

УДК 691.32: 691.115

DOI: 10.17277/voprosy.2016.02.pp.038-051

### ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ЦСП ДЛЯ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

**Н. В. Кузнецова, В. А. Езерский**

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов; Белостокский технический университет, г. Белосток, Республика Польша*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор В. П. Ярцев*

**Ключевые слова:** отходы производства цементно-стружечных плит; ресурсосбережение; физико-механические характеристики; цементные композиты.

**Аннотация:** Рассмотрена возможность использования отходов производства цементно-стружечных плит в качестве добавки в цементно-песчаных композитах. Для различных составов мелкозернистых бетонов, приготовленных в соответствии с симплекс-решетчатым планом эксперимента, исследованы прочность на сжатие и изгиб, расход воды на затворение смеси и плотность образцов в зависимости от смесевых факторов твердой фазы. Для практических целей, связанных с утилизацией отходов цементно-стружечных плит и повышением свойств получаемых цементных композитов, построены математические модели и с их помощью установлены оптимальные соотношения компонентов в смеси.

### Введение

Перспективным направлением развития строительной индустрии Центрально-Черноземного региона (ЦЧР) является разработка и внедрение конкурентоспособных технологий производства бетонных изделий.

---

Кузнецова Наталия Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Архитектура и строительство зданий», e-mail: nata-kus@mail.ru, ТамбГТУ, г. Тамбов; Езерский Валерий Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Основы строительства и строительная физика», Белостокский технический университет, г. Белосток, Республика Польша.

Снижение себестоимости изделий при сохранении требуемых строительнотехнических качеств может быть достигнуто за счет применения местных эффективных заполнителей, снижения материало- и энергоемкости производства, сокращения трудозатрат.

Учитывая возможности и особенности строительной индустрии ЦЧР, характеризующиеся дефицитом качественных заполнителей для бетонов, актуальной задачей является разработка рецептур многокомпонентных мелкозернистых бетонов при минимуме ресурсоемкости производства. При этом крайне целесообразно использование в качестве добавок техногенных отходов, что позволит одновременно с решением проблем местной строительной индустрии также решать эколого-экономические задачи.

Одним из видов отходов, образующихся на предприятиях строительной индустрии региона, производящих цементно-стружечные плиты (ЦСП), является древесно-цементный порошок, который накапливается в значительных количествах и создает большие проблемы для предприятий-производителей, так как хранение, перемещение и утилизация или складирование этих отходов требуют значительных материальных затрат и площадей.

В настоящей работе приводится анализ возможности использования отходов производства ЦСП в качестве добавки в цементно-песчаных композитах, обоснованный результатами экспериментальных исследований и разработанными математическими моделями зависимостей физикомеханических свойств полученного материала от смесевых факторов, а также выполненной оптимизацией смесового состава материала с добавкой отходов ЦСП по критерию прочности.

Цементно-стружечные плиты являются достаточно востребованным строительным материалом благодаря своим физико-механическим характеристикам и невысокой стоимости. Высокие эксплуатационные качества плит определяют широкую область их применения: в качестве обшивок стеновых панелей в каркасно-щитовом домостроении, как элемент перегородок, полов и перекрытий, для изготовления опалубки и т.д. Только в Тамбовской области годовой объем производства ЦСП превышает 50 тыс. м<sup>3</sup> [1].

В процессе изготовления плит на предприятиях образуется большое количество древесно-цементного порошка различных фракций, доля которого составляет 5 – 10 % от общего объема производства ЦСП. Основная масса отходов образуется на этапе обрезки неровных краев готовых плит. Получившиеся обрезки дробят и удаляют из зоны производства. Насыпная плотность порошка составляет около 650 кг/м<sup>3</sup>. Гранулометрический состав порошка представлен следующими фракциями: свыше 1 мм – 7 %; свыше 0,63 мм – 4 %; свыше 0,32 мм – 81 %; свыше 0,16 мм – 8 %.

Цементно-стружечные плиты изготавливаются методом полусухого прессования смеси на основе портландцемента. Компонентами, составляющими смесь для прессования плит, являются: портландцемент – 65 %; древесная стружка – 24 %; вода – 8,5 %; гидратационные добавки (силикат натрия и др.) – 2,5 % [2].

Учитывая, что в составе смеси для ЦСП преобладает минеральный компонент, имелись основания предполагать, что отходы производства плит можно использовать в качестве заполнителя к цементным компози-

там. При этом планировалось, что перед введением в смесь композита отходы ЦСП будут подвергаться измельчению в шаровой вибровращательной мельнице. Благодаря измельчению цемент, содержащийся в отходах, в результате механоактивации может частично восстановить свою реакционную способность и будет положительно влиять на прочность цементного композита с добавкой отходов.

Оценка возможности использования отходов производства ЦСП в качестве добавки к цементным композитам, а также оптимизация параметров смесового состава твердой фазы материала с добавкой по критерию прочности являются целью данного исследования.

### Постановка задачи и выбор плана эксперимента

В соответствии с принятой целью исследования 28-дневную прочность на центральное сжатие  $R_{сж}$ , МПа (отклик  $Y_1$ ), и изгиб  $R_{и}$ , МПа (отклик  $Y_2$ ), расход воды для затворения сухой смеси всех компонентов до состояния равной подвижности  $w$ , в кг/1 кг массы сухой смеси всех компонентов (отклик  $Y_3$ ), а также плотность  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> (отклик  $Y_4$ ), изготовленных бетонных образцов исследовали экспериментально в зависимости от трех факторов, характеризующих удельный вес в смеси выбранных компонентов твердой фазы: цемент (фактор  $z_1$ ), песок (фактор  $z_2$ ) и добавка отходов ЦСП (фактор  $z_3$ ).

Эксперимент реализован в соответствии с симплекс-решетчатым планом типа «состав – свойство» для трех переменных, включающим  $N = 7$  опытов (табл. 1) [3]. Этот план предусматривает определенный порядок реализации измерений и разработку математической модели в виде неполного полинома третьей степени для переменных  $z_1, z_2, z_3$

$$\hat{Y}_i = a_1z_1 + a_2z_2 + a_3z_3 + a_{12}z_1z_2 + a_{13}z_1z_3 + a_{23}z_2z_3 + a_{123}z_1z_2z_3. \quad (1)$$

В каждой точке такого плана должно выполняться условие [3]:

$$z_1 + z_2 + z_3 = 1. \quad (2)$$

Используя полученную по результатам измерений модель (1), предполагалось выполнить поиск оптимальных значений рассматриваемых факторов (удельного веса каждого из трех компонентов твердой фазы), обеспечивающих наивысшую прочность исследуемых образцов.

Таблица 1

#### План эксперимента и уровни изменения рассматриваемых факторов

№ точки	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	1	0	0	0,333	0,333	0,333
2	0	1	0	0,25	0,75	0
3	0	0	1	0,143	0	0,857
4	0,5	0,5	0	0,2915	0,5415	0,167
5	0,5	0	0,5	0,2385	0,1665	0,595
6	0	0,5	0,5	0,1965	0,375	0,4285
7	0,333	0,333	0,333	0,242	0,361	0,397
8*	0,2	0,35	0,45	0,219	0,329	0,452

В выбранном плане каждый из факторов  $z_1, z_2, z_3$  рекомендуется рассматривать на четырех уровнях: 0; 0,333; 0,5; 1. Последнее условие не отвечало принятой цели исследования, поскольку не имело смысла и было невозможно выполнить исследование в полном диапазоне изменения удельных весов выбранных компонентов (от 0 до 1). Практическое значение имели лишь такие пределы изменения факторов, которые отвечали реальным составам смесей на базе цемента. По этой причине при реализации эксперимента использовано локальное симплексное планирование в условиях ограничения предела изменения всех выбранных факторов [4].

На основе результатов пробных опытов была выбрана подобласть факторного пространства, охватывающая предпочтительные составы смесей, которая характеризовалась следующими координатами вершин:  $A_1$  ( $x_1 = 0,333$ ;  $x_2 = 0,333$ ;  $x_3 = 0,333$ );  $A_2$  ( $x_1 = 0,25$ ;  $x_2 = 0,75$ ;  $x_3 = 0$ );  $A_3$  ( $x_1 = 0,143$ ;  $x_2 = 0$ ;  $x_3 = 0,857$ ). В выбранной подобласти фактические значения удельного веса компонентов  $x_i$  изменялись в пределах: цемент  $x_1 - 0,143 \dots 0,333$ ; песок  $x_2 - 0 \dots 0,75$ ; отходы ЦСП  $x_3 - 0 \dots 0,857$ . Такие пределы изменения факторов имело смысл исследовать при оценке влияния удельного веса компонентов на свойства композита.

Описанная выше подобласть была трансформирована до полного симплексного плана через введение псевдофакторов  $z_1, z_2, z_3$ , которые в каждой  $u$ -й точке плана были связаны с натуральными факторами  $x_1, x_2, x_3$  зависимостью [4]

$$x_i^{(u)} = x_i^{(1)} + z_2^{(u)}(x_i^{(2)} - x_i^{(1)}) + z_3^{(u)}(x_i^{(3)} - x_i^{(1)}). \quad (3)$$

Уровни изменения факторов  $z_1, z_2, z_3$  и соответствующих им натуральных факторов  $x_1, x_2, x_3$  представлены в табл. 1.

После получения результатов испытаний и выполнения необходимых расчетов представлялось возможным построить математические модели исследуемых свойств в зависимости от псевдофакторов  $z_1, z_2, z_3$ . При желании получить модели с факторами в натуральном виде  $x_1, x_2, x_3$ , следует их декодировать с помощью соответствующих зависимостей.

В каждой точке плана выполнялись повторные измерения на шести (для откликов  $Y_1$ ) или трех образцах (для откликов  $Y_2, Y_3$  и  $Y_4$ ). Число повторений было обосновано данными предварительных испытаний образцов. Число испытаний образцов в исследовании с учетом дополнительной точки  $8^*$  вне плана для получения результатов, необходимых для оценки адекватности модели, составило 48. В процессе реализации плана эксперимента при выборе последовательности испытаний образцов учитывались принципы рандомизации [5].

### **Использованные материалы и методика исследования**

При изготовлении образцов в качестве добавки в цементную смесь использовался тонкодисперсный порошок отходов ЦСП ОАО «ТАМАК». Предварительно отходы измельчались в шаровой мельнице в течение 30 мин. Измельченные отходы имели крупность частиц 0,05 мм и мельче. Количество вводимых отходов принималось от 0 до 85,7 % в соответствии с планом эксперимента, что обеспечивало предельное соотношение отходов: цемент до 6:1.

В качестве заполнителя использовался кварцевый песок с модулем крупности 1,8 согласно ГОСТ 8736–93 из местного месторождения (п. Красненькое Тамбовской области). Количество вводимого песка принималось от 0 до 75,0 % в соответствии с планом эксперимента, что обеспечивало предельное соотношение цемент: песок до 1:3. В качестве вяжущего использован портландцемент марки 500 ОАО «Себряковцемент» (г. Михайловка Волгоградской обл.).

В процессе приготовления цементно-песчаных смесей количество воды принималось в объеме, обеспечивающем равноподвижность смесей для выбранных составов во всех точках плана. Количество воды для затворения фиксировалось. Воду использовали водопроводную. Затворенная смесь после формования подвергалась уплотнению на вибростоле в течение 30 с.

Для проведения испытаний на центральное сжатие и изгиб изготовлены образцы в форме балочек 40×40×160 мм по шесть образцов-дублеров в каждой партии. Для определения плотности изготовлены образцы в форме кубиков размером 50×50×50 мм по три образца-дублера в каждой партии. Затворенная смесь после формования подвергалась уплотнению на вибростоле в течение 30 с. Спустя 24 ч образцы вынимались из форм и твердение продолжалось в камере при температуре  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , влажности воздуха  $(90 \pm 5)\%$  в течение 27 суток.

Экспериментальное определение прочности образцов на центральное сжатие и изгиб, а также плотности выполнялось согласно методикам ГОСТ 10180–2012.

### Результаты исследования и построение математических моделей

Предварительный анализ результатов исследования  $\bar{Y}_{1i}, \bar{Y}_{2i}, \bar{Y}_{3i}, \bar{Y}_{4i}$  (табл. 2) выявил, что имеется разброс значений  $\bar{Y}_{ij}$  как в отдельных опытах, так и повторных измерениях.

Таблица 2

План эксперимента, дисперсии  
и результаты измерений  $\bar{Y}_{1i}, \bar{Y}_{2i}, \bar{Y}_{3i}, \bar{Y}_{4i}$

№	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$\bar{Y}_{1i}$ , МПа	$S_{01i}^2$	$\bar{Y}_{2i}$ , МПа	$S_{02i}^2$	$\bar{Y}_{3i}$ , кг/кг	$S_{03i}^2$	$\bar{Y}_{4i}$ , кг/м <sup>3</sup>	$S_{04i}^2$
1	1	0	0	9,810	0,6479	0,325	0,0225	0,205	0,0027	1549,48	140,4060
2	0	1	0	22,070	6,9964	0,523	0,0095	0,121	0,0378	2032,55	265,1424
3	0	0	1	7,579	1,2000	0,289	0,0179	0,349	0,0161	1416,67	130,3124
4	0,5	0,5	0	15,743	8,1830	0,448	0,0402	0,181	0,0036	1690,10	64,9446
5	0,5	0	0,5	10,770	1,5490	0,350	0,0179	0,320	0,0224	1585,94	135,2046
6	0	0,5	0,5	11,593	4,7000	0,369	0,0042	0,275	0,0206	1598,96	132,4268
7	0,333	0,333	0,333	15,509	0,5680	0,335	0,0011	0,228	0,0082	1585,94	122,9368
8*	0,2	0,35	0,45	12,095	1,6600	0,263	0,0018	0,289	0,0091	1588,96	81,5393

$$S_{01i}^2 = 2,5300; \quad S_{02i}^2 = 0,1310; \quad S_{03i}^2 = 0,0159 \quad S_{04i}^2 = 180,6181$$

Проверка однородности оценок дисперсий повторных опытов  $S_{oji}^2$  с использованием критерия Кохрена [5] показала, что при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  расчетные значения критерия (для  $S_{01i}^2 - G_{01} = 0,2685$ ;  $S_{02i}^2 - G_{02} = 0,2532$ ;  $S_{03i}^2 - G_{03} = 0,3393$ ;  $S_{04i}^2 - G_{04} = 0,1970$ ) оказались меньше критических значений:  $G_{kr(1); 0,05; 5; 7} = 0,3974$  и  $G_{kr(2,3,4); 0,05; 2; 7} = 0,5612$  [5]. Следовательно дисперсии опытов можно принять однородными, а дисперсии воспроизводимости в экспериментах могут быть рассчитаны как средние величины:  $S_{01}^2 = 2,5300$  (при числе степеней свободы  $\nu = 35$ );  $S_{02}^2 = 0,1310$ ;  $S_{03}^2 = 0,0159$ ;  $S_{04}^2 = 180,6181$  (при числе степеней свободы  $\nu = 14$ ).

На основе результатов экспериментов (см. табл. 2) с помощью формул, приведенных в [3], разработаны зависимости  $Y_i = f(z_1, z_2, z_3)$ :

– для прочности на центральное сжатие

$$\hat{Y}_1 = 9,810 z_1 + 22,070 z_2 + 7,579 z_3 - 0,790 z_1 z_2 + 8,302 z_1 z_3 - 12,920 z_2 z_3 + 79,904 z_1 z_2 z_3; \quad (4)$$

– прочности на изгиб

$$\hat{Y}_2 = 0,325 z_1 + 0,523 z_2 + 0,289 z_3 + 0,096 z_1 z_2 + 0,172 z_1 z_3 - 0,148 z_2 z_3 - 1,548 z_1 z_2 z_3; \quad (5)$$

– расхода воды на затворение

$$\hat{Y}_3 = 0,205 z_1 + 0,121 z_2 + 0,349 z_3 + 0,072 z_1 z_2 + 0,172 z_1 z_3 + 0,160 z_2 z_3 - 1,131 z_1 z_2 z_3; \quad (6)$$

– плотности

$$\hat{Y}_4 = 1549,48 z_1 + 2032,55 z_2 + 1416,67 z_3 - 403,66 z_1 z_2 + 411,46 z_1 z_3 - 502,60 z_2 z_3 - 683,52 z_1 z_2 z_3. \quad (7)$$

Проверка адекватности рассчитанных моделей выполнена с помощью критерия Стьюдента [3] с использованием данных измерений в дополнительной точке 8\*. Значения  $\bar{Y}_{18}$ ,  $\bar{Y}_{28}$ ,  $\bar{Y}_{38}$ ,  $\bar{Y}_{48}$ , полученные в этой точке, и дисперсии неточности измерений в экспериментах  $S_{01}^2$ ,  $S_{02}^2$ ,  $S_{03}^2$ ,  $S_{04}^2$  показаны в табл. 2, а рассчитанные значения по моделям (4) – (7) для соответствующих значений факторов составили:  $\hat{Y}_{18} = 14,466$ ;  $\hat{Y}_{28} = 0,331$ ;  $\hat{Y}_{38} = 0,250$ ;  $\hat{Y}_{48} = 1566,93$ . Дисперсии предсказанных значений для каждой из функций, рассчитанные согласно [3], составили:  $S_{\hat{Y}_1}^2 = 0,3373$ ;  $S_{\hat{Y}_2}^2 = 0,0349$ ;  $S_{\hat{Y}_3}^2 = 0,0011$ ;  $S_{\hat{Y}_4}^2 = 48,1644$ . По данным, полученным в точке 8\*, рассчитаны значения  $t$ -критерия для каждой из четырех функций:

$$t_1 = (\bar{Y}_{18} - \hat{Y}_{18}) / (S_{01}^2 + S_{\hat{Y}_1}^2)^{0,5} = (12,095 - 14,466) / (2,5300 + 0,3373)^{0,5} = 1,4002;$$

$$t_2 = (\bar{Y}_{28} - \hat{Y}_{28}) / (S_{02}^2 + S_{\hat{Y}_2}^2)^{0,5} = (0,263 - 0,331) / (0,1310 + 0,0349)^{0,5} = 0,1669;$$

$$t_3 = (\bar{Y}_{38} - \hat{Y}_{38}) / (S_{03}^2 + S_{\hat{Y}_3}^2)^{0,5} = (0,289 - 0,250) / (0,0159 + 0,0011)^{0,5} = 0,2991;$$

$$t_4 = (\bar{Y}_{48} - \hat{Y}_{48}) / (S_{04}^2 + S_{\hat{Y}_4}^2)^{0,5} = (1588,96 - 1566,93) / (180,6181 + 48,1644)^{0,5} = 1,4560.$$

Значения  $t_1, t_2, t_3, t_4$  сравнивались с критическим значением  $t$ -критерия. При уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $\nu = 7$  его значение равно  $t = 1,90$  [5]. Поскольку  $t_1, t_2, t_3, t_4$  не превысили критического значения, то адекватность моделей (4) – (7) была подтверждена и они признаны пригодными для дальнейшего анализа.

Для практического использования полученных моделей выполнено декодирование через подстановку в них зависимостей между натуральными и псевдофакторами. Для перевода координат из одной аффинной системы в другую использованы формулы [6]:

$$z_1 = z_1^{(1)} + x_2(z_1^{(2)} - z_1^{(1)}) + x_3(z_1^{(3)} - z_1^{(1)}); \quad (8)$$

$$z_2 = z_2^{(1)} + x_2(z_2^{(2)} - z_2^{(1)}) + x_3(z_2^{(3)} - z_2^{(1)}); \quad (9)$$

$$z_3 = z_3^{(1)} + x_2(z_3^{(2)} - z_3^{(1)}) + x_3(z_3^{(3)} - z_3^{(1)}). \quad (10)$$

Зависимости между натуральными и псевдофакторами имеют вид:

$$z_1 = 6,0035 - 8,0047 x_2 - 7,0053 x_3; \quad (11)$$

$$z_2 = -2,6680 + 4,8906 x_2 + 3,1132 x_3; \quad (12)$$

$$z_3 = -2,3356 + 3,1141 x_2 + 3,8921 x_3. \quad (13)$$

В результате декодирования получены уравнения регрессии в натуральных координатах:

– для прочности на центральное сжатие

$$\hat{Y}_1 = -458,09 x_1 + 33,95 x_2 - 15,10 x_3 + 592,68 x_1 x_2 + 701,99 x_1 x_3 - 272,56 x_2 x_3 + 1151,47 x_1 x_2 x_3; \quad (14)$$

– прочности на изгиб

$$\hat{Y}_2 = -0,026 x_1 - 0,803 x_2 + 0,047 x_3 + 6,040 x_1 x_2 + 2,059 x_1 x_3 + 4,617 x_2 x_3 - 22,320 x_1 x_2 x_3; \quad (15)$$

– расхода воды на затворение сухой смеси

$$\hat{Y}_3 = 1,152 x_1 - 0,612 x_2 + 0,278 x_3 + 1,557 x_1 x_2 - 0,441 x_1 x_3 + 3,711 x_2 x_3 - 16,310 x_1 x_2 x_3; \quad (16)$$

– плотности

$$\hat{Y}_4 = 327,26 x_1 + 2544,04 x_2 + 793,73 x_3 + 227,76 x_1 x_2 + 5627,42 x_1 x_3 + 380,511 x_2 x_3 - 9856,86 x_1 x_2 x_3. \quad (17)$$

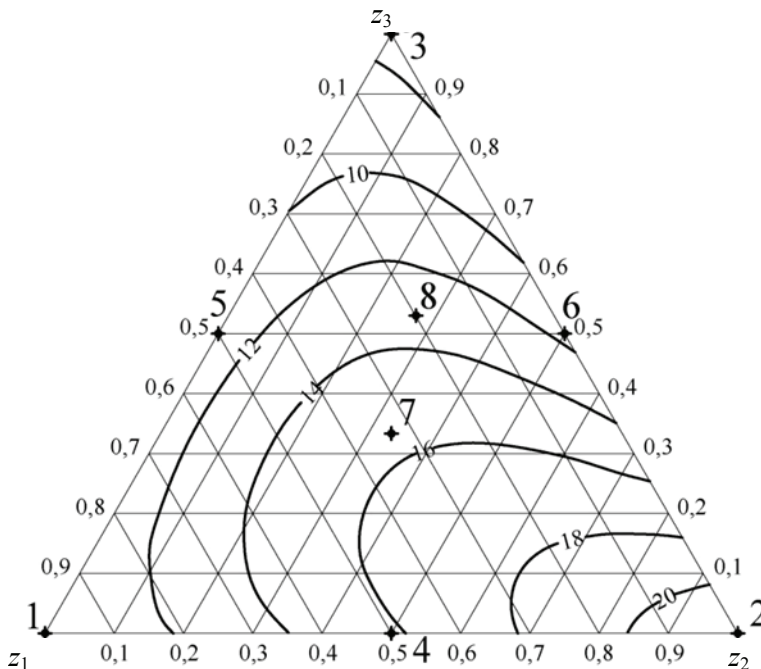
В таком виде математические модели (14) – (17) удобно использовать для прогнозирования исследованных свойств и числового управления в технологических процессах, помня о выполнении условия  $x_1 + x_2 + x_3 = 1$  также для натуральных значений факторов. Однако для интерпретации результатов исследования использованы модели (4) – (7), на основе которых разработаны графики в виде изолиний исследованных зависимостей в координатах псевдофакторов  $z_1, z_2, z_3$  (рис. 1 – 4). Эти модели позволили увеличить исследуемое факторное пространство до полных симплексных треугольников, значительно облегчая интерпретацию результатов. В то же время физическая интерпретация выполнена с использованием натуральных координат  $x_1, x_2, x_3$ , опираясь на табл. 1 и 2.



## Анализ результатов исследования

*Прочность на центральное сжатие бетонных образцов.* Из рисунка 1 следует, что наивысшая прочность на центральное сжатие  $Y_1$  бетонных образцов, составляющая около 22 МПа, получена в вершине  $z_2$  при содержании компонентов в смеси: цемента  $x_1 = 0,25$  и песка  $x_2 = 0,75$  без включения добавки отходов ЦСП. Данный результат можно объяснить тем, что для этой точки принято традиционно рекомендуемое соотношение цемент : песок = 1:3 без добавки. Во всем остальном факторном пространстве, в каждой точке которого в смесь вводилась добавка отходов ЦСП, значения прочности снижались. Этот факт свидетельствует о негативном влиянии данной добавки на прочность бетонных образцов. При движении из точки  $z_2$  в  $z_1$  увеличивается содержание цемента (с 0,25 до 0,333) и добавки (с 0 до 0,333) при одновременном снижении содержания песка с 0,75 до 0,333. В результате имеет место почти равномерное снижение прочности на сжатие с 22 до 10 МПа.

Наименьшая прочность на центральное сжатие  $Y_1$  бетонных образцов, составляющая около 7,5 МПа, получена в точке  $z_3$  при содержании двух компонентов в смеси: цемента –  $x_1 = 0,143$  и отходов ЦСП –  $x_3 = 0,857$ . При движении из точки  $z_2$  в  $z_3$  уменьшается содержание цемента (с 0,25 до 0,143) и песка (с 0,75 до 0) при одновременном увеличении добавки с 0 до 0,857. В результате прочность на сжатие снижается наиболее значительно – в 2,9 раза. При движении из точки  $z_1$  в  $z_3$  происходит одновременное уменьшение содержания цемента от 0,333 до 0,143 и песка от 0,333 до 0 при увеличении добавки, наоборот, от 0,333 до 0,857. С учетом этого



**Рис. 1. Прочность на центральное сжатие  $Y_1$  бетонных образцов в зависимости от содержания составляющих в координатах псевдофакторов:**  
 $z_1$  – цемент,  $z_2$  – песок,  $z_3$  – добавка отходов ЦСП



замечено, что в результате замены части цемента и песка на отходы ЦСП прочность на центральное сжатие  $Y_1$  бетонных образцов колеблется на уровне 10...11 МПа, достигая наивысших значений около 11 МПа в середине отрезка  $z_1z_3$ , соответствующей содержанию цемента – 0,238; песка – 0,167; добавки ЦСП – 0,595. Полная же замена песка на отходы ЦСП дает наименьшую среди выявленных значений прочность образцов – около 7,5 МПа.

На изолиниях, показанных на рис. 1, выделяется направление, для которого характерна наименьшая скорость снижения прочности на сжатие. Это направление совпадает с прямой через точки 2, 7, 5 или медианой из вершины  $z_2$  к стороне  $z_1z_3$  симплексного треугольника. Особенно выделяется окрестность точки 7. Сравнивая составы смесей в точках 2 и 7 отметим, что содержание цемента в них практически одинаково и составляет около 0,25. В то же время в точке 7 половина песка, содержащегося в смеси в точке 2 ( $x_2 = 0,75$ ), заменена на отходы ЦСП ( $x_2 = 0,361$ ;  $x_3 = 0,397$ ). Эта замена вызвала снижение прочности на сжатие материала с 22,07 до 15,51 МПа, то есть на 29,7 %. Несложный расчет позволил установить, что при содержании цемента в смеси на уровне 0,25 на каждый процент вводимой в смесь вместо песка добавки отходов ЦСП приходится 0,75 % потери прочности на сжатие материала с добавкой.

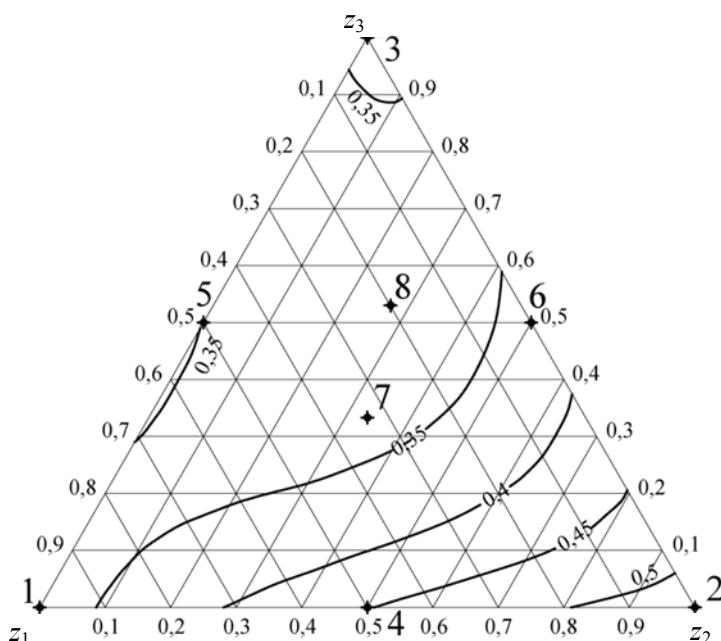
Данное направление на графике, и в частности отрезок 2 – 7 на рис. 1, является предпочтительным для получения ответа на вопрос о возможности использования отходов ЦСП в цементных композитах. Сохраняя содержание цемента в смеси на уровне 0,25 можно принимать решение о включении добавки, предварительно оценив возможные потери прочности материала. При этом точка 7 с содержанием компонентов: цемента – 0,242; песка – 0,361; добавки отходов ЦСП – 0,397, в которой по сравнению с точкой 2 половина песка заменена добавкой отходов ЦСП, очевидно может рассматриваться как базовая для дальнейших исследований по модификации состава другими добавками в целях повышения прочности бетона с добавкой отходов ЦСП.

Таким образом, выяснилось, что использование отходов ЦСП в качестве добавки для цементных композитов, вытекающее из необходимости их утилизации или частичной замены ими песка, при отсутствии модификации композита другими добавками всегда связано с потерей прочности материала с добавкой отходов ЦСП.

Не подтвердилась выдвигаемая гипотеза о возможном влиянии механической активации отходов на восстановление реакционной способности содержащегося в них цемента и его положительной роли в упрочнении композита с добавкой отходов ЦСП. Потери прочности цементного композита при введении этой добавки очевидно можно объяснить невозможностью создания плотной и прочной структуры материала из-за содержания в добавке органической составляющей, а именно частиц древесной пыли.

Оптимизируя параметры смеси в данной ситуации следует принимать компромиссное решение, сопоставляя возможные потери прочности материала и выигрыш от утилизации и/или замены части песка отходами.

*Прочность на изгиб бетонных образцов.* Из рисунка 2 следует, что наивысшая прочность на изгиб  $Y_2$  бетонных образцов, составляющая 0,523 МПа, получена в вершине  $z_2$  при содержании компонентов в смеси: цемента



**Рис. 2. Прочность на изгиб  $Y_2$  бетонных образцов в зависимости от содержания составляющих в координатах псевдофакторов:**  
 $z_1$  – цемент,  $z_2$  – песок,  $z_3$  – добавка отходов ЦСП

$x_1 = 0,25$  и песка  $x_2 = 0,75$  без включения добавки отходов ЦСП. Такой результат можно объяснить отсутствием в смеси добавки и оптимального соотношения цемент : песок = 1:3. Во всем остальном факторном пространстве, в каждой точке которого в смесь вводилась добавка, значения прочности на изгиб снижались, что также свидетельствует о негативном влиянии данной добавки и на прочность на изгиб бетонных образцов.

При движении из точки  $z_2$  в  $z_1$  увеличивается содержание цемента (с 0,25 до 0,333) и добавки (с 0 до 0,333) при одновременном снижении содержания песка с 0,75 до 0,333. В результате имеет место почти равномерное снижение прочности на изгиб с 0,52 до 0,32 МПа.

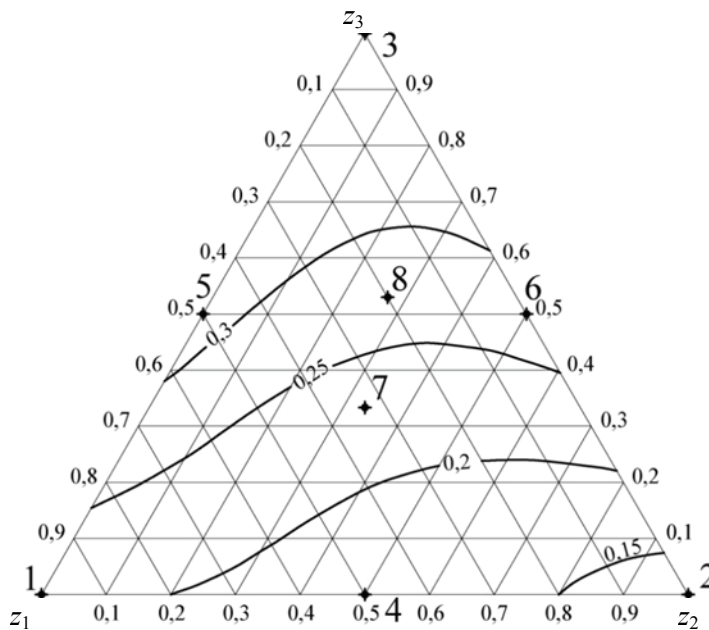
Двигаясь из точки  $z_1$  в  $z_3$ , происходит одновременное уменьшение содержания цемента от 0,333 до 0,143 и песка от 0,333 до 0 при увеличении добавки, наоборот, от 0,333 до 0,857. В результате замены части цемента и песка на отходы ЦСП прочность на изгиб в средней части отрезка  $z_1 z_3$  (в окрестности точки 5) остается примерно одинаковой – 0,34...0,35 МПа. При снижении соотношения цемент:(песок+отходы ЦСП) с 1:2 (в точке 1) до 1:6 (в точке 3) наблюдается снижения прочности на изгиб до минимального значения – 0,289 МПа.

Перемещаясь в направлении от точки 2 (содержание цемента – 0,25; песка – 0,75; отходов ЦСП – 0) к точке 7 (содержание цемента – 0,242; песка – 0,361; отходов ЦСП – 0,397), наблюдается практически линейное снижение прочности образцов на изгиб с 0,52 до 0,34 МПа, то есть в 1,65 раза. На отрезке от точки 7 до точки 5 снижение прочности образцов на изгиб существенно замедляется.

*Расход воды для затворения сухих смесей компонентов.* Из рисунка 3 следует, что наибольший расход воды на затворение смеси  $Y_3$ , составляющий 0,349 кг/1 кг смеси, наблюдается в вершине  $z_3$  при содержании компонентов в смеси: цемента – 0,143; песка – 0; отходов ЦСП – 0,857. Такой результат можно было ожидать, так как вместе с цементным порошком в отходах ЦСП содержится около 24 % древесных частиц, которые в первую очередь способны увеличить водопотребление смеси. Кроме того, повышенная водопотребность также характерна для рециклинговых цементно-песчаных материалов. Именно эти две причины способствовали обеспечению повышения расхода воды на затворение смеси как в точке 3 (вершине  $z_3$ ), так и в других точках, в которых вводилась добавка отходов ЦСП.

Во всем остальном факторном пространстве, в каждой точке которого в смесь вводился мелкий заполнитель (песок), и уменьшалось содержание добавки отходов ЦСП, значения водопотребности заметно снижались. Минимальное водопотребление наблюдалось в точке 2 и составило 0,121 кг/1 кг смеси.

При движении из точки  $z_2$  в  $z_3$  уменьшалось содержание цемента – с 0,25 до 0,143; содержание песка уменьшалось от 0,75 до 0, а отходов ЦСП – увеличивалось от 0 до 0,857, при этом наблюдалось повышение водопотребности смеси с 0,121 до 0,349 кг/1 кг смеси, то есть в 2,88 раза. На отрезке от точки  $z_2$  до  $z_1$ , для которого характерно небольшое увеличение содержания цемента – с 0,25 до 0,333 и добавки – с 0 до 0,333 при одновременном снижении содержания песка – с 0,75 до 0,333, имеет место более слабое повышение водопотребности смеси – с 0,121 до 0,205 кг/1 кг смеси, то есть увеличение в 1,69 раза.



**Рис. 3.** Расход воды для затворения  $Y_3$  бетонных образцов в зависимости от содержания составляющих в координатах псевдофакторов:

$z_1$  – цемент,  $z_2$  – песок,  $z_3$  – добавка отходов ЦСП

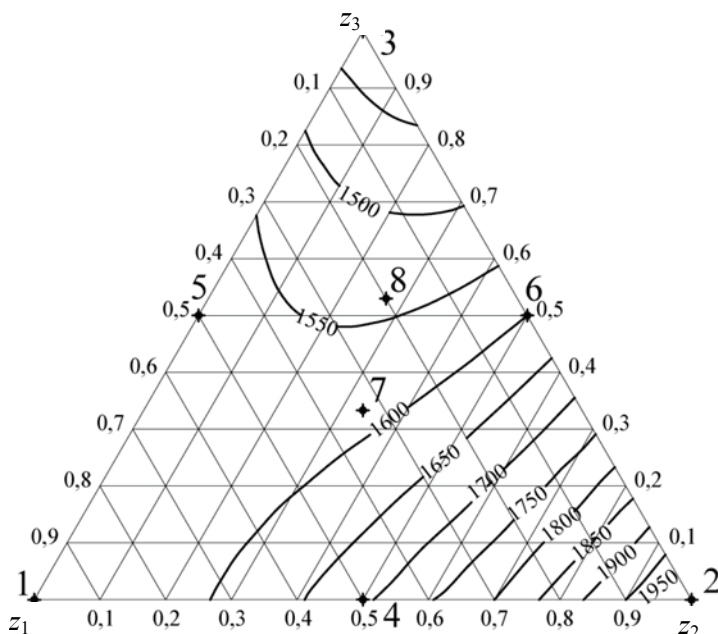
При движении из точки  $z_1$  в  $z_3$  происходит одновременное уменьшение содержания цемента – от 0,333 до 0,143 и песка – от 0,333 до 0 при увеличении добавки, наоборот, – от 0,333 до 0,857. В результате замены части цемента и песка на отходы ЦСП наблюдается дальнейший рост водопотребления до максимального значения в точке 3.

Сравнивая рисунки 1 – 3 можно заметить устойчивую корреляцию между снижением прочности образцов на центральное сжатие и изгиб и увеличением водопотребления смеси. Это еще раз подтверждает значительную роль древесных частиц в снижении прочностных характеристик с одновременным повышением водопотребления смеси.

**Плотность бетонных образцов.** Из рисунка 4 следует, что наивысшая плотность  $Y_4$  полученных образцов, составляющая около  $2032 \text{ кг/м}^3$ , представлена в вершине  $z_2$  при содержании компонентов в смеси: цемента – 0,25 и песка – 0,75 без включения добавки отходов ЦСП. Введение отходов ЦСП приводит к снижению плотности образцов, что обусловлено малой насыпной плотностью отходов – около  $650 \text{ кг/м}^3$ , которая без сомнений и в первую очередь связана с наличием в отходах древесных частиц.

При движении из точки  $z_2$  в  $z_1$  увеличивается содержание цемента – с 0,25 до 0,333 и добавки – с 0 до 0,333 при одновременном снижении содержания песка – с 0,75 до 0,333. В результате имеет место снижение плотности образцов с 2032 до  $1549 \text{ кг/м}^3$ .

Наименьшая плотность образцов, составляющая около  $1416 \text{ кг/м}^3$ , получена в точке  $z_3$  при содержании компонентов в смеси: цемента – 0,143 и отходов ЦСП – 0,857. При движении из точки  $z_2$  в  $z_3$  уменьшается содержание цемента – с 0,25 до 0,143 и песка – с 0,75 до 0 при одновременном увеличении добавки – с 0 до 0,857. В результате плотность снижается наиболее значительно – на 30,3 %.



**Рис. 4. Плотность  $Y_4$  бетонных образцов в зависимости от содержания составляющих в координатах псевдофакторов:**  
 $z_1$  – цемент,  $z_2$  – песок,  $z_3$  – добавка отходов ЦСП

При движении из точки  $z_1$  в  $z_3$  при уменьшении содержания цемента – от 0,333 до 0,143 и песка – от 0,333 до 0 с одновременным увеличением добавки отходов ЦСП – от 0,333 до 0,857 снижение плотности имеет более плавный характер: с 1549 кг/м<sup>3</sup> в точке 1 до 1416 кг/м<sup>3</sup> в точке 3, то есть снижение на 8,6 %. Наибольшее снижение плотности образцов наблюдается при движении от точки 2 (2032 кг/м<sup>3</sup>) к точке 7 (1585 кг/м<sup>3</sup>), то есть при замене половины песка на половину отходов ЦСП при неизменном содержании цемента около 0,25 плотность образцов снизилась на 22 %.

Отметим, что на приведенных рисунках выявлена достаточно тесная связь между снижением плотности образцов, обусловленной наличием древесных частиц и повышением расхода воды на затворение и снижением их прочности на центральное сжатие и изгиб.

### Выводы

Результаты проведенного исследования, а также анализ математических моделей и графиков, позволили сделать следующие выводы:

1) при исследовании бетонных образцов в виде балочек размерами 40×40×160 мм после 28 дней твердения, выполненных из цемента, песка и отходов ЦСП, установлено снижение их прочности на центральное сжатие и изгиб, повышение расхода воды на затворение смеси и снижение плотности образцов по сравнению с образцами, приготовленными из цемента и песка без добавки отходов ЦСП;

2) разработанные математические модели и построенные по ним графики выявили тесную связь между исследованными свойствами и содержанием добавки в смеси. Выявленные эффекты целиком и полностью объясняются наличием древесных частиц в отходах ЦСП;

3) при необходимости решения проблемы утилизации отходов ЦСП путем их использования в цементных композитах в целях частичной замены ими песка следует учитывать, что для компенсации потерь прочностных характеристик материала требуется его модификация другими добавками, улучшающими свойства смеси и упрочняющими структуру материала с добавкой отходов ЦСП.

Определена базовая точка для дальнейших исследований по модификации цементного композита с добавкой отходов ЦСП, которой соответствует состав: цемент – 0,237; песок – 0,422; отходы ЦСП – 0,341. В этой точке выполнена замена песка в смеси примерно на 50 % отходами ЦСП (положительный эффект с учетом возможности утилизации отходов), однако при этом выявлено снижение прочности на центральное сжатие образцов на 30 % (отрицательный эффект с учетом снижения качества материала).

#### *Список литературы*

1. О компании ЗАО «ТАМАК» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tamak.ru/about/> (дата обращения: 19.03.2016).

2. Мельникова, Л. В. Технология композиционных материалов из древесины / Л. В. Мельникова. – М. : МГУЛ, 2004. – 234 с.

3. Таблицы планов эксперимента. Для факторных и полиномиальных моделей. Справочное издание / В. З. Бродский [и др.]. – М. : Металлургия, 1982. – 752 с.

4. Зедгинидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгинидзе. – М. : Наука, 1976. – 390 с.
5. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск : Изд-во БГУ им. В. И. Ленина, 1982. – 302 с.

#### *References*

1. <http://www.tamak.ru/about/> (accessed 19 March 2016). (In Russ.)
  2. Mel'nikova L.V. *Tekhnologiya kompozitsionnykh materialov iz drevesiny* [The technology of wood composite materials], Moscow: MGUL, 2004, 234 p. (In Russ.)
  3. Brodskii V.Z., Brodskii L.I., Golikova T.I., Nikitina E.P., Panchenko A.A. *Tablitsy planov eksperimenta. Dlya faktornykh i polinomial'nykh modelei. Spravochnoe izdanie* [Tables of experimental designs. For factorial and polynomial models. Reference book], Moscow: Metallurgiya, 1982, 752 p. (In Russ.)
  4. Zedginidze I.G. *Planirovanie eksperimenta dlya issledovaniya mnogokomponentnykh sistem* [Experimental Design for the study of multicomponent systems], Moscow: Nauka, 1976, 390 p. (In Russ.)
  5. Krasovskii G.I., Filaretov G.F. *Planirovanie eksperimenta* [Planning experiment], Minsk: Izd-vo BGU im. V. I. Lenina, 1982, 302 p. (In Russ.)
- 

### **Assessment of the Possibility of Using the Cement-Bonded Wood Particle Board Wastes in Cement Composites Production**

**N. V. Kuznetsova, V. A. Ezersky**

*Tambov State Technical University, Tambov;  
Bialystok Technical University, Bialystok, Poland*

**Keywords:** cement-bonded wood particle board wastes; cement composites; physical and mechanical characteristics; resource-saving.

**Abstract:** The possibility of using the cement-bonded wood particle board wastes as an additive in cement-sand composites is analyzed in this article. The dependence of test-cubes compressive strength, cross-breaking strength, water consumption and density on the factors of a firm phase in an aggregate were investigated for the various makeups of the fine-grained concrete, prepared according to the simplex-lattice design of experiment. For practical purposes, connected with CBPB wastes recycling and increasing of the received cement composites properties, mathematical models were constructed and the optimal ratios of components in aggregate were established.

---

© Н. В. Кузнецова, В. А. Езерский, 2016