

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-6-18-28

^{1,*}Аль-Бу-Али У.С., ¹Лесовик Р.В., ¹Хархардин А.Н., ¹Толстой А.Д., ¹Ахмед А.А.А.,
²Аласханов А.Х., ³Айменов Ж.Т.

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

²Грозненский государственный нефтяной технологический университет
имени акад. М.Д. Миллионщикова

³Южной Казахстанский государственный технологический университет им. М. Ауэзова

*E-mail walboali@yahoo.com

РАСЧЕТ И ПОДБОР ЗЕРНОВОГО СОСТАВА ЗАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ БЕТОННОГО ЛОМА ВЫСОКОПЛОТНОЙ УПАКОВКИ

Аннотация. Теоретической основой проектирования строительных композитов из фрагментов разрушенных зданий и сооружений является новая трансдисциплинарная наука геоника (геомиметика). Техногенные и природные аномалии, военные конфликты на планете Земля приводят к многочисленным разрушениям городов. Актуальным является использование фрагментов разрушенных зданий и сооружений для производства строительных материалов.

Предложена классификация и схема использования фрагментов разрушенных зданий и сооружений для получения щебня, песка, растворов и бетонов на их основе. Плотнейшая упаковка рассчитана по методике подбора высокоплотной упаковки заполнителя, разработанной в БГТУ им. В.Г. Шухова. Апробация результатов осуществлена на сырье разрушенных зданий и сооружений Ирака, которые состоят в основном из железобетона, керамического кирпича и блоков из известняка. Наличие в измельченном бетоне ломе активных не до конца прогидратированных частиц вяжущего, которые впоследствии гидратируются и участвуют в наборе прочности композитом с образованием дополнительного количества кристаллических новообразований, а также приводит к ускорению процесса твердения цементного камня и повышению конечной прочности материала. В дальнейшем, в ранее созданной структуре, в результате продолжающейся гидратации происходит формирование частей системы нового типа, определенным образом организованных, за счет кристаллизационного роста пико-, нано- и микро- размерных высокоосновных гидросиликатов кальция, зависящих степени гидратации бетонного лoma. Последующая кристаллизация ранее сформированных фаз, приводит к самоуплотнению разных частей системы и их дальнейшей самоорганизации, что обеспечивает высокую конечную прочность и водостойкость материала. Данный механизм гидратации дает структуру бетона с минимальными внутренними напряжениями и объемными деформациями.

В статье рассмотрена методика подбора высокоплотной упаковки заполнителя из бетонного лoma разрушенных зданий и сооружений Ирака. Показано, что прочность полученных образцов с уплотненным заполнителем на 31,3 %, выше, чем у образцов, приготовленных традиционным способом.

Ключевые слова: строительные отходы, высокоплотная упаковка, фрагменты разрушенных зданий и сооружений Ирака, бетонный лом.

Введение. Строительные отходы в виде бетонного лoma образовались в результате военных действий и сноса различных объектов. Эти отходы сбрасываются и накапливаются ежегодно в больших количествах. Они очень долговечны, не разлагаются и, следовательно, становятся все более серьезной проблемой загрязнения окружающей среды. Главной задачей ученых всего мира является создание комфортной среды обитания человека или оптимизация системы «человек–материал–среда обитания» [1–5].

Стройиндустрия представляет собой важную отрасль, которая обеспечивает строительство и ввод в действие современных объектов на основе новых конструктивных решений, формирующих искусственную среду обитания человека, способствующую повышению уровня его

жизнедеятельности. Быстрое промышленное развитие вызывает серьезные проблемы во всем мире, такие как истощение природных ресурсов и нарастание огромного количества отходов [6]. Одним из способов решить эту проблему является использование техногенного сырья в стройиндустрии. Переработанные строительные отходы могут быть получены из разрушенных зданий, посадочных полос аэропорта, опор мостов и бетонных дорог [7]. Использование переработанных заполнителей для производства бетона включает в себя дробление бетонного лoma для получения щебня необходимого размера и качества [8], которых обычно имеют более высокое водопоглощение, плотность ниже, чем плотность обычных агрегатов, а пористость – выше и более низкий удельный вес [4, 5].

Переработывания бетона является важным, поскольку он способствует защите природных ресурсов и утилизации строительных отходов из старого бетона. Мелкий заполнитель бетонной смеси необходим для создания жесткого структурного каркаса и вовлечения его в работу при приложении нагрузки на изделие или конструкцию. Можно использовать мелкий заполнитель естественного состава или дополнительно вводить недостающее количество в нем определенных фракции (обогащение). Поскольку пески многих месторождений содержат незначительное количество фракции (2,5–5 мм), то для создания жесткого структурного каркаса, бетонную смесь необходимо обогащать более крупной фракцией. Чтобы снизить расход вяжущего вещества в бетоне, рассчитывается высокоплотная упаковка заполнителя, поскольку при увеличении плотности заполнения частиц на 0,01 увеличение прочности здания наблюдается на 3–5 % [9, 10].

Ускорение темпов строительства привело к серьезному увеличению строительных отходов, между тем, природное сырье быстро истощается. Альтернативным способом решить эту проблему является использование бетонных отходов в качестве техногенного сырья [12–14].

Методика. Расчет зернового состава бетона с использованием бетонного лома проводят по методу, описанному в [11]. Путем повышения эффективности бетонов за счет повышения плот-

ности упаковки заполнителя, полученного из бетона разрушенных зданий и сооружений. Разработана схема использования фрагментов разрушенных зданий и сооружений для получения щебня, песка, растворов и бетонов на их основе, путем дробления обломков бетонных отходов из снесенных зданиях в Ираке с использованием дробилка, затем измельченные фракции просеивали с использованием стандартных ситах и сортировали на крупных фракциях (10...20 и 5...10 мм) и на мелких фракциях (2,5...5, 1,25...2,5, 0,630...0,315 и 0,315...0,16 мм).

Результаты ситового анализа зернового состава бетонного лома из провинции Ирака приведены в таблице 1. Установлено, что бетонный лом из разрушенных зданий характеризуется большим содержанием мелких фракций, сумма частных остатков на ситах + 0,315 – 0,16 составляет 80 %, на ситах – 0,315–0,16 более 28 %. Зерновой состав бетонного лома содержит меньшее количество мелких фракций и не соответствует созданию высокой плотности, а также не вписывается в область идеальных зерновых композиций. Поэтому насыпная плотность смеси ($\rho_{нас.}$), средняя плотность зерен данной фракции ($\rho_{ср.}$) и плотность упаковки в ней частиц (σ) в свободном и уплотненном состоянии соответственно равны:

– насыпная плотность $\rho_{нас.} = 1600 \text{ кг/м}^3$, а плотность упаковки зерен в смеси $\sigma = \eta_{см} = 0,631$, $\rho_{нас.} 1600 \text{ кг/м}^3$, $\sigma = \rho_{нас.}/\rho_{ср.} = 0,631$, где $\rho_{ср.} = 2520 \text{ кг/м}^3$.

Таблица 1

Результаты определения состава зерна из лома бетона

Показатели	Размер отверстий сит, мм						Проход сквозь сито № 0,16
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
Остатки на ситах, г	200	50	160	280	240	280	20
Частные, %	20	5	16	28	24	28	0,2
Полные, %	20	5	21	49	73	101	100
Плотность упаковки	0,476	0,51	0,468	0,476	0,51	0,54	0,55
Модуль крупности	$M_{кр} = 2,49$						

Большая часть заполнителя обычно принимают за 100 масс. частей (1; 10; 100; 1000 кг), тогда массовую часть каждой последующей реакции рассчитывают по формуле:

$$G_n = (1 - \sigma_{n-1}) \cdot \frac{\eta_n}{\sigma_{n-1}} \cdot \beta_n \sum_{i=1}^{n-1} G_i, \quad (1)$$

где σ_{n-1} – плотность упаковки зерен в смеси, состоящей из (n-1) фракций, так при n=2, $\sigma_1 = \eta_1$; η_n – плотность упаковки частиц в каждой очередной фракции; $\beta_n = 1$ – для умеренно подвижных зернистых смесей; $\beta_n = (\sigma_{n-1}/\eta_n)^{1/n-1}$, где $m=1,2,3$ для умеренно жестких смесей; $\beta_n = \sigma_{n-1}/\eta_n$ – для подвижных полидисперсных смесей.

Для снижения расхода каждой фракции в жестких полидисперсных смесях ($\beta_n = 1$) используют формулу (1) с пониженным до минимума расходом мелких фракций и степенью заполнения свободного объема в них виде:

$$G_n = (1 - \sigma_{n-1}) \cdot \left(\frac{\eta_n}{\sigma_{n-1}} \right)^{(n+1)/2} \cdot \beta_n \cdot \sum_{i=1}^{n-1} G_i \quad (2)$$

$$\sigma_n = \frac{\gamma_n}{\rho} \quad (3)$$

где γ_n – насыпная плотность смеси в воздушной среде, либо в увлажнённом состоянии

$$\sigma_{nd} \approx \sigma_m \cdot \beta_n^1, \quad (4)$$

либо вычисляют по формуле:

$$\sigma_n \approx \sigma_{n-1} + \left(\frac{1 - \sigma_{n-1}}{\beta_n} \right) \cdot X_n \quad (5)$$

где

$$X_n = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \psi_{ij}^m}{n(n-1)/2} \quad (6)$$

ψ_{ij}^m – приращение плотности бимодальных упаковок частиц при введении в смесь очередной фракции.

Значение ψ_{ij}^m для бимодальных упаковок в зависимости от m или от относительного размера частиц d_n/d_1 приведены в таблице 2.

Минимальное количество мелкого заполнителя при $\beta_2 = (\mu_1/\sigma_2)^{1/(n-1)} = (\mu_1/\mu_2)$, тогда

$$G_n = (1 - \eta_1) \cdot \left(\frac{\eta_2}{\eta_1} \right) \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \right) \cdot \sum_{i=1}^{n-1} G_i \quad (7)$$

Фракция (2,5–5 мм) и другие фракции крупного и мелкого заполнителя, получаемого дроблением бетонного лома и последующим рассеиванием имеет повышенное (30–40 %) содержание зерен лещадной формы [15].

Методика расчета и подбора фракций из отсева продукта дробления фрагментов разрушенных зданий и сооружений Ирака для получения высокоплотной смеси заключается в том, что теоретическое количество каждой фракции определяют расчетом по приведенным выше формулам и подбор их ведут из имеющегося дисперсного сырья, рассеянного на узкие фракции [16]. Предварительно устанавливают подбором подходящий класс m системы распределения частиц в высокоплотной полидисперсной смеси, определяющий прерывность в их средних размеров частиц наиболее крупной фракции (основы) с плотностью их упаковки η_1 по формуле:

$$\frac{d_n}{d_1} = \left(\frac{2,549}{10\eta_1} \right)^{\frac{m(n-1)}{3}} = \left(\frac{1}{10\eta_1(\sqrt{3}-1)^3} \right)^{\frac{m(n-1)}{3}} \quad (8)$$

где d_1, d_n – диаметр наибольших частиц (шаров), образующих упаковку, и диаметр частиц (шаров) последовательно меньшего размера, заполняющих в ней образуемые при этом соответствующие пустоты; η_1 – плотность случайной упаковки монодисперсного слоя частиц наиболее крупной

фракции; m – класс системы распределения по размеру частиц в смеси, определяющий прерывность в их размерах, $m = 0 \dots 15 \dots (n+1)$;

Расчет зависит от определения распределения зерна по сравнению средних расстояний между каждой составляющей смеси высокой плотности (2). В начале выбирают большую объемную плотность, а затем рассчитывают блоки заполнения объема зернами заполнителя,

$$\eta_n = \frac{\gamma_n}{\rho}, \text{ где } \gamma_n, \rho - \text{ насыпная и средняя плотность зерен данной фракции.}$$

Плотность заполнения гранул крупными фракциями агрегатов известна, в зависимости от формы их гранул, в пределах от $\mu_1 = 0,6 \dots 0,56$.

Основная часть. Экспериментальная плотность упаковки зерен бетонного лома из фрагментов разрушенных зданий и сооружений Ирака $\mu_1 = 0,5$. Подставив в выражение (2) это значение μ_1 и средний размер зерен $d_1 = (10,5)^{1/2} = 7,07$ мм для различного класса распределения $m = 1 \dots 12$, получим систему распределений соответствующего класса прерывности в их гранулометрическом составе. Для широкого набора фракций принимаем $m = 3$:

$$d_n/d_1 = (2,549/10 \mu_1)^{n-1} = (0,2549/0,5)^{n-1} = 1; 0,50; 0,25; 0,132; 0,068; 0,0344; 0,0176; 0,009; 0,0046$$

Расчет завершается, когда средний размер частиц мелкой фракции $d_n = (d_n/d_1) d_1$ мм = $0,0176 \times 7,07 = 0,124$ мм указан рекомендуемым размером бетонного заполнителя, например, $d_n = 0,14 \dots 0,1$ мм. Согласно d_n/d_1 размеры зерна для каждой узкой части будут равны:

$$d_n = 10 \dots 5 \text{ мм} (1; 0,50; 0,25; 0,132; 0,068; 0,0344; 0,0176; 0,009; 0,0046) = 10 \dots 5; 5 \dots 2,5; 2,5 \dots 1,25; 1,32 \dots 0,66; 0,68 \dots 0,34; 0,344 \dots 0,172; 0,176 \dots 0,088; 0,09 \dots 0,045; 0,046 \dots 0,023 \text{ мм.}$$

Каждая гранулированная часть отбирается на стандартных ситах, а плотность заполнения их гранул определяется насыпной плотностью/

$$(\eta_n = \frac{\gamma_n}{\rho} \text{ где } \rho - \text{ средняя плотность зерна):}$$

$$\mu_1 = 0,51; \mu_2 = 0,476; \mu_3 = 0,511; \mu_4 = 0,468; \mu_5 = 0,476; \mu_6 = 0,51; \mu_7 = 0,544; - \text{ для каждой фракции определяют экспериментально.}$$

При расчете количества каждой фракции для получения плотнейшей упаковки смеси используется любое произвольное значение G_1 объемной части, например, 1 кг, 10 кг, 100 кг или 100 Вт. Части. Затем вычисляется вторая дробь и каждая последующая дробь с учетом коэффициента зернистости n по формуле (1).

Таблица 2

Степень заполнения свободного объема в слое крупных молекул мелкими частицами в зависимости от класса систем m и их относительного размера в бинарных пакетах

m	< 1	1	2	3	4	4,5	5
ψ_{ij}^m	$\varepsilon_i^3 \eta_i^3$	$\varepsilon_i^2 \eta_i^3$	$\varepsilon_i^2 \eta_i^2$	$\varepsilon_i^2 \eta_i$	ε_i^2	$\varepsilon_i \eta_i^2$	ε_i^2 / η_i
d_n / d_1	≤ 1	0,73	$\leq 0,54$	$\leq 0,39$	0,29	0,25	0,21
ψ_{ij}^m	0,011	0,033	0,052	0,080	0,123	0,148	0,189
m	6	7	8	9	10	11	12
ψ_{ij}^m	$\varepsilon_i \eta_i$	$\varepsilon_i^2 \eta_i^2$	ε_i	η_i^2	ε_i / η_i	$1 - \eta_i^2$	η_i
d_n / d_1	$\leq 0,15$	$\leq 0,4$	$\leq 0,08$	$\leq 0,06$	$\leq 0,04$	$\leq 0,033$	$\leq 0,024$
ψ_{ij}^m	0,227	0,290	0,350	0,422	0,539	0,578	0,65

Принимая 100 мас. ч. для первой крупной фракции, смеси класса $m = 3$, количество второй фракции заполнителя, согласно выражению (1 и 2), потребуется:

$$\text{При } \beta_2 = 1, G_n = (1 - \sigma_{n-1}) \cdot \frac{\eta_n}{\sigma_{n-1}} \cdot \beta_n \sum_{i=1}^{n-1} G_i \text{ и } G_n = (1 - \sigma_{n-1}) \cdot \left(\frac{\eta_n}{\sigma_{n-1}} \right)^{(n+1)/2} \cdot \beta_n \sum_{i=1}^{n-1} G_i$$

где $\sigma_{n-1} = \eta_{n-1}$, $G_1 = 100$ мас. ч., $\sigma_{n-1} = \eta_1 = 0.5$ соответственно получим:

$$G_2 = (1 - \eta_1) \cdot \frac{\eta_2}{\eta_1} \cdot \beta_2 \sum_{i=1}^1 G_1 = (1 - 0,5) (0,476 / 0,5) \cdot 1 \cdot 100 = 48 \text{ мас.ч.}$$

либо

$$G_2 = (1 - \eta_1) \cdot \left(\frac{\eta_2}{\eta_1} \right)^{(n+1)/2} \cdot \beta_2 \sum_{i=1}^{n-1} G_1 = (1 - 0,5) (0,476 / 0,5)^{3/2} \cdot 1 \cdot 100 = 47 \text{ мас.ч.}$$

Плотность упаковки зерен в смеси, состоящей из первых двух фракции, где $\sigma_1 = \eta_1$, будет равна:

При $\beta_2 = 1$ и $\varepsilon_2 = (1 - \eta_2)$;

$$\sigma_2 = \sigma_1 + (1 - \sigma_1) X_2 / \beta_2 = 0,492 + (1 - 0,5) \varepsilon_2^2 \eta_2 / \beta_2 = 0,5 + 0,5 \cdot 0,524^2 \cdot 0,476 = 0,565$$

$$\text{при } \beta_2 = \frac{\sigma_{n-1}}{\eta_n} = (0,5 / 0,476) = 1,050;$$

$$\sigma_2 = 0,5 + 0,5 \cdot 0,524^2 \cdot 0,476 / 1,050 = 0,562$$

Для класса $m = 3$ системы распределения частиц в смеси $X_2 = \varepsilon_2^2 \eta_2$, табл.2. необходимое количество третьей фракции потребуется:

$$\beta_3 = 1, G_3 = (1 - \sigma_2) \cdot \frac{\eta_3}{\sigma_2} \cdot \beta_3 \sum_{i=1}^{n-1} G_2$$

$$G_3 = (1 - 0,562) (0,51 / 0,562) \cdot 1 \cdot (100 + 48) = 59 \text{ мас.ч.}$$

либо

$$G_3 = (1 - 0,562) (0,51 / 0,562)^{4/2} \cdot 1 \cdot (100 + 47) = 54 \text{ мас.ч.}$$

Расчет величины X_i производится согласно схеме распределения зерен в пустотах зернистого слоя.

$$X_3 = (\varepsilon_2^2 \eta_2 + \varepsilon_3^2 \eta_3 + \varepsilon_3 \eta_3) / 3(3-1)/2 = (0,524^2 \cdot 0,476 + 0,49^2 \cdot 0,51 + 0,49 \cdot 0,51) / 3 = 0,168.$$

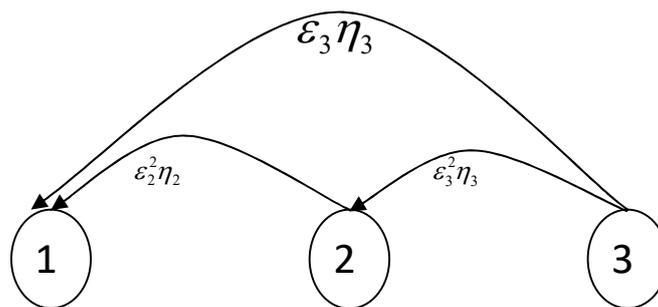


Рис.1. Распределение зерен в смеси, состоящей из 3-х фракций

Плотность упаковки зерен в смеси, состоящей из первых трех фракций, будет равна:

$$\sigma_3 = \sigma_2 + (1 - \sigma_2)X_3 / \beta_3, \beta_3 = \frac{\sigma_{n-1}}{\eta_n} = 0,562/0,51 = 1,102$$

$$\sigma_3 = 0,562 + (1 - 0,562) 0,168 / 1,102 = 0,6290$$

при $\beta_3 = \frac{\sigma_2}{\eta_3} = (0,562/0,51) = 1,1019$ и при $\beta_3 = \left(\frac{\sigma_2}{\eta_3}\right)^{1/2} = (0,562/0,51)^{0,5} = 1,05$

$$\sigma_3 = 0,562 + (1 - 0,562) 0,168 / 1,1019 = 0,6288$$

$$\sigma_3 = 0,562 + (1 - 0,562) 0,168 / 1,105 = 0,6286$$

Принимают меньшее значение σ_n , $\sigma_3 = 0,6286$.

Для расчета требуемого количества четвертой и последующих фракций зерен смеси из четырех и более фракций рассматривается распределение с $m = 3$. Число двусторонних связей (двустороннее распределение) молекул в пространствах разделенных слой $m = n(n-1)/2 = 4 \cdot 3 / 2 = 6$, где n – число всех фракций в смеси, принимая во внимание каждую следующую фракцию смеси.

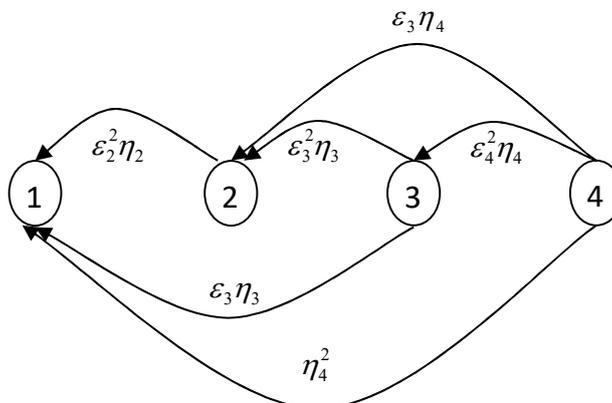


Рис.2. Распределение зерен в смеси, состоящей из 4-х фракций

Распределение частиц в 4-х фракционной смеси вычисляются, используя X_4 , согласно схемы, а затем β_4 :

$$X_4 = (\epsilon_2^2 \eta_2 + \epsilon_3^2 \eta_3 + \epsilon_4^2 \eta_4 + \epsilon_3 \eta_3 + \epsilon_4 \eta_4 + \eta_4^2) / [4(4-1)/2] = (0,524^2 \cdot 0,476 + 0,49^2 \cdot 0,51 + 0,532^2 \cdot 0,468 + 0,49 \cdot 0,51 + 0,532 \cdot 0,468 + 0,468^2) / 6 = 0,184$$

при $\beta_4 = \left(\frac{\sigma_3}{\eta_4}\right)^{1/n-1} = (0,6286/0,468)^{1/3} = 1,103$, $\beta_4 = \left(\frac{\sigma_3}{\eta_4}\right) = (0,6286/0,468) = 1,343$.

В расчетах принимают при $\beta_4 = 1$

$$G_{\neq} = (1 - 0,6286) (0,468/0,6286) \cdot 1 \cdot (100 + 48 + 59) = 58 \text{ мас.ч.}$$

либо, $G_{\neq} = (1 - 0,6286) (0,468/0,6286)^{5/2} \cdot 1 \cdot (100 + 47 + 54) = 36 \text{ мас.ч.}$

при $\beta_4 = \frac{\sigma_3}{\eta_4} = (0.6286/0.468) = 1.343$, и при $\beta_4 = \left(\frac{\sigma_3}{\eta_4}\right)^{1/3} = (0.6286/0.468)^{0.5} = 1.103$

$\sigma_4 = 0,6286 + (1 - 0,6286) \cdot 0,184 / 1,343 = 0,679$

$\sigma_4 = 0,6288 + (1 - 0,6286) \cdot 0,184 / 1,103 = 0,691$

Представим схему распределения зерен в 5-ти фракционной смеси:

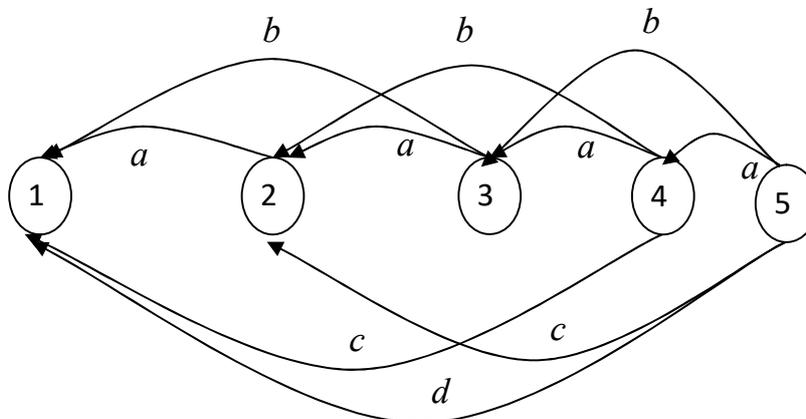


Рис. 3. Распределение зерен в смеси, состоящей из 5-х фракций

$$X_5 = (\varepsilon_2^2 \eta_2 + \varepsilon_3^2 \eta_3 + \varepsilon_4^2 \eta_4 + \varepsilon_5^2 \eta_5 + \varepsilon_3 \eta_3 + \varepsilon_4 \eta_4 + \varepsilon_5 \eta_5 + \eta_4^2 + \eta_5^2 + \eta_5) / [5(5-1)/2] =$$

$$= (0,524^2 \cdot 0,476 + 0,49^2 \cdot 0,51 + 0,532^2 \cdot 0,468 + 0,524^2 \cdot 0,476 + 0,49 \cdot 0,51 + 0,532 \cdot 0,468 + 0,524 \cdot 0,476 + 0,468^2 + 0,476^2 + 0,476) / 10 = 0,219.$$

при $\beta_5 = 1$, $G_5 = (1 - 0,679) \cdot (0,476 / 0,679) \cdot 1 \cdot (100 + 48 + 59 + 58) = 60$ мас.ч.

$G_5 = (1 - 0,679) \cdot (0,476 / 0,679)^{6/2} \cdot 1 \cdot (100 + 47 + 54 + 36) = 27$ мас.ч.

при $\beta_5 = \frac{\sigma_{n-1}}{\eta_n}$, $\beta_5 = \left(\frac{\sigma_4}{\eta_5}\right) = (0.679/0.476) = 1.43$, $\beta_5 = \left(\frac{\sigma_4}{\eta_5}\right)^{1/n-1} = (0.691/0.476)^{1/4} = 1.1$,

$\sigma_5 = 0,679 + (1 - 0,679) \cdot 0,219 / 1,43 = 0,728$

$\sigma_5 = 0,691 + (1 - 0,691) \cdot 0,219 / 1,1 = 0,752$.

В связи с громоздкостью схемы распределения зерен в смеси, состоящей из шести и семи фракций, мы их опускаем. Число бимодальных связей в смеси, состоящей из шести фракций, будет равно $n(n-1)/2 = 6(6-1)/2 = 15$.

$$X_6 = (\varepsilon_2^2 \eta_2 + \varepsilon_3^2 \eta_3 + \varepsilon_4^2 \eta_4 + \varepsilon_5^2 \eta_5 + \varepsilon_6^2 \eta_6 + \varepsilon_3 \eta_3 + \varepsilon_4 \eta_4 + \varepsilon_5 \eta_5 + \varepsilon_6 \eta_6 + \eta_4^2 + \eta_5^2 + \eta_6^2 + \eta_4 + \eta_5 + \eta_6) / [5(5-1)/2],$$

$$X_6 = (0,524^2 \cdot 0,476 + 0,49^2 \cdot 0,51 + 0,532^2 \cdot 0,468 + 0,524^2 \cdot 0,476 + 0,49^2 \cdot 0,51 + 0,49 \cdot 0,51 + 0,532 \cdot 0,468 + 0,524 \cdot 0,476 + 0,49 \cdot 0,51 + 0,468^2 + 0,476^2 + 0,51^2 + 0,468 + 0,476 + 0,51) / 15 = 0,253.$$

при $\beta_6 = 1$, $G_6 = (1 - 0,728) \cdot (0,51 / 0,728) \cdot 1 \cdot (100 + 48 + 59 + 58 + 60) = 62$ мас.ч.

либо, $G_6 = (1 - 0,728) \cdot (0,51 / 0,728)^{7/2} \cdot 1 \cdot (100 + 47 + 54 + 36 + 27) = 21$ мас.ч.

при $\beta_6 = \frac{\sigma_{n-1}}{\eta_n}$, $\beta_6 = \left(\frac{\sigma_5}{\eta_6}\right) = (0.728/0.51) = 1.4$, при $\beta_6 = \left(\frac{\sigma_5}{\eta_6}\right)^{1/n-1} = (0.752/0.51)^{1/5} = 1.08$,

$\sigma_6 = 0,728 + (1 - 0,728) \cdot 0,253 / 1,43 = 0,776$

$\sigma_6 = 0,752 + (1 - 0,752) \cdot 0,253 / 1,08 = 0,810$.

При ведении седьмой фракции в смесь, состоящей из шести фракций, число бимодальных связей в ней будет: $n(n-1)/2 = 7(7-1)/2 = 21$;

$$X_7 = (15 X_6 + \varepsilon_7^2 \eta_7 + \varepsilon_6 \eta_6 + \varepsilon_7 \eta_7 + \eta_7^2 + \eta_7 + \eta_7) / 21 =$$

$$(15 \cdot 0,253 + 0,456^2 \cdot 0,544 + 0,49 \cdot 0,51 + 0,456 \cdot 0,544 + 0,544^2 + 0,544 + 0,544) / 21 = 0,276$$

при $\beta_7 = 1$, $G_7 = (1 - 0,776) (0,544 / 0,776) \cdot 1 \cdot (100 + 48 + 59 + 58 + 60 + 62) = 61$ мас.ч.

либо, $G_7 = (1 - 0,776) (0,544 / 0,776)^{8/2} \cdot 1 \cdot (100 + 47 + 54 + 36 + 27 + 21) = 16$ мас.ч.

при $\beta_7 = \frac{\sigma_{n-1}}{\eta_n}$, $\beta_7 = \left(\frac{\sigma_6}{\eta_7} \right) = (0,776 / 0,544) = 1,43$, $\beta_7 = \left(\frac{\sigma_6}{\eta_7} \right)^{1/n-1} = (0,810 / 0,544)^{1/6} = 1,07$,

$$\sigma_7 = 0,776 + (1 - 0,776) 0,276 / 1,43 = 0,819$$

$$\sigma_7 = 0,810 + (1 - 0,810) 0,276 / 1,07 = 0,859.$$

Исходные данные для расчета и его результаты приведены в табл.3.

Таблица 3

Гранулометрический состава высокоплотной смеси из отсева дробления бетонного лома

Ситовые фракции, мм	Расчетный размер части, мм	Плотность упаковки зерен	Состав смеси, мас.ч.	Насыпная плотность (кг/м³)	Плотность упаковки, σ_n
5...2,5	5...2,5	0,476	47 (48)	1300(1320)	0,562
2,5...1,25	2,5...1,25	0,51	54(59)	1360(1400)	0,6286
1,25...0,63	0,68...0,34	0,468	36(58)	1480(1500)	0,679
0,63...0,315	0,344...0,172	0,476	27(60)	1550(1600)	0,728
0,315...0,16	0,176...0,088	0,51	21(62)	1610(1650)	0,776
0,16...0,04	0,088...0,09	0,544	16(61)	1680(1720)	0,8191
Пылевидный отсев	—	—	0	—	—

Расход вяжущего по размеру из цементного вяжущего в зависимости от движения 1 м³ бетонной смеси при В/Ц = 0,449 будет равна:

$\alpha_3 = 1,0579 \dots 1,330$, исходя из смешиваемости 1 м³ бетонной смеси при В/Т = 0,449, будет равен:

$$V = 1 - 0,8191 / (1,058 \dots 1,330) = 0,226 \dots 0,3842 \text{ м}^3$$

$$m_{ц} = (0,226 \dots 0,3842)$$

$$\cdot \rho_{т} = (0,226 \dots 0,3842), \text{ м}^3$$

$$2150 \text{ кг} = 486 \dots 826 \text{ кг}$$

где ρ_m – плотность цементного вяжущего теста при В/Т = 0,451

$$\frac{0,8191 - 0,631}{0,01} \cdot 3\% = 56,43\%$$

Увеличение прочности бетона может составить более, чем

Исходные данные для расчета и его результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4

Состав бетона с высокой плотностью упаковки

Ситовые фракции, мм	Масса заполнителя для образцов размером 10×10×10 см (г)		Расход цемента (кг) на один куб размером 10×10×10 см, (г)	В/Ц-52 % (мл)	Насыпная плотность (кг/м³)		Плотность упаковки, σ_n
	1*	2*					
10...5	615	413	486	230	1260	1260	0,500
5...2,5	289	198			1300	1320	0,562
2,5...1,25	332	244			1360	1400	0,6286
1,25...0,63	221	240			1480	1500	0,679
0,63...0,315	166	248			1550	1600	0,728
0,315...0,16	129	256			1610	1650	0,776
0,16...0,04	98	252			1680	1720	0,819
Сум.	1850	1850					

Примечание: 1 – G_n -из формулы (1); 2 – G_n -из формулы (2).

В таблице 5 приведены значения прочности при сжатии образцов бетона в возрасте 3,7 и 28

суток после отверждения для двух разных смесей: обычного бетона и с высокоплотной упаковкой заполнителя.

Таблица 5

Свойства бетона с высокоплотной упаковкой заполнителя

Назначения	ρ_b , (кг/м ³)	Цемент, (кг/м ³)	Бетонный лом (фр. 0,16–10 мм), (кг/м ³)	В/Ц, %	$\sigma_{уп}$	Прочность образцов, МПа		
						3 сут	7 сут	28 сут
Естественная смесь	2260	513	1800	53	0,6671	14,5	17	23,5
Плотная смесь	2340	486	1800	47	0,8191	19	26,5	34,2

Выводы. Установлено, что прочность опытных образцов при сжатии в 28-ми суточном возрасте с плотнейшей упаковкой частиц заполнителя из фрагментов, разрушенных зданий и сооружений выше прочности образцов с обычным заполнителем. Увеличение плотности упаковки зерен заполнителя с 0,631 до 0,8191 приводит к увеличению прочности при сжатии на 31,3 %. Повышение плотности упаковки частиц заполнителя на 0,01 способствует увеличению прочности образцов бетона на 2,65 %.

Простейший способ повышения плотности упаковки частиц в смеси мелкого заполнителя из бетонного лома разрушенных зданий и сооружений, и получения оптимального ее состава заключается во ведении в эту смесь частиц разных размеров (до 7 фракций), включая фракцию 20...5 мм в количестве 100 масс. частей на 101 масс. частей мелкой фракции 0,04...5 мм, либо 100 масс. частей фракции 20...5 мм на 248 масс. частей мелкого заполнителя фракции 0,04...5 мм.

Расчет и подбор компонентов заполнителя высокой плотности из смеси песка и бетонных отходов позволил увеличить плотность упаковки зерен с 0,631 до 0,8191, что снизило пустотность смеси и, как следствие – расход цемента до 5,2 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С. Генетические основы энергосбережения в промышленности строительных материалов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 1994. № 7–8. С. 96–100.
2. Толстой А.Д., Лесовик В.С., Милькина А.С. Особенности структуры бетонов нового поколения с применением техногенных материалов // Вестник СБАДИ. Строительство и архитектура. 2018. Том 15, № 4 (62). С. 588–595.
3. Чернышева Н.В., Лесовик В.С. Быстро-твердеющие композиты на основе водостойких гипсовых вяжущих. Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. 123 с.
4. Gridchin A.M., Lesovik V.S., Zum Problem der Forchung des System «Mensch-Stoff-Umwelt». 12. Ibaus. Internationale Baustofftagung. Weimar, 1994.

5. Франтов Г.С. Геология и живая природа : (Уровни организации вещества, бионика и геоника, клетки и газово-жидкие включения). Ленинград: Недра, 1982. 145 с.

6. Shahidan S., Bunnori N.M., Md Nor N., Basri S.R. Damage severity evaluation on reinforced concrete beam by means of acoustic emission signal and intensity analysis // 2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications. 2011. Pp. 337–341.

7. Ortiz O., Pasqualino J.C., Castells F. Environmental performance of construction waste: comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain. J. WasteManag. 2010. 30 (4). Pp. 7–12.

8. Shahidan S., Isham I., Jamaluddin N. A Review on Waste Minimization by Adopting in Self Compacting Concrete // MATEC Web Conf. 2016. Vol. 47.

9. Tumadhir M.B. Effect of Using Recycled Lightweight Aggregate on the Properties of Concrete. Journal of Babylon University // Engineering Sciences. 2015. No. 2. Vol. 23.

10. Medina C., Zhu W., Howind T., Rojas M., Frías M. Influence of mixed recycled aggregate on the physical and mechanical properties of recycled concrete. J. Clean. 2014. Prod. 68, 216e225.

11. Хархардин А.Н. Способы получения высокоплотных составов зернистого сырья. Известия вузов. Строительство. Новосибирск. Изд-во НГАСУ. 1996. №10. С. 46–60.

12. Сулейманова Л.А., Лесовик В.С., Сулейманов А.Г. Неавтоклавные газобетоны на композиционных вяжущих. Белгород: КОНСТАНТА, 2010. С. 152.

13. Abdul Rahim M., Ibrahim N.M., Idris Z., Ghazaly Z. M., Shahidan S., Rahim N.L., Sofri L.A., Isa N.F. Properties of Concrete with Different Percentage of the Rice Husk Ash (RHA) as Partial Cement Replacement // Mater. Sci. Forum. 2014. Vol. 803. Pp. 288–293.

14. Andreu G.C., Miren E. Effects of using recycled concrete aggregates on the shrinkage of high performance concrete. Construction and Building Materials, 2016. Vol. 115.

15. Лесовик В.С., Хархардин А.Н., Анохин С.А. К проблеме оптимизации гранулометрического состава песка при производстве песчаных бетонов // Сборник тезисов докладов. Тр. Междунар. Научно-технич. Конференции. Старый Оскол. Изд. Филиала МИСИ, 1999. С. 29–31

16. Хархардин А.Н. Эффективные составы заполнителя бетонного. Известия вузов. Строительство. 1997. №5. С. 21–25.

Информация об авторах

Аль-Бу-Али Уатик Саед Джассам, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: walboali@yahoo.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 44.

Лесовик Руслан Валерьевич, доктор технических наук, профессор, проректор по международной деятельности. E-mail: ruslan_lesovik@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Хархардин Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Толстой Александр Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: tad56@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ахмед Анис Ахмед, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: civileng85@yahoo.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Аласханов Арби Хамидович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: alaschanov.arbi@mail.ru. Грозненский государственный нефтяной технологический университет имени акад. М.Д. Миллионщикова. Чечения, г. Гудермес, ул. Грозненская, д. 33.

Айменов Жамбул Талхаевич, доктор технических наук, профессор, зам. Директор НИИ СМСИА. E-mail: zhambul_ukgu@mail.ru. Южной Казахстанский государственный технологический университет им. М. Ауэзова. Казахстан, 160012, г. Шымкент, пр. Таухе-хана 5.

Поступила 09.12.2019

© Аль-Бу-Али У.С., Лесовик Р.В., Хархардин А.Н., Толстой А.Д., Ахмед А.А.А., Аласханов А.Х., Айменов Ж.Т., 2020

^{1,*}Albo Ali W.S., ¹Lesovik R.V., ¹Kharkhardin A.N., ¹Tolstoy A.D., ¹Ahmed A.A.A.,
²Alaskanov A.K., ³Aimenov Z.T.

¹Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov

²Grozny State Oil Technological University named after Acad. M.D. Millionschikova

³South Kazakhstan State Technological University named after M. Auezova

*E-mail: walboali@yahoo.com

CALCULATION AND SELECTION OF THE HIGH DENSITY AGGREGATES FROM CONCRETE SCRAP

Abstract. The new transdisciplinary science of geonics (geomimetics) is the theoretical basis for designing construction composites from fragments of destroyed buildings and structures. Technogenic and natural anomalies, military conflicts on planet Earth lead to destruction of cities. Utilization of fragments of destroyed buildings and structures for the production of building materials is relevant.

The classification and scheme of using fragments of destroyed buildings and structures to obtain crushed stone, sand, solutions and concretes based on them is proposed. The densest packaging is calculated using the method of selecting high-density filler packaging developed at BSTU named after V.G. Shukhov. The results are tested on the raw materials of destroyed buildings and structures in Iraq, which consist mainly of reinforced concrete, ceramic bricks and limestone blocks. The presence of binder particles that are not fully hydrated in the concrete scrap, which are subsequently hydrated and participate in the curing of the composite

with the formation of an additional number of crystalline neoplasms, and also accelerates the hardening of cement stone and increases the final strength of the material. Subsequently, in the previously created structure, as a result of continuing hydration, a new type of system parts is formed, organized in a certain way, due to the crystallization growth of pico -, nano - and micro-sized high-base calcium hydrosilicates, depending on the degree of hydration of concrete scrap. The following crystallization of previously formed phases leads to self-sealing of different parts of the system and their further self-organization, which ensures high final strength and water resistance of the material. This hydration mechanism gives a concrete structure with minimal internal stresses and volume deformations. The article discusses the methodology for the selection of high-density packing of aggregate from concrete scrap in the destroyed building and construction of Iraq. It is shown that the strength of the obtained samples with compacted aggregate is 31,3 % higher than that of samples prepared in the traditional way.

Keywords: construction waste, high-density packaging, fragments of destroyed buildings and structures in Iraq, concrete scrap.

REFERENCES

1. Lesovik V.S. Genetic principles of energy conservation in the building materials industry [Geneticheskie osnovy energosberezheniya v promyshlennosti stroitel'nykh materialov]. Proceedings of the higher educational institutions. Building. 1994. No. 7–8. Pp. 96–100.
2. Tolstoy A.D., Lesovik V.S., Milkina A.S. Structural features of new generation concrete using technogenic material [Osobennosti struktury betonov novogo pokoleniya s primeneniem tekhnogennykh materialov]. Bulletin Sibadi. Construction and architecture. 2018. Vol.15, No. 4 (62). Pp. 588–595. (rus)
3. Chernysheva N.V., Lesovik V.S. Quick-hardening composites based on waterproof gypsum binders [Bystrytverdeyushchie kompozity na osnove vodostojkikh gipsovyyh vyazhushchih]. Belgorod: Pub. BSTU, 2011. 123 p. (rus)
4. Gridchin A.M., Lesovik V.S. On the problem of studying the system "man-environment-matter" [K probleme issledovaniya sistemy «chelovek-sreda-materiya». 12. Ibaus. International Building Materials Conference. Weimar, 1994.
5. Frantov G.S. Geology and a live nature. (Organization levels of matter, bionics and geonics, cells and gas-liquid inclusions) [Geologiya i zhivaya priroda : (Urovni organizatsii veshchestva, bionika i geonika, kletki i gazovo-zhidkie vklyucheniya)]. Leningrad: Nedra, 1982. 145 p. (rus)
6. Shahidan S., Bunnori N.M., Md Nor N., Basri S.R. Damage severity evaluation on reinforced concrete beam by means of acoustic emission signal and intensity analysis. 2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications. 2011. Pp. 337–341.
7. Ortiz O., Pasqualino J.C., Castells F. Environmental performance of construction waste: comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain. J. WasteManag. 2010. 30 (4). Pp. 7–12.
8. Shahidan S., Isham I., Jamaluddin N. A Review on Waste Minimization by Adopting in Self Compacting Concrete. MATEC Web Conf. 2016. Vol. 47.
9. Tumadhir M.B. Effect of Using Recycled Lightweight Aggregate on the Properties of Concrete. Journal of Babylon University. Engineering Sciences. 2015. No. 2. Vol. 23.
10. Medina C., Zhu W., Howind T., Rojas M., Frias M. Influence of mixed recycled aggregate on the physical and mechanical properties of recycled concrete. J. Clean. 2014. Prod. 68, 216e225.
11. Kharkhadin A.N. Methods for producing high-density compositions of granular raw materials [Sposoby polucheniya vysokoplotnykh sostavov zernistogo syr'ya]. Proceeding from universities. Construction. Novosibirsk. Pub. in Ngasu. 1996. No.10. Pp. 46–60. (rus)
12. Suleymanova L.A., Lesovik V.S., Suleymanov A.G. Non-autoclaved aerated concrete on composite binders [Neavtoklavnye gazobetonny na kompozitsionnykh vyazhushchih]. Belgorod: CON-STANT, 2010. 152 p. (rus)
13. Abdul Rahim M., Ibrahim N.M., Idris Z., Ghazaly Z.M., Shahidan S., Rahim N.L., Sofri L.A., Isa N.F. Properties of Concrete with Different Percentage of the Rice Husk Ash (RHA) as Partial Cement Replacement. Mater. Sci. Forum. 2014. Vol. 803. Pp. 288–293.
14. Andreu G.C., Miren E. Effects of using recycled concrete aggregates on the shrinkage of high performance concrete. Construction and Building Materials, 2016. Vol. 115.
15. Lesovik V.S., Kharkhadin A.N., Anokhin S.A. On the problem of optimizing the particle size distribution of sand in the production of sandy concrete [K probleme optimizatsii granulometricheskogo sostava peska pri proizvodstve peschanykh betonov. Sbornik tezisov dokladov]. Collection of Abstracts. Tr. Int. Scientific and technical. Conferences. Stary Oskol. pub. MISISI branch, 1999. Pp. 29–31. (rus)
16. Kharkhadin A.N. Effective compositions of aggregate concrete [Effektivnye sostavy zapolnitelya betonog]. Proceeding from universities. Construction.-Novosibirsk.-Pub. NGASU. 1997. No. 5. Pp. 21–25. (rus)

Information about the authors

Lesovik, Ruslan V. DSc, professor. E-mail: ruslan_lesovik@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Tolsto, Alexander D. PhD, Assistant professor. E-mail: tad56@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Albo Ali Wathiq S. Postgraduate student. E-mail: walboali@yahoo.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 44.

Ahmed, Ahmed A.A. Postgraduate student. E-mail: civileng85@yahoo.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 44.

Kharkhardin, Anatoly N. DSc, professor. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Alaskhanov, Arbi K. PhD, Assistant professor. E-mail: alasxanov.arbi@mail.ru. Grozny State Oil Technological University named after Acad. M.D. Millionschikova Chechenia R., Gudermes, st. Groznenskaya, d. 33

Aimenov, Zhambul T. DSc, professor. E-mail: zhambul_ukgu@mail.ru. South Kazakhstan State Technological University named after M. Auezova Kazakhstan R., 160012, Shymkent, Tauhe Khan Ave. 5.

Received 09.12.2019

Для цитирования:

Аль-Бу-Али У.С., Лесовик Р.В., Хархардин А.Н., Толстой А.Д., Ахмед А.А.А., Аласханов А.Х., Айменов Ж.Т. Расчет и подбор зернового состава заполнителя из бетонного лома высокоплотной упаковки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 6. С. 18–28. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-6-18-28

For citation:

Albo Ali W.S., Lesovik R.V., Kharkhardin A.N, Tolstoy A.D., Ahmed A.A.A., Alaskhanov A.K, Aimenov Z.T. Calculation and selection of the high density aggregates from concrete scrap. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 6. Pp. 18–28. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-6-18-28