 мм Борисовского месторождения и щебень гранитный месторождения «Большой массив».

В составе бетона использовались дисперсная минеральная добавка (минеральный порошок МП-2) и добавка для бетонов и строительных растворов полифункционального действия «ПФМ-НЛК» (в форме порошка) ООО «Полипласт Новомосковск».

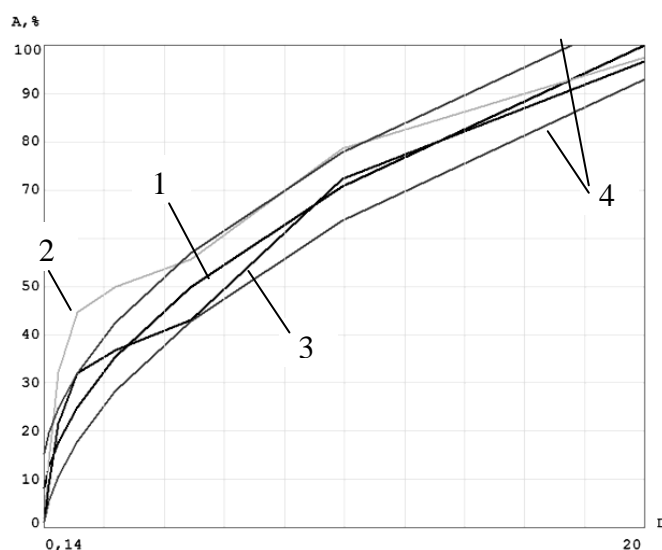
Определение оптимальных зерновых составов смесей заполнителей производилось расчетно-экспериментальным способом. Предварительный расчет оптимальных пропорций компонентов смесей заполнителей производился с помощью разработанной на кафедре ПСК ТвГТУ и запатентованной компьютерной программы (Патент РФ № 2010617267), позволяющей оптимизировать гранулометрический состав зерновой смеси, включающей до ста исходных компонентов с экспериментально определенными заранее зерновыми составами. Метод характеризуется алгоритмом автоматического поиска наилучшего решения, позволяющим уменьшать погрешность вычислений при достижении  $n$ -го числа удовлетворительных решений. В математическую основу расчета положено уравнение эталонной кривой Фуллера, которое наиболее точно описывает реальную дисперсную систему с наиболее плотной упаковкой зерен.

Для иллюстрации использования данной компьютерной программы ниже приведены в виде графиков соответствующих гранулометрических составов расчеты

смесей щебня гранитного, песка Старицкого среднего и песка Торжокского крупного (рисунок). Скорректированный состав смеси в массовых долях, %, (оптимальная рецептура, отвечающая минимальному расхождению грансостава смеси с эталоном) оказался равным соответственно: 58,21; 20,53; 21,26.

После компьютерного расчета в диапазоне оптимальных пропорций производилась экспериментальная проверка данного состава путем смешивания сухих компонентов и определения насыпной плотности смесей. По максимуму насыпной плотности судили о наиболее плотной упаковке зерен заполнителя. В основном результаты экспериментальной проверки были близки к расчетным данным. Некоторые отклонения оптимальных пропорций компонентов связаны с отличиями реальной формы зерен заполнителя от шарообразной, положенной в основу компьютерной программы. Поэтому в дальнейших расчетах составов бетона использовались экспериментально уточненные пропорции компонентов.

Ориентировочный состав бетона, рассчитанный по известным методикам, проверялся в лаборатории на опытных замесах объемом 10 дм<sup>3</sup>. Для этого тщательно перемешивали цемент с сухими навесками песков, минерального порошка и щебня. Растворяли требуемое количество пластификатора в воде затворения и окончательно перемешивали смесь в лабораторном смесителе в течение 3 мин. Затем определяли осадку конуса, которая должна быть в пределах 16–20 см, и в случае необходимости корректировали количество воды и одновременно цемента (с сохранением В/Ц) для получения нужной подвижности. Затем смесь укладывали в предварительно взвешенные формы 10 × 10 × 10 см со штыкованием, после чего их опять взвешивали для определения плотности смеси и фактического расхода компонентов. По такой же методике изготавливали еще два дополнительных состава бетона с варьированием В/Ц  $\pm 0,05$ .



Графики гранулометрических составов смесей щебня гранитного, песка Старицкого среднего и песка Торжокского крупного: 1 – эталонный по Фуллеру; 2 – исходный для расчета (соответственно 45, 35 и 20 %); 3 – скорректированный, или оптимальный (соответственно 58,21; 20,53; 21,26 %); 4 – границы заданного интервала отклонений от эталонной кривой (7,07 %)

Из указанных смесей формовали образцы бетона в виде кубов с ребром 100 мм для определения плотности, предела прочности на сжатие и водопоглощения.

С целью ускорения процедур подбора предварительных составов бетона образцы для определения свойств пропаривали по режиму 2 ч (подъем температуры) + 8 ч (выдержка при постоянной температуре  $65 \pm 5$  °С) + остывание. Данные режимы твердения практически через сутки позволяют судить о 70%-й прочности бетона в нормативном возрасте (28 сут) и структурных характеристиках (водопоглощении, открытой и закрытой пористости), связанных с важнейшими эксплуатационными параметрами, такими как морозостойкость и водонепроницаемость.

Для определения плотности образцов в сухом состоянии определяли их влажность по фрагментам после их разрушения экспресс-методом на приборе «Элвиз».

В таблице приведены данные по прочности на сжатие и растяжение при изгибе, а также структурным характеристикам бетона и подвижности бетонной смеси для предварительных составов бетона на основе гранитного и Борисовского щебня.

Данные таблицы показывают требуемые прочностные показатели этих составов с учетом 70%-ой марочной прочности при ускоренном твердении, а также благоприятные структурные характеристики (отношение закрытой пористости к открытой для них составляет около 20 %, чего с двукратным запасом достаточно для размещения замерзающей воды в замкнутых порах). Указанная резервная пористость гарантирует необходимые эксплуатационные показатели данных бетонов.

Пределы прочности на сжатие и растяжение при изгибе,  
а также структурные характеристики составов бетона на основе гранитного  
и Борисовского щебня

Вид крупного заполнителя	Осадка конуса, см	Плотность затвердевшего бетона в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности на сжатие $R_{сж}$ , МПа	Предел прочности при изгибе $R_{изг}$ , МПа	Водопоглощение, %	Отношение закрытой пористости к открытой, %
Щебень гранитный	19	2 198	35,1	4,45	6,09	29,6
Щебень Борисовский	17	2 219	43,7	4,05	6,06	19,0

Результаты испытаний контрольных образцов бетона из опытных замесов, полученных в полупроизводственных условиях, показали, что цель данной работы – разработка оптимальных составов бетонной смеси БСТ В25 В<sub>тб</sub>3,6 П4 F<sub>200</sub> W8 на основе двух видов щебня для изготовления дорожного бетона – выполнена. При этом проектные классы бетона по прочности на сжатие превышены на три ступени для бетона на основе гранитного щебня и на пять ступеней для бетона на основе Борисовского щебня. Превышение показателей достигнуто и для прочности на растяжение при изгибе. Это оказалось следствием того, что наиболее критичными параметрами бетона являются требования по морозостойкости и водонепроницаемости, и именно они лимитируют составы бетона.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкода Г.Г. Оценка влияния некоторых структурообразующих параметров на прочность сталефибробетона при сжатии // *Технологии бетонов*. 2011. № 3-4 (56-57). С. 27–29.
2. Усиков С.А. Некоторые тенденции в технологии высокопрочных бетонов. *Международный студенческий строительный форум: Сборник докладов в 2 томах*. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. Т. 2. С. 329–334.
3. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л., Гарницкий Ю.В. Расчет состава дорожного цементного бетона с нормированными прочностью и морозостойкостью // *Технологии бетонов*. 2013. № 1 (78). С. 26–29.
4. Савельев А.А., Тарасова А.Ю. Роль модифицирующих волокон в формировании структуры цементного камня // *Технологии бетонов*. 2011. № 11-12 (64-65). С. 50–51.
5. Гусев Б.В., Минсадров И.Н., Мироевский П.В., Трутнев Н.С. Исследование процессов наноструктурирования в мелкозернистых бетонах с добавкой наночастиц диоксида кремния // *Нанотехнологии в строительстве*. 2009. Т. 1. № 3. С. 8–14.
6. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Развитие теории проектирования составов цементного бетона. Часть 1 // *Технологии бетонов*. 2011. № 11-12 (64-65). С. 64–67.
7. Пшеничный Г.Н. О «стадийности» твердения и деструкции цементных систем // *Технологии бетонов*. 2012. № 3-4 (68-69). С. 55–59.
8. Пшеничный Г.Н. Скачкообразность твердения и деструкция цементных бетонов // *Технологии бетонов*. 2011. № 1-2 (54-55). С. 37–42.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*БЕЛОВ Владимир Владимирович* – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

*СМИРНОВ Матвей Александрович* – кандидат технических наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В., Смирнов М.А. Подбор оптимального зернового состава заполнителей дорожного бетона с использованием компьютерного моделирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 4 (28). С. 12–17.

**SELECTION OF OPTIMAL GRAIN COMPOSITION  
OF ROAD CONCRETE AGGREGATES  
USING COMPUTER SIMULATION**

**V.V. Belov, M.A. Smirnov**  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The difficult-to-reconcile requirements of high plasticity of concrete mixes and high performance of road concrete can only be met by applying scientific principles of forming a concrete matrix structure with the highest possible aggregate grain density, with continuous granulometry, and the use of a complex of additives (microfillers and chemical additives with plasticizing and air-entraining properties (to create reserve porosity)). To achieve this goal of forming a concrete matrix structure with the highest possible aggregate grain density, patented methods and computer programs developed at the Department of Production of Building Materials and Structures (PBS) TvGTU were used.

**Keywords:** micro level reinforcement, optimal granulometry, tightest particle packing, software package modeling

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*BELOV Vladimir Vladimirovich* – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

*SMIRNOV Matvey Alexandrovich* – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Belov V.V., Smirnov M.A. Selection of optimal grain composition of road concrete aggregates using computer simulation // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 12–17.

**УДК 691.328**

**РАЗРАБОТКА САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ БЕТОНА**

**Ю.Ю. Курятников**  
*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Курятников Ю.Ю., 2025

**Аннотация.** Решение проблемы возникновения трещин в железобетоне возможно при использовании для изготовления изделий и конструкций самовосстанавливающегося бетона. Рассмотрена возможность применения и регулирования аутогенного механизма