

## АНАЛИЗ УПАКОВКИ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В КОМПОЗИТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Королев Л.В., Лупанов А.П., Придатко Ю.М.

*Ярославский государственный технический университет*

Подробная информация об авторах размещена на сайте

«Учёные России» - <http://www.famous-scientists.ru>

**В работе обсуждаются результаты расчета по модели твердых сфер зерновых составов заполнителей для асфальтобетона и цементбетона, проводится их сравнение с имеющимися нормативами. Полученные данные позволяют сделать вывод о целесообразности использования прерывистых зерновых составов для получения высокоплотных заполнителей.**

Для нахождения зернового состава заполнителя композиционного материала, имеющего наибольшую плотность упаковки частиц, нами был предложен следующий подход. Представляя зерна заполнителя в виде твердых полидисперсных сфер, моделируем структуру материала путем последовательной укладки частиц разных радиусов. Сначала в заданный объем максимально плотно укладываем сферы радиуса  $r_0 = r_{max}$ . Затем промежутки между ними заполняем сферами  $r_1 < r_0$  с таким расчетом, чтобы в каждый промежу-

ток между сферами  $r_0$  входила не одна, а несколько частиц  $r_1$ . Вновь образовавшиеся полости таким же образом заполняем сферами  $r_2 < r_1$  и т. д., пока размер сфер не достигнет  $r_{min}$ . Для такой модели получено выражение для объемной плотности (доли пространства, занимаемого частицами)  $\phi_n$  при последовательном  $n$ -кратном заполнении объема:

$$\phi_n = \phi_0 \left( 1 + \sum_{k=1}^n (1 - \phi_0)^k \mu(r_k / r_{k-1}) \right) \quad (1)$$

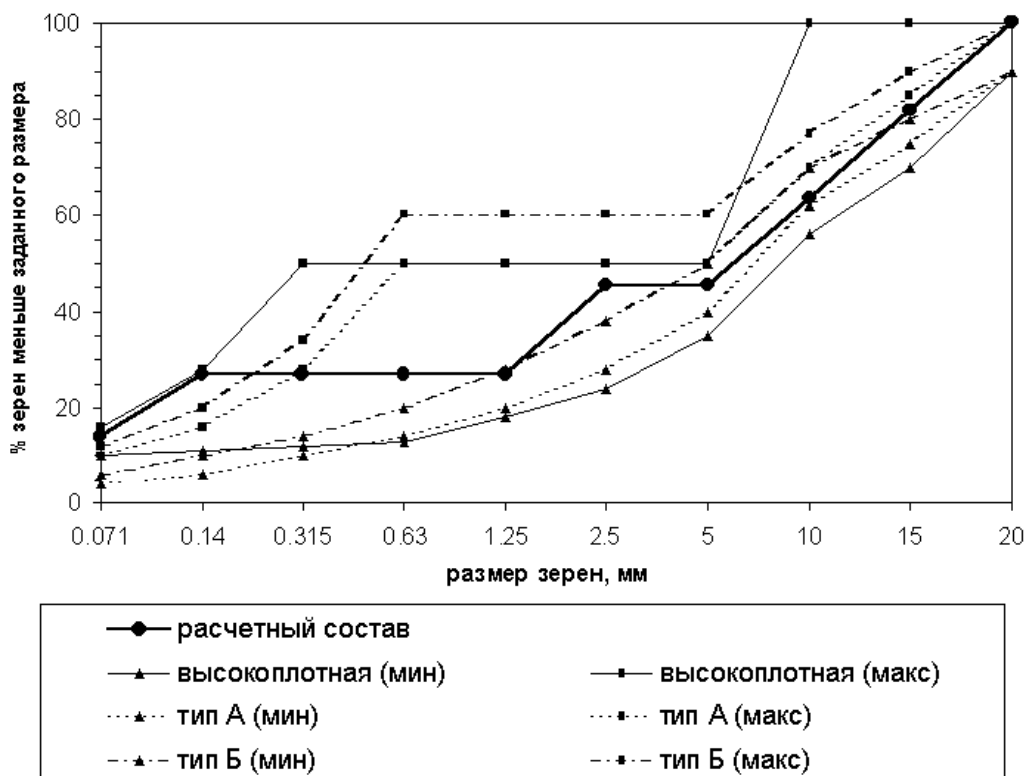
где  $\phi_0$  - плотность укладки сфер максимального радиуса,  $\mu(x)$  - поправочный коэффициент, определяемый путем численных экспериментов по плотной укладке частиц двух различных радиусов, и учитывающий тот факт, что не весь объем пустот между сферами доступен для заполнения,  $x$  - отношение радиусов сфер на  $k$ -ом этапе заполнения  $r_k$  и предшествующем  $r_{k-1}$ . Формула (1) позволяет оценить объемную плотность композиционного материала, составленного из фракций с радиусами частиц  $r_0, r_1, \dots, r_n$ , причем объем  $k$ -ой фракции по отношению к объему

фракции  $r_0$  определяется соответствующим слагаемым в (1). Как показывают результаты расчетов, наибольшая плотность упаковки достигается для прерывистых зерновых составов, в которых присутствуют фракции, не менее чем на порядок различающиеся по размеру, а промежуточные фракции исключены. Высокую плотность, очевидно, будет иметь и композиция нескольких подобных составов, если их максимальные по размеру фракции не слишком сильно отличаются друг от друга. В предложенной нами методике подбора зернового состава для получения высокоплотного материала в качестве рекомендуемого состава берется композиция взятых в равных количествах прерывистых составов, полученных из имеющихся в

распоряжении фракций, объемные плотности которых отличаются от максимальной из полученных плотностей не более чем на 0.05.

Для проверки адекватности предложенной методики сопоставим результаты вычисления и рекомендуемые зерновые составы заполнителя для асфальтобетонных и цементобетонных смесей (рис. 1, 2). Рекомендуемые составы приняты по известным нормативным [3, 4] и литературным [1] источникам. На рис. 1 представлены расчетный и рекомендуемые ГОСТом [4] зерновые составы для мелкозернистых прерывистых асфальтобетонных смесей с размером зерен заполнителя в диапазоне от 0.071 до 20 мм. Приведенные данные показывают, что найденный зерновой со-

став укладывается в диапазон составов, предусмотренный для высокоплотных смесей (сплошные линии на Рис. 1), что свидетельствует в пользу предложенной модели. Для составов типа А и Б (пунктирные линии на рис. 1) расчетные значения превышают максимально допустимые для самых мелких фракций на 10 – 15%. Поскольку, в соответствии с нашими представлениями, для получения высокоплотного заполнения необходимо иметь прерывистый зерновой состав [1], в котором доля мелких фракций повышается за счет фракций средних размеров, указанное расхождение говорит о меньшей плотности составов типа А и Б по сравнению с расчетным.



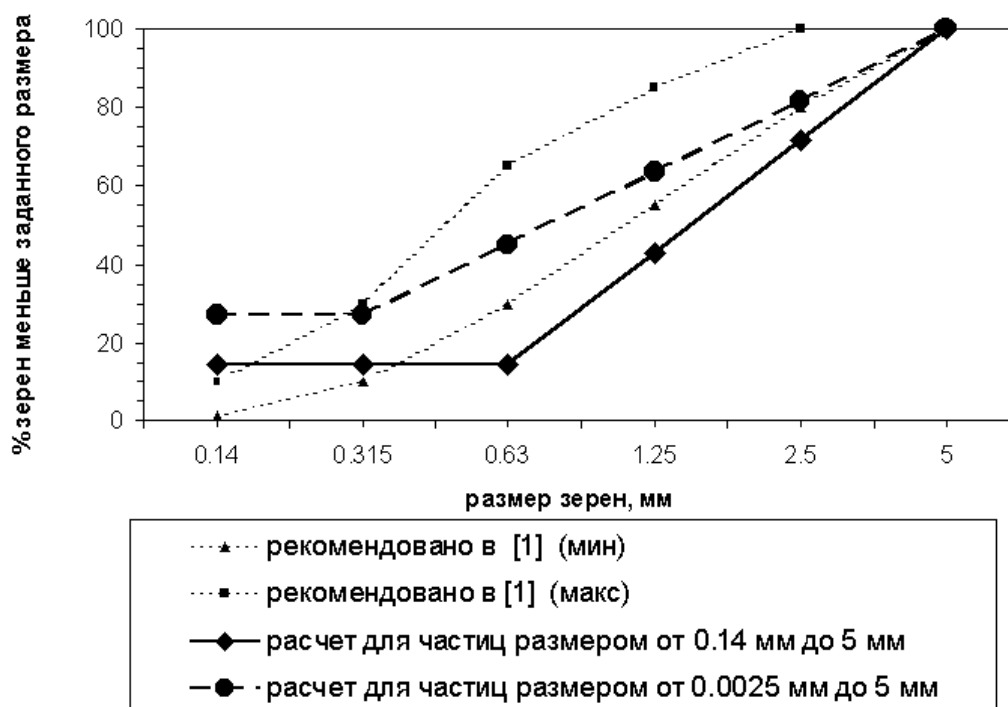
**Рис. 1.** Расчетный и рекомендуемые зерновые составы заполнителя для асфальтобетонных смесей

На рис. 2 представлены рекомендуемые в [1] зерновые составы заполнителя для цементобетона и результаты расчета по нашей модели для двух диапазонов возможных размеров частиц: от 0.14 до 5

мм (Д1) и от 0.0025 до 5 мм (Д2). Прерывистый расчетный состав для диапазона Д1 (толстая сплошная линия на рис. 2), в котором отсутствуют средние фракции 0.315 мм и 0.63 мм, выходит за рекомен-

дваемые границы (тонкие пунктирные линии), предполагающие непрерывность зернового состава в данном диапазоне. С принятием в расчет частиц размером менее 0,14 мм из диапазона Д2, полученный состав (толстая пунктирная линия) находится в рекомендуемых границах, за исклю-

чением фракций, меньших 0,14 мм. В диапазоне от 0,315 мм до 5 мм он становится непрерывным. При этом плотность упаковки возрастает, так как промежутки между частицами крупных и средних фракций Д1 заполняются мелкими частицами из Д2.



**Рис. 2.** Расчетные и рекомендуемые зерновые составы заполнителя для цементобетона

Из представленных результатов следует, что в целом предложенный подход к определению зернового состава правомерен. Полученная модель позволяет получить хорошее соответствие расчетных и рекомендованных зерновых составов заполнителей для асфальтобетонных и цементобетонных. Высокая плотность укладки зерен заполнителя позволяет снизить расход дорогостоящего вяжущего в композиционном материале. К тому же предложенная модель предполагает возможность достичь такой результат при использовании заполнителя с более выраженной прерывистостью зернового состава. Это весьма характерно для песка и гравия природного происхождения. Именно их в большей мере и применяют в производстве ас-

фальтобетона и цементобетона. Поэтому использование предложенной модели позволяет обосновать возможность расширения сырьевой базы и снизить стоимость получения композита.

Изменение зернового состава заполнителя может быть причиной варьирования вязкости асфальтобетонных и цементобетонных смесей. По мнению многих авторов (например, [1]), это в основном является следствием изменения площади его поверхности. Так, для песчаного заполнителя цементобетона рекомендуемое изменение удельной площади поверхности  $S$  его зерен изменяется в диапазоне от 8 до 20 м<sup>2</sup>/дм<sup>3</sup>. Расчетное значение  $S$ , полученное для песка с диапазоном изменения диаметра зерен от 0,14 до 5 мм, составляет

15 м<sup>2</sup> и соответствует нормам. Если в состав заполнителя включить некоторое количество пылевидных частиц и варьировать диаметр зерен от 0,0025 до 5 мм, то возрастает плотность укладки, но и S увеличивается до 26 м<sup>2</sup>. Однако в этом случае проблема технологичности смеси может быть эффективно решена различными методами. Для этого варьируют соотношение расхода ее компонентов [1], вводят специальные добавки [2], регулируют активность самого заполнителя [5].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Баженов Ю.М. Технология бетона. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – С.27...45, 92...96, 210...219.

2. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. – М., 1998. – 768 с.

3. ГОСТ 8736-93. Песок для строительных работ. Технические условия. - М., Госстандарт, 1995. – 14 с.

4. ГОСТ 9128-97. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия. – М., Госстандарт, 1999 – 16 с.

5. Придатко Ю.М., Доброхотов В.Б., Шабров В.Л., Кузнецова Н.Е. Акватехнология модификации минеральных смесей и получаемых на их основе бетонов, растворов // Бетон и железобетон – пути развития. Научные труды 2-й Всероссийской (Международной) конф. по бетону и железобетону. Том.3. – М.: 2005. – С.372-379.

### **THE ANALYSIS OF POLYDISPERSE PARTICLES PACKING IN COMPOSITE BUILDING MATERIALS**

Korolev L.V., Lupanov A.P., Pridatko Yu.M.

*The Yaroslavl state technical university*

Grain compositions for cement concrete and asphalt concrete calculated in terms of our hard spheres model are considered, their comparison with the available specifications is carried out. The obtained results bring to conclusion that discontinuous grain compositions can be useful in high density aggregates production.

