

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 669.054.82:666.971

### КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

**Н.А. АВЕРЧЕНКО, В.А. ХВАТЫНЕЦ, В.А. РОЛЕВИЧ***(Представлено: канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ)*

*Техногенные отходы литейного производства рассматриваются в качестве смешанного вяжущего и минерального наполнителя в основаниях автомобильных дорог. В результате проведенных исследований разработаны и предложены рациональные составы смесей с использованием в качестве смешанного вяжущего и наполнителя техногенного сырья – отработанная формовочная смесь ваграночного шлака.*

Исследование влияния макроструктуры на физико-механические характеристики оснований дорог на уровне их «смешанного вяжущего – наполнитель» определяет необходимость применения математической теории планирования эксперимента, которая позволяет получить необходимые для управления эксплуатационными свойствами материала количественные зависимости в виде полиномиальных экспериментально-статистических моделей [1–5]. Обобщение физико-химических и математических методов с теорией композиционных материалов позволяет на основе вероятностно-статистической концепции анализа, разработанной и научно обоснованной в трудах ученых [6–10], объяснить природу изменения структурных характеристик, определить степень влияния элементов на эксплуатационные характеристики материалов и выделить наиболее сильно влияющие с учетом взаимовлияния для управления свойствами готового изделия с максимальной эффективностью. Смесей для дорожного основания, содержащие техногенные отходы, относятся к композиционным материалам. Управление процессами структурообразования и оптимизацию основных рецептурно-технологических факторов получения силикатных композиций с использованием дисперсных отходов металлургической промышленности целесообразно проводить в рамках полиструктурной теории [11].

При получении вяжущих, состоящих из разной дисперсности, особое внимание следует уделять генезису структуры, так как заложенные в ней дефекты предопределяют в большинстве случаев начало и последующую интенсивность разрушения материала под действием эксплуатационных нагрузок.

Порошки, смешанные из частиц различных видов и размеров, образуют ту или иную микроструктуру благодаря различию во взаимодействиях между собой. Одни представляют собой структурообразующие частицы с более сильной энергией взаимодействия за счет увеличения кривизны поверхности, на которые осаждаются зёрна, имеющие менее сильную энергию. В результате за счёт пространственных структурных элементов-кластеров образуются своеобразные упаковки, что приводит к упорядочению всей дисперсной системы.

При производстве смесей для дорожного основания на смешанном вяжущем одна из задач заключается в правильном подборе качественного и количественного состава смешанного вяжущего для случая замены части известняком тонкомолотым литейным шлаком, а наполнителем служит отработанная формовочная смесь.

Характеристики отработанной формовочной смеси (ОФС):

- модуль крупности ОФС цеха мелкого чугунолития  $M_k = 1,159$ ;
- модуль крупности ОФС цеха среднего чугунолития  $M_k = 1,445$ ;
- модуль крупности ОФС цеха крупного чугунолития  $M_k = 1,320$ ;
- модуль крупности ОФС цеха стального лития  $M_k = 1,407$ ;
- насыпная плотность ОФС цеха мелкого чугунолития  $\rho = 1296 \text{ кг/м}^3$ ;
- насыпная плотность ОФС цеха среднего чугунолития  $\rho = 1341 \text{ кг/м}^3$ ;
- насыпная плотность ОФС цеха крупного чугунолития  $\rho = 1303 \text{ кг/м}^3$ ;
- насыпная плотность ОФС цеха стального лития  $\rho = 1383 \text{ кг/м}^3$ ;
- истинная плотность ОФС равна  $\rho_n = 2650 \text{ кг/м}^3$ ;
- пустотность ОФС цеха мелкого чугунолития  $V_n = 51,09 \%$ ;
- пустотность ОФС цеха среднего чугунолития  $V_n = 49,39 \%$ ;
- пустотность ОФС цеха крупного чугунолития  $V_n = 50,08 \%$ ;
- пустотность ОФС цеха стального лития  $V_n = 47,91 \%$ .

Ход эксперимента и его результаты отражены в таблицах 1–9.

Таблица 1

## Химический состав ОФС

Вид ОФС	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Органические вещества
ОФС цеха мелкого чугунного литья	92,17	3,96	2,99	1,4	1,4	2,39
ОФС цеха среднего литья	95,20	5,0	2,99	0,84	0,98	1,60
ОФС цеха крупного литья	95,17	3,69	1,0	0,88	0,20	2,56
ОФС цеха стального литья	95,74	5,18	5,37	0,98	1,50	1,34

Таблица 2

## Гранулометрический состав ОФС

Вид ОФС	Остаток на ситах	Размер отверстий сит, мм					Проход сквозь сито 0,14
		2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
ОФС цеха мелкого чугунного литья	частный	0,4	0,2	0,4	20,1	71,7	7,2
	полный	0,4	0,6	1,0	21,1	92,8	–
ОФС цеха среднего чугунного литья	частный	1,7	1,9	1,6	31,5	60,6	2,7
	полный	1,7	3,6	5,2	36,7	97,3	–
ОФС цеха крупного чугунного литья	частный	1,1	0,3	2,7	35,5	66,2	4,2
	полный	1,1	1,4	4,1	29,6	95,8	–
ОФС цеха стального литья	частный	3,5	0,5	2,5	21,3	71,7	1,1
	полный	3,5	4,0	6,5	28,7	98,9	–

Таблица 3

## Химический состав гранулированного ваграночного шлака

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	Органические вещества
48,1	15,3	8,57	28,28	3	13,66	0,248

При производстве дорожных оснований одна из задач заключается в правильном подборе качественного и количественного состава вяжущего для случая замены части извести тонкомолотым шлаком.

Прочность уплотнённого порошка ( $R_{сж.п}$ ), величина сдвигового усилия ( $R_{сд.п}$ ), уплотняемость порошка ( $p_n$ ), объёмная насыпная масса порошка ( $a_n$ ), зависят от расхода вяжущего ( $B$ ), содержания тонкомолотого шлака, оптимальной дисперсности ( $W$ ), известково-кремнезёмистого отношения ( $U/II$ ). Исходя из этого для оценки физико-механических характеристик смесей для дорожных оснований, состоящих из смешанного вяжущего и наполнителя, был поставлен планированный 3-факторный эксперимент.

При планировании эксперимента принимались входные параметры:

- расход вяжущего  $x_1$ ;
- известково-кремнезёмистое отношение  $x_2$ ;
- содержание шлака в извести  $x_3$ .

Таблица 4

Уровни варьирования переменных факторов были выбраны следующие

Параметры	–1	0	+1
$x_1$	10	20	30
$x_2$	0,5	1,0	1,5
$x_3$	0	25	50

Таблица 5

## План эксперимента

№ п/п	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	2	3	4
1	+	-	-
2	-	+	-
3	-	-	+
4	+	+	+
5	+	-	+
6	-	+	+
7	+	+	-
8	-	-	-
9	+	0	0
10	-	0	0
11	0	+	0
12	0	-	-
13	0	0	+
14	0	0	-
15	0	0	0

Таблица 6

## Величины выходных параметров

№ п/п	$R_{сж.}$ порошка, МПа	$R_{сдв.}$ порошка, МПа	$\rho/\alpha$	$\alpha$ , кг/м <sup>3</sup>
1	0,64	0,5	1,777	1,007
2	0,23	0,22	1,499	1,134
3	0,18	0,18	1,315	1,277
4	0,84	0,66	1,764	1,020
5	0,77	0,55	1,690	1,080
6	0,15	0,15	2,216	0,790
7	1,09	0,92	1,340	1,230
8	0,2	0,20	1,376	1,235
9	0,85	0,60	1,945	0,910
10	0,19	0,18	1,328	1,280
11	0,39	0,25	1,610	1,120
12	0,27	0,23	1,483	1,213
13	0,35	0,21	1,538	1,170
14	0,62	0,31	1,660	1,060
15	0,50	0,28	1,648	1,080

Выполненные расчеты коэффициентов позволили получить следующие модели:

$$R_{сж.} = 0,41 + 0,3 x_1 + 0,13 x_1^2 + 0,14 x_1 x_2 - 0,08 x_1 x_3 - 0,06 x_2^2 - 0,13 x_2 x_3 + 0,1 x_3^2$$

Модель сдвигового усилия порошка:

$$R_{сдв.} = 0,25 + 0,23 x_1 + 0,15 x_1^2 + 0,07 x_1 x_2 - 0,01 x_1 x_3 + 0,05 x_2^2 - 0,04 x_2 x_3 - 0,04 x_3^2 + 0,02 x_3^2$$

Модель уплотняемости порошка:

$$\rho/\alpha = 1,61 + 0,08 x_1 - 0,17 x_1 x_2 + 0,08 x_2 + 0,16 x_2 x_3 + 0,09 x_3$$

Модель объемной насыпной массы порошка:

$$\alpha = 1,11 - 0,05 x_1 + 0,09 x_1 x_2 - 0,05 x_2 - 0,08 x_2 x_3 - 0,03 x_3$$

Сравнивая коэффициенты при линейных и квадратичных членах моделей, можно отметить определяющее влияние на значение исследуемых характеристик расхода вяжущего и количество содержания шлака в вяжущем.

Оптимизация рецептурно-технологических факторов, осуществляемая диссоциативно-шаговым методом, позволила выяснить значения параметров, обеспечивающих необходимые эксплуатационные характеристики уплотнённого порошка. Эксплуатационные характеристики смесей для дорожного основания заключается в правильном подборе качественного и количественного состава вяжущего для случая замены части извести тонкомолотым шлаком. Для оценки эксплуатационных характеристик смесей для дорожных оснований с использованием техногенный отходов литейного производства (ОФС и ваграночного шлака) был поставлен планируемый 4-факторный эксперимент (табл. 7), в котором варьировались расход смешанного вяжущего ( $X_1$ ), количество шлака в вяжущем ( $X_2$ ), водовяжущее отношение ( $X_3$ ) и величина уплотнения ( $X_4$ ). Получены прочностные характеристики, которые занесены в таблицу 8.

Таблица 7

Уровни варьирования переменных факторов

Факторы	-1	0	+1
$X_1$	10	20	30
$X_2$	0	25	50
$X_3$	0,27	0,3	0,33
$X_4$	20	25	30

Таблица 8

Прочностные характеристики смесей для дорожного основания

$R_{сж.}$ смесей для основания автомобильных дорог	0,33	0,35	0,83	0,73	0,39	0,49	0,49	0,51	0,68	1,03	0,61	0,61	0,36	0,3
		0,28	0,28	0,53	0,37	0,37	0,43	0,43	0,36	0,64	0,47	0,46	0,63	0,53

По полученным результатам эксперимента была получена полиномиальная модель и выполнена оптимизация рецептурно-технологических факторов, осуществлён диссоциативно-шаговый метод, позволивший выяснить значения параметров, обеспечивающие максимальное значение прочности смеси для дорожного основания. Проверка адекватности и информационной способности модели  $R_{сж.}$  смесей для дорожных оснований по критерию Фишера показала, что при принятом уровне значимости уравнения адекватно представляют результаты эксперимента и информационно полезны.

 $R_{сж.}$  смесей для основания

$$\begin{aligned} \text{автомобильных дорог} = & 0,53 + 0,14x_1 - 0,03x_1^2 - 0,04x_1x_2 - 0,04x_1x_3 + 0,04x_1x_4 \\ & - 0,09x_2 + 0,03x_2^2 - 0,01x_2x_3 - 0,03x_2x_4 \\ & - 0,02x_3 - 0,05x_3^2 - 0,02x_3x_4 \\ & + 0,07x_4 + 0,02x_4^2 \end{aligned}$$

Сравнивая коэффициенты при линейных и квадратичных членах моделей, можно отметить определяющее влияние на значения исследуемых характеристик расхода вяжущего (табл. 9).

Увеличение расхода вяжущего приводит к росту прочности смеси. Причем следует отметить, что в случае бесшлакового вяжущего относительный прирост прочности при изменении расхода вяжущего от 15 до 25 % выше, чем для смеси на смешанном вяжущем. Максимальная прочность смеси для дорожного основания сразу после уплотнения равна 1,02 МПа.

Таблица 9

Значения рецептурно-технологических факторов, обеспечивающих максимальные величины исследуемых характеристик

Отклики	Расход смешанного вяжущего, %	Содержание шлака в извести, %	Водовяжущее отношение	Удельное давление прессов МПа
$R_{сж.}$ смесей для основания автомобильных дорог	25	0	0,27	25

После такой многоуровневой оценки отход обретает определенный статус. Но обычно перед использованием в стройиндустрии требуется первичная переработка отхода, которую необходимо осуществлять на месте его образования. В качестве основополагающей технологии подготовки следует считать интенсивную раздельную технологию [6–13]. Она предполагает разделение процесса подготовки на самостоятельные блоки, одним из которых является блок приготовления добавок и смесей. Доминирующая роль принципа раздельности непосредственно вытекает из полиструктурной теории композиционных строительных материалов. В соответствии с этой теорией все строительные композиты представляются

полиструктурными, то есть составленными из большого числа структур (на атомно-молекулярном уровне, а также во всем объеме изделия), характеризующих макро- и микроуровни. Возможность использования тех или иных промышленных отходов для производства вяжущих веществ определяется разнообразием свойств исходного сырья, степенью его подготовленности для применения в дорожном строительстве и т.д. Эти различия должны быть учтены при выявлении экономической эффективности их использования. Для каждого отхода необходимо определить не только наиболее рациональный способ переработки, но и соответствующую область применения.

Рациональное применение и комплексная переработка попутных продуктов производства выгодны еще и потому, что на удаление техногенных отходов с территорий предприятий, их вырабатывающих, затрачиваются значительные материальные и трудовые ресурсы. При получении из этих отходов материалов, ценных для дорожного строительства, указанные затраты частично отпадут, частично войдут в стоимость полезной продукции. Комплексное использование отходов металлургической, химической, энергетической и других отраслей промышленности в широких масштабах обеспечивает большой экономический эффект. Существенные результаты дает сокращение капитальных вложений на развитие материально-технической базы дорожного строительства, а также ликвидация отвалов промышленных отходов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Современные методы оптимизации композиционных материалов / В.А. Вознесенский [и др.]; под ред. В.А. Вознесенского. – Киев: Будівельник, 1983. – 147 с.
2. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грантовский. – 2-е изд. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
3. Адлер, Ю.П. Теория эксперимента: Настоящее, прошлое, будущее / Ю.П. Адлер, Ю.В. Грантовский, Е.В. Макарова. – М.: Знание, 1982. – 64 с.
4. Вознесенский, В.А. Статистические решения в технологических задачах / В.А. Вознесенский. – Кишинёв: Картя Молдовеняскэ, 1968. – 232 с.
5. Вознесенский, В.А. Статические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – 2-е изд. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
6. Соломатов, В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов // Новые композиционные материалы в строительстве. – Саратов, 1981. – С. 5–9.
7. Композиционные материалы: пер. с англ. / под ред. Дио Сендеики. – М.: Мир, 1978. – Т. 2: Механика композиционных материалов. – 564 с.
8. Боженков, П.И. Технология автоклавных материалов / П.И. Боженков. – Л.: Стройиздат, 1987. – 363 с.
9. Автоклавная обработка силикатных изделий / под ред. С.А. Кржеминского. – М.: Стройиздат, 1974. – 160 с.
10. Бутт, Ю.М. Долговечность силикатных бетонов / Ю.М. Бутт, К.А. Куатбаев. – М.: Стройиздат, 1966. – 216 с.
11. Соломатов, В.И. Бетон как композиционный материал / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, Н.А. Аббасханов. – Ташкент: УзНИИНТИ, 1985.
12. Гридчин, А.М. Технологический комплекс для производства активированных композиционных смесей и сформованных материалов / А.М. Гридчин, В.С. Севостьянов, В.С. Лесовик // Строительные материалы. – 2004. – № 9. – С. 34–36.
13. Гультей, И.И. Граница саморассыпаемости шлака в системе  $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  / И.И. Гультей, Г.А. Соколов // Изв. АН СССР. Металлургия и горное дело. – 1963. – № 4. – С. 356–369.

УДК 658.562.64

#### ПОРИСТОСТЬ И ВОДОНАСЫЩЕНИЕ КАК ПОКАЗАТЕЛИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЯ

*Н.А. АВЕРЧЕНКО, В.А. ХВАТЫНЕЦ*  
(Представлено: канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ)

*Определяется степень завершённости структурообразования как функции приращения пористости. Получены зависимости между водонасыщением от сложившейся капиллярно-поровой структуры и её влияние на механические характеристики.*

Эксплуатационные характеристики материалов зависят от их увлажнения и могут быть определены прямым (высушиванием) и косвенным (дизельметрическим, кондуктометрическими) методами. Переменное увлажнение и высыхание материала как при положительных, так и при отрицательных температурах вызывает в материале дополнительные напряжения, которые в ряде случаев могут оказаться разрушающими (развитие трещин и пр.).

Результаты опытов [1] влияния характера высыхания образцов на их усадку. Опыты проводились на бетонных призмах сечением  $5 \times 5$  см длиной 11,5 см, часть которой высыхала с боковой поверхности при гидроизолированных торцах, а часть – с открытых торцов при гидроизолированной боковой поверхности.

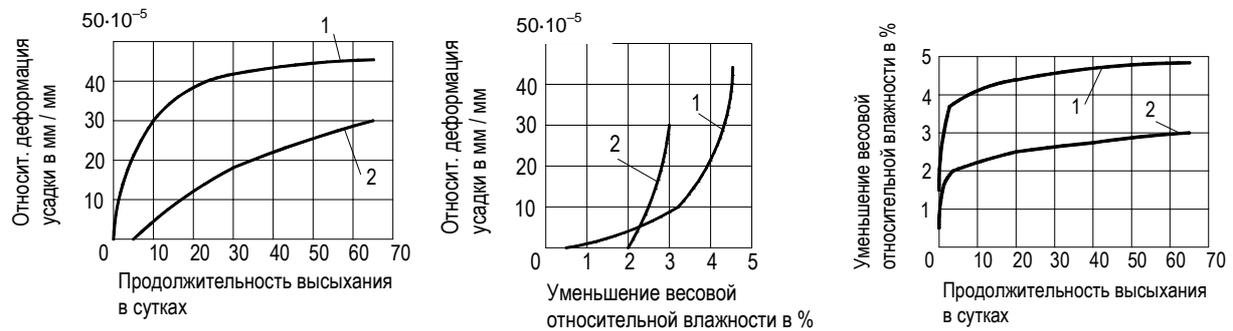


Рис. 1. Влияние характера высыхания на усадку бетона. Бетон состава по весу 1:2, 13:4,9. Высыхание с 4-х суточного возраста: 1 – с боковой поверхности; 2 – через торцы

Деформации, развивающиеся на поверхности образцов, высыхающих с поверхности, вследствие неравномерного распределения влажности по их поперечному сечению [2–4] существенно искажают ход развития и величины усадочных деформаций. Различными оказываются также предельные величины усадки сравниваемых образцов.

Реальное пористое тело имеет поры и капилляры различных диаметров, поэтому жидкость по ним течёт с различными скоростями. Кроме того, капилляры в реальном пористом теле имеют разную извилистость, форму и шероховатость.

Экспериментальное определение зависимости  $p = f(r)$  позволяет рассчитать функцию распределения пор по размерам в пористом теле. Для учёта неправильной форме капилляров [5] вводят коэффициент извилистости  $\delta$ . Пористость пористого тела или порозность порошка с учётом коэффициента извилистости представляют следующим соотношением:

$$\Pi = \frac{V_n}{V_{\text{общ}}} = \frac{\pi N s r^2 l \delta}{s l} = \pi N s r^2 \delta, \quad (1)$$

где  $N$  – число пор (капилляров) на единицу поверхности пористого тела (порошка);  $s$  – сечение образца;  $r$  – радиус пор (капилляров);  $l$  – длина образца;  $\delta = 1,4 \dots 1,6$  для неуплотнённых слоёв порошка при порозности от 0,35 до 0,43.

Поскольку пористость  $\Pi$  определяется количеством испаряемой воды [6–9], то рассмотрим, возможность выразить степень завершенности структурообразования  $\eta$  через влажностные характеристики системы. Выразим через испаряемую воду конечную пористости  $\Pi_k$  затвердевшего камня. Для этого мы должны довести его до максимального насыщения. При максимальном насыщении капиллярно-пористого тела влагой его влагосодержание  $u_{\text{мн}}$  и соответствующее (равновесное) этому влагосодержанию значение потенциала оводнения определяется общим относительным давлением равновесного пара воды  $\phi = 1,12$ . Следовательно, имеем

$$\Pi_k = \Pi_{\alpha\theta\tau_0} = \zeta \cdot u_{\alpha} = \zeta \cdot u_{\text{мн}}. \quad (2)$$

Приращение пористости определится избытком влагосодержания исследуемой системы над влагосодержанием типичного капиллярно-пористого тела.

Следовательно, поставленная задача – выразить степень завершенности структурообразования через влажностные характеристики – решена. В полученном соотношении переменной величиной является избыток влагосодержания  $u_{\eta}$ . Так как именно вода, содержащаяся в структурообразующей системе и образующая этот избыток влагосодержания (как следует из полученного соотношения), управляет процессом структурообразования, то ее можно называть структурной водой. Эта структурная вода участвует в создании переменной части пространства.

Изменения, вызванные адсорбцией и десорбцией паров воды в кристаллической структуре искусственного камня, приводят к изменению микrorазмеров всей структуры. При адсорбции паров воды структурные элементы набухают, а вследствие десорбции они претерпевают усадку. При этом только 20 % микрордеформаций кристаллов превращаются в макродеформацию, остальная часть гасится внутри. Отсутст-

вие прямой пропорциональности между количеством адсорбированной воды и деформаций искусственного камня является следствием изменения пористости структуры в процессе усадки и набухания.

Долговечность бетонов, эксплуатируемых в условиях воздействия влажной среды, в значительной степени обусловлены капиллярными явлениями, имеющими место в тонких порах этих материалов. Явление капиллярного впитывания жидкости можно оценить, используя коэффициент сорбции воды, характеризующий способность материала впитывать воду при контакте с ней, который для каждого конкретного материала определяется по экспериментальным данным.

Процесс увеличения влагосодержания образцов с некоторыми погрешностями может быть описан уравнениями двух прямых, имеющих разные тангенсы угла наклона и соответственно разделён на два основных этапа. На первом, основном, этапе изучаемого процесса, имеющего практическое значение, происходит довольно быстрое капиллярное поднятие жидкости, которое прекращается после того, как фронт воды достигает верхней грани образца. При этом масса воды, поглощённая единицей объёма сухого материала, в результате капиллярного подсоса распределится в нём и займёт объём, который будет характеризовать активную прочность, участвующую в капиллярном всасывании воды.

Несложно предположить, что образцы материала, имеющие одинаковую пористость и различные значения коэффициентов сорбции воды ( $A$ ), будут иметь различную долговечность. Полученные результаты коэффициента сорбции  $A$  ( $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^{0,5})$ ) коррелируют с плотностью образцов:

$$A = 0,248 - 0,000107\rho. \quad (3)$$

Таким образом, для прогнозирования сорбционной способности материала можно пользоваться величиной плотности.

Капиллярные явления в материале влияют на его эксплуатационные свойства – изменение прочности в процессе увлажнения. Была исследована зависимость коэффициента стойкости материала от коэффициента сорбции:

$$K_{\text{стойк}} = 1,338 - 11,48A. \quad (4)$$

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что с увеличением сорбционной способности прочность материала при увлажнении снижается.

Немаловажную роль в формировании оптимальной структуры играет регулирование режимов автоклавной обработки, позволяющее получать материал высокого качества за счёт направленного синтеза продуктов гидратации, характеристик твёрдой фазы и межпорового пространства.

Основной определяемой эмпирически числовой характеристикой структуры капиллярно-пористого материала является функция распределения объёма пор по радиусу.

Для оценки коэффициента влагопроводности были использованы опытные данные о кинетике одномерного водопоглощения, полученные на образцах в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами  $4 \times 4 \times 16$  см из материала, в котором вместо кварцевого песка использовалась отработанная формовочная смесь и ваграночный шлак. Использовались образцы с плотностью  $\rho_0 = 1690 \text{ кг}/\text{м}^3$ , у которых боковые стороны были покрыты водонепроницаемой замазкой. Вертикально подвешенный образец нижней гранью соприкасался с поверхностью воды, с помощью весов отслеживалось изменение его массы во времени  $m(t)$ .

Постановка задачи состоит в определении коэффициента влагопроводности материала  $\beta(\omega)$ . Появилась возможность, изменяя значения  $\beta(\omega)$ , наблюдать, как изменяются значения  $m(t)$ , и сравнивать их с экспериментальными данными. Удалось добиться совпадения вычисленных значений  $m(t)$  с полученными опытным путём данными.

Результаты проведённого эксперимента и вычислений отображены в таблице 1 и на рисунках 2 и 3.

Таблица 1

Изменение массы образца со временем  
(сравнение опытных данных  $m^e$  с расчётными  $m^i$ )

№ образца	$t$ , мин	$m^e$ , г	$m^i$ , г
1	0	243	243,21
2	15	244	245,09
3	30	245	246,02
4	45	245,9	246,73
5	60	246,4	247,34
6	75	246,9	247,86

Окончание таблицы 1

№ образца	$t$ , мин	$m^e$ , г	$m^i$ , г
7	90	247,2	248,34
8	105	247,8	248,78
9	120	248,2	249,19
10	135	248,2	249,57
11	150	248,7	249,93
12	165	249,1	250,27
13	1110	260,5	260,00
14	1620	264,8	265,96
15	2559	271,6	271,87
16	3120	274,5	274,88
17	5430	286	285,13
18	8310	296	295,09
19	9750	298	298,98

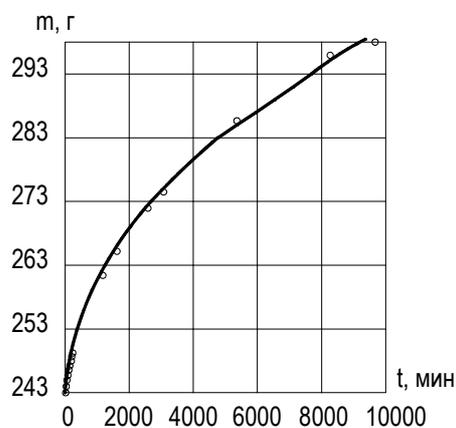


Рис. 2. Изменение массы образца со временем.  
Сравнение опытных данных с расчётными  
( $\circ$  – опытные данные)

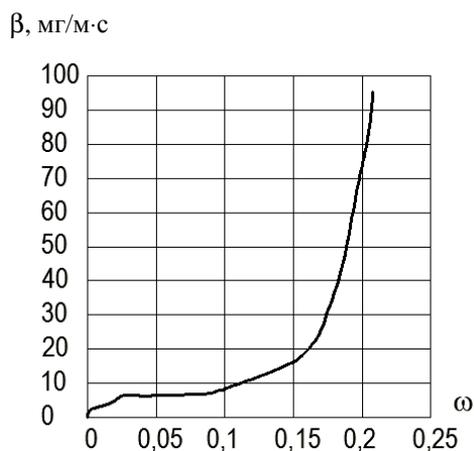


Рис. 3. Коэффициент влагопроводности материала  
с плотностью  $1690 \text{ кг/м}^3$  в зависимости от его весовой влажности,  
полученной в результате численного анализа

Характер кривой на рисунке 3 не противоречит сложившимся представлениям о зависимости коэффициента влагопроводности материала от его влагосодержания. Полученная в результате расчётов зависимость  $\omega(x,t)$  изображена на рисунке 4 и вполне правдоподобно отражает кинетику водонасыщения гидрофильного капиллярно-пористого материала.

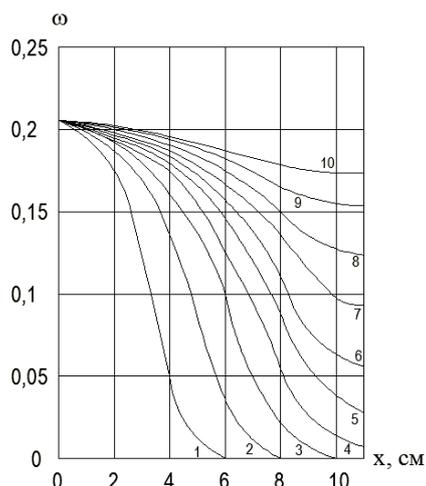


Рис. 4. Изменение влажности по длине образца в зависимости от времени:  
 1 –  $t = 1000$  мин; 2 –  $t = 2000$  мин; 3 –  $t = 3000$  мин; 4 –  $t = 4000$  мин; 5 –  $t = 5000$  мин;  
 6 –  $t = 6000$  мин; 7 –  $t = 7000$  мин; 8 –  $t = 8000$  мин; 9 –  $t = 9000$  мин; 10 –  $t = 9750$  мин

Полученная функция распределения объёма пор по радиусам для рассмотренного материала плотностью  $1690 \text{ кг/м}^3$  изображена на рисунке 5. При расчётах принято  $\cos\varphi = 0,3$ .

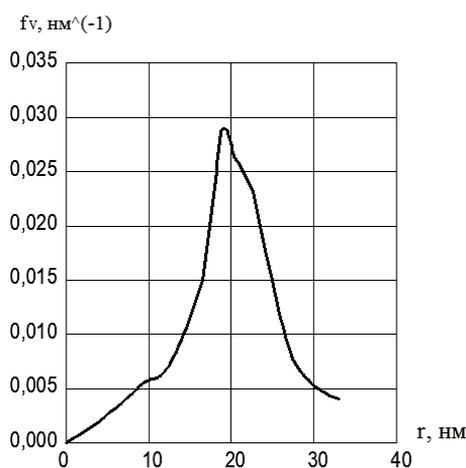


Рис. 5. Функция распределения объёма пор по радиусам для образца, полученная в результате численного анализа

Из рисунка 5 следует, что примерно 80 % открытой пористости материала имеет поры размером от 0,01 до 0,03 мкм. Такие показатели характерны для однородного мелкопористого материала.

Таблица 2

Численные значения коэффициентов сорбции воды  $A$ , активной пористости  $\Phi_A$ , высоты поднятия жидкости в образце  $H$ , условного среднего радиуса пор  $r$  и коэффициента  $\xi$

$H$ , см	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$A$ , кг/м <sup>2</sup> ·с <sup>0,5</sup>	$t_c$ , с	$\Phi_A$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$\beta$ , м/с <sup>0,5</sup>	$\xi$	$r \cdot 10^6$ , м	$r \cdot 10^6$ , м
8,11	1,842	0,05583	126960	0,2514	$0,222 \cdot 10^{-3}$	2,347	0,01575	0,026145
7,628	1,851	0,05067	144060	0,252	$0,201 \cdot 10^{-3}$	2,344	0,01209	0,020069
8,126	1,861	0,0400	181500	0,210	$0,190 \cdot 10^{-3}$	2,414	0,01165	0,019339
8,02	1,845	0,0582	126960	0,260	$0,201 \cdot 10^{-3}$	2,330	0,01520	0,25232
8,69	2,057	0,0262	384000	0,187	$0,140 \cdot 10^{-3}$	2,448	0,00647	0,01084
8,80	1,668	0,0866	110940	0,350	$0,262 \cdot 10^{-3}$	2,228	0,01906	0,03164
8,98	1,575	0,0772	216000	0,400	$0,193 \cdot 10^{-3}$	2,138	0,00942	0,015637
8,342	1,684	0,0728	138240	0,320	$0,228 \cdot 10^{-3}$	2,246	0,01402	0,023273
8,18	1,866	0,0540	912600	0,199	$0,271 \cdot 10^{-3}$	2,427	0,02380	0,039508
11,03	1,686	0,0501	486000	0,321	$0,156 \cdot 10^{-3}$	2,245	0,00696	0,011554

Анализ результатов таблицы 2 позволяет оценить влияние поровой структуры образцов на кинетику водопоглощения.

Представленные ниже данные, полученные экспериментальным путём, показывают соотношение между водонасыщением и нагрузкой при сжатии, а также прочностью. В опыте было использовано двадцать девять образцов, различных по гранулометрии, соотношению вяжущего, шлака, отработанной формовочной смеси и водовязущего отношения.

№	Масса в естественных условиях 21.02.15 $t = 15^\circ\text{C}$	Размер, см	Сухой 18.02.15	18.02.15		18.02.15		18.02.15		18.02.15		19.02.15	21.02.15	21.02.15	Влажность до испытания, %	Масса сухого, г	Водонасыщение, %	Нагрузка при сжатии, кгс	Прочность, кгс/см <sup>2</sup>
				запит водой $h = 3\text{ см}; t = 14^\circ\text{C}$	10.00	11.00	12.00	14.00	17.00	08.00	12.00								
2	221,72	4×4×7,5	219,67		10	12	16	22	24	28	28	29	252,3	0,93	219,49	14,95	1630	65,2	
5	221,15	4×4×7,5	209,91		14	20	30	36	50	67	68	75	239,35	1,07	209,89	14,04	4057	162,3	
7	221,88	4×4×7,3	219,8		6	10	20	22	32	42	42	47	248,25	0,95	219,72	12,98	4755	190,2	

По данным, приведённым в таблице, можно сравнить массы сухих образцов до и после проведения испытания. Масса сухого образца № 2 до и после испытания соответственно равны 219,67 и 219,49 г; образца № 5 – 209,91 и 209,89 г; образца № 7 – 219,8 и 219,72 г. Видно, что масса всех образцов после испытания уменьшилась (рис. 6).

№	Масса в естественных условиях 21.02.15 $t = 15^\circ\text{C}$	Размер, см	Сухой 27.02.15	27.02.15		27.02.15		27.02.15		27.02.15		03.03.15	03.03.15	Влажность до испытания, %	Масса сухого, г	Водонасыщение, %	Нагрузка при сжатии, кгс	Прочность, кгс/см <sup>2</sup>
				запит водой $h = 3\text{ см}; t = 14^\circ\text{C}$	15.30	16.30	17.30	28.02.15	10.30	08.30	03.03.15							
8	217,52	4×4×7,5	216,49		8	11	14	32	32	38	247,3	0,48	216,12	14,22	3959	158,4		
9	222,38	4×4×7,5	221,42		9	12	16	28	28	31	252,43	0,43	220,89	14,28	2571	102,8		
11	218,17	4×4×7,3	217,3		8	11	17	22	22	26	250,15	0,4	216,28	15,66	2056	82,2		

По данным, приведённым в таблице, можно сравнить массы сухих образцов до и после проведения испытания. Масса сухого образца № 8 до и после испытания соответственно равны 216,49 и 216,12 г; образца № 9 – 221,42 и 220,89 г; образца № 11 – 217,3 и 216,28 г. Несложно заметить, что масса всех образцов после испытания уменьшилась (рис. 7).

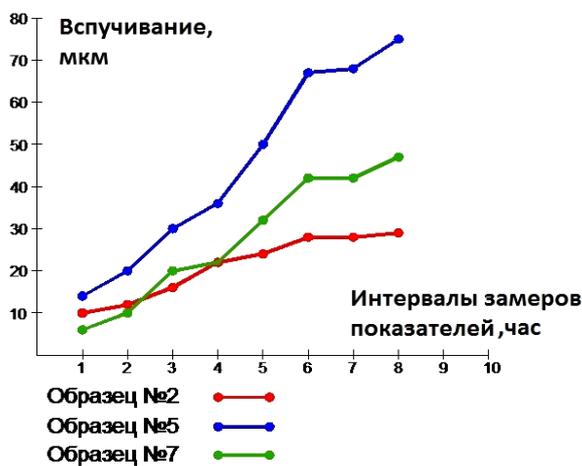


Рис. 6

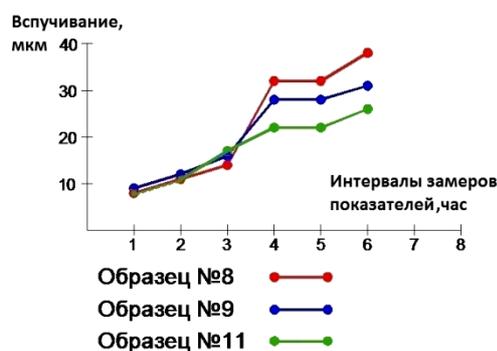


Рис. 7



мость коэффициента стойкости материала от коэффициента сорбции. Проследили влияние характера высыхания образцов на их усадку. Проведя опыты с двадцатью девятью образцами, проследили закономерность влияния водонасыщения на прочность образцов. Чем больше водонасыщение, тем меньше прочность. Также видно, что после проведения испытаний масса образцов уменьшается, что может существенно повлиять на качество готового изделия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Александровский, С.В. Производство железобетонных ферм / С.В. Александровский. – М.: Стройиздат, 1968. – 188 с.
2. De Donder, Th. L’Affinite / Th. de Donder, P. van Rysselbeghe. – Paris, 1938.
3. Цимерманис, Л.Б. Термодинамическое развитие открытой системы, в которой химическая реакция сопряжена с процессами структурообразования / Л.Б. Цимерманис, Д.И. Штакельберг, А.Р. Генкин // Изв. АН ЛатвССР. Серия физико-техническая. – 1974. – № 6. – С. 55–63.
4. Горчаков, Г.И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений / Г.И. Горчаков, М.М. Капкин, Б.Г. Скрамтаев. – М.: Стройиздат, 1965. – 195 с.
5. Горчаков, Г.И. Специальные строительные материалы для теплоэнергетического строительства / Г.И. Горчаков. – М.: Стройиздат, 1972. – 304 с.
6. Вяжущие вещества, бетоны и изделия из них / Г.И. Горчаков [и др.]. – М.: Высш. школа, 1976. – 145 с.
7. Состав, структура и свойства цементных бетонов / Г.И. Горчаков [и др.]. – М.: Стройиздат, 1976. – 145 с.
8. Миронов, С.А. Теория и методы зимнего бетонирования / С.А. Миронов. – М.: Стройиздат, 1975. – 700 с.
9. Шейкин, А.Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня / А.Е. Шейкин. – М.: Стройиздат, 1974. – 191 с.
10. Powers, T.C. Studies of the Physical Properties of Hardend Portland Cement Paste / T.C. Powers, T.L. Brownyard // ACJ Journal. – 1947. – Vol. 43. – March.
11. Дибров, Г.Д. Изменения объема (усадка) цементного камня / Г.Д. Дибров, М.С. Остриков, Т.П. Петренко // ДАН СССР. – 1963. – С. 648.
12. Цимерманис, Л.Б. Термодинамические и переносные свойства капиллярно-пористых тел / Л.Б. Цимерманис. – Челябинск: Ю.-У. кн. изд-во, 1970.
13. Бабушкин, В.И. Термодинамика силикатов / В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев, О.П. Мчедлов-Петросян. – М.: Стройиздат, 1972. – 351 с.
14. Бабушкин, В.И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона / В.И. Бабушкин. – М.: Стройиздат, 1968. – 187 с.
15. Бабушкин, В.И. Термодинамика в процессах гидротации и коррозии цемента: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.И. Бабушкин. – Харьков: ХПИ, 1972.
16. Шабанов, Д.Н. Оценка параметров влагонепроводности строительных материалов для теплотехнических расчётов / Д.Н. Шабанов, А.В. Афонин, В.И. Никитин // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – 2003. – № 2. – С. 98–100.
17. Мчедлов-Петросян, О.П. Термодинамика и термохимия цемента / О.П. Мчедлов-Петросян, В.И. Бабушкин // VI Междунар. конгр. по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – Т. II, кн. I. – С. 6–16.
18. Брунауэр, С. Адсорбция газов и паров / С. Брунауэр. – М.: ИЛ, 1948. – Т. I. – 784 с.

УДК 693.54

#### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ – ЧЕРЕЗ 3D-ПРИНТЕР

**Н.А. АВЕРЧЕНКО, В.А. ХВАТЫНЕЦ**  
(Представлено: канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ)

*Рассматривается возможность применения 3D-принтера в дорожном строительстве. Технология основана на современных достижениях в области «трехмерной печати». Показан переход от 3D-модели к готовому изделию, а также отличие трёхмерного изображения от плоского.*

Современные автомобильные дороги представляют собой сложные пространственные системы, распределение усилий в которых происходит по сложным законам. Выразить эти закономерности в виде аналитических зависимостей и довести последние до численных результатов, необходимых для инженерной практики, не всегда оказывается возможным. Как показывает опыт отечественных и зарубежных исследований, характер и величины распределения напряжений и усилий, действующих в

сложных сооружениях, могут быть определены путем изучения работы модели под нагрузкой, созданной на 3D-принтере [1].

Трёхмерная графика или 3D-раздел компьютерной графики, совокупность приемов и инструментов (как программных, так и аппаратных), призванных обеспечить пространственно-временную непрерывность получаемых изображений, больше всего применяется для создания изображений в архитектурной визуализации, кинематографе, телевидении, компьютерных играх, печатной продукции, а также в науке и промышленности.

Трёхмерное изображение отличается от плоского построением геометрической проекции трёхмерной модели сцены на экране компьютера с помощью специализированных программ. При этом модель может как соответствовать объектам из реального мира, так и быть полностью абстрактной.

Сцена (виртуальное пространство моделирования) включает в себя несколько категорий объектов, таких как: *геометрия* – построенная с помощью различных техник модель, например здание; *материалы* – информация о визуальных свойствах модели, например цвет стен и отражающая/преломляющая способность окон; *источники света* – настройки направления, мощности, спектра освещения; *виртуальные камеры* – выбор точки и угла построения проекции; *силы и воздействия* – настройки динамических искажений объектов, применяется в основном в анимации; *дополнительные эффекты* – объекты, имитирующие атмосферные явления: свет в тумане, облака, пламя и пр.

Программные пакеты, позволяющие создавать трёхмерную графику, то есть моделировать объекты виртуальной реальности и создавать на основе этих моделей изображения, разнообразны [3]. Последние годы устойчивыми лидерами в этой области являются коммерческие продукты:

*AutoCAD* – двух- и трёхмерная система автоматизированного проектирования и черчения, разработанная компанией Autodesk. Первая версия системы была выпущена в 1982 году. AutoCAD и специализированные приложения на его основе нашли широкое применение в машиностроении, строительстве, архитектуре и других отраслях промышленности. Программа выпускается на 18 языках. Уровень локализации варьируется от полной адаптации до перевода только справочной документации.

*CINEMA 4D* – универсальная комплексная программа для создания и редактирования трёхмерных эффектов и объектов. Позволяет моделировать объекты по методу Гуро. Поддержка анимации и высококачественного рендеринга.

*SolidWorks (Солдворкс)* – программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения.

*3DS Max* – полнофункциональная профессиональная программная система для работы с трёхмерной графикой, разработанная компанией Autodesk. Работает в операционных системах Microsoft Windows и Windows NT (как в 32-битных, так и в 64-битных). В 2009 году выпущена двенадцатая версия этого продукта под названием «3ds Max 2010» [2].

*3D-принтер* – устройство, использующее метод создания физического объекта на основе виртуальной 3D-модели. 3D-печать может осуществляться разными способами и с использованием различных материалов, но в основе любого из них лежит принцип послойного создания (выращивания) твёрдого объекта. Такой способ печати позволяет использовать 3D-принтер в дорожном строительстве [4]. Также возможно создание запатентованной стеклопластиковой арматуры (рис. 1), для применения её в дорожном покрытии. После создания арматурного каркаса (рис. 2), его укладка должна производиться без участия человека, при помощи манипулятора, установленного вместе в 3D-принтере.



Рис. 1. Арматура, созданная в 3DS Max

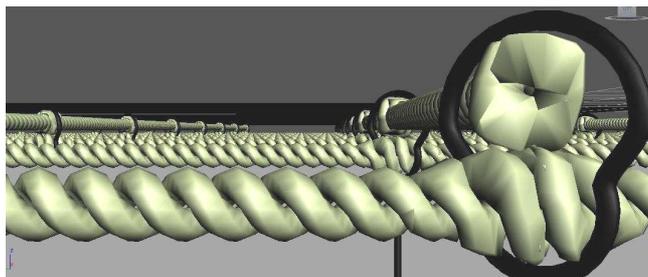


Рис. 2. Арматурный каркас

Технология основана на современных достижениях в области так называемой «трехмерной печати». В настоящее время эта технология интенсивно внедряется и в другие отрасли производства, в том числе в строительство. Однако эта технология основана на непосредственной укладке быстротвердеющего бетона в монолитную конструкцию дома или дорожного покрытия специальным принтером, размеры которого превышают размеры возводимого сооружения [5]. При помощи 3D-принтера возможна укладка бетонной смеси по технологии выращивания, что позволяет создавать покрытие послойно (рис. 3), соблюдая все нормы и требования. Это обеспечит быстрые темпы строительства, большой запас надежности, минимизацию ручного труда.



Рис. 3. Дорожное основание в разрезе

В заключение можно сделать вывод, что трехмерную печать ждет серьезный скачок уже в ближайшее время. Упростятся 3D-редакторы, удешевится 3D-печать, сами принтеры станут компактнее, улучшатся свойства используемых материалов. Кроме того, сегодня 3D-принтеры востребованы при производстве деталей для малосерийного производства, мелких объектов для домашнего использования, сувениров. Следовательно, в скором будущем появятся малогабаритные 3D-принтеры для строительства дорог.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Расчет строительных конструкций на основе моделирования. – М., 1965. – 3 с.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http //www.ru.wikipedia.org](http://www.ru.wikipedia.org).
3. Ли, Дж. Трёхмерная графика и анимация / Дж. Ли, Б. Уэр. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2002. – 640 с.
4. Херн, Д. Компьютерная графика и стандарт OpenGL / Д. Херн, М.П. Бейкер. – 3-е изд. – М.: Вильямс, 2005. – 1168 с.
5. Иванов, В.П. Трёхмерная компьютерная графика / В.П. Иванов, А.С. Батраков; под ред. Г.М. Полищука. – М.: Радио и связь, 1995. – 224 с.

УДК 666.972.135

#### ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

**Т.Г. ЕРМОЛАЕВА, К.А. КОСТЮРИНА**

*(Представлено: канд. техн. наук, доц. Ю.И. КИРЕЕВА)*

*Исследуется влияния химических добавок: пластифицирующей С-3 и противоморозной поташа на поверхностные свойства цементных зерен и реологические свойства цементных суспензий. Установлено, что добавка С-3 вызывает дефлокулирующий и пластифицирующий эффект и формирование плотной структуры цементного теста; поташ способствует образованию крупных агрегатов, повышает жесткость смеси и обеспечивает формирование объемной, рыхлой структуры водоцементной системы.*

Всё возрастающие объемы монолитного круглогодичного строительства и все увеличивающееся внимание к дорожному бетонированию, позволяющему получить более долговечное и экологически безопасное покрытие по сравнению с битумным, требуют применения специальных технологий производства бетонных работ. Особенность зимнего бетонирования связана, прежде всего, с переходом воды в лёд и прекращением реакции гидратации цемента – основного процесса, обеспечивающего получение искусственного камня заданной прочности. Существует достаточно много обогреваемых и безобогреваемых

методов, обеспечивающих сохранность жидкой фазы и позволяющих набирать прочность бетону при отрицательной температуре. Один из них, не требующий дорогостоящих энергозатрат, зарекомендовал свою эффективность многолетней практикой использования – применение противоморозных добавок-антифризов [1; 4].

Установлено, что стоимость производства бетонных работ без обогрева с противоморозными добавками по сравнению со стоимостью производства в летних условиях увеличивается на 8...12 %, в то время как с применением электро- и паропрогрева – на 20...40 %. Степень снижения температуры зависит от химического состава добавки и концентрации раствора, с повышением которой эффект усиливается. Одной из наиболее эффективных добавок, не вызывающих коррозию арматуры, является поташ (карбонат калия), позволяющий получить раствор, температура замерзания которого составляет до минус 30 °С.

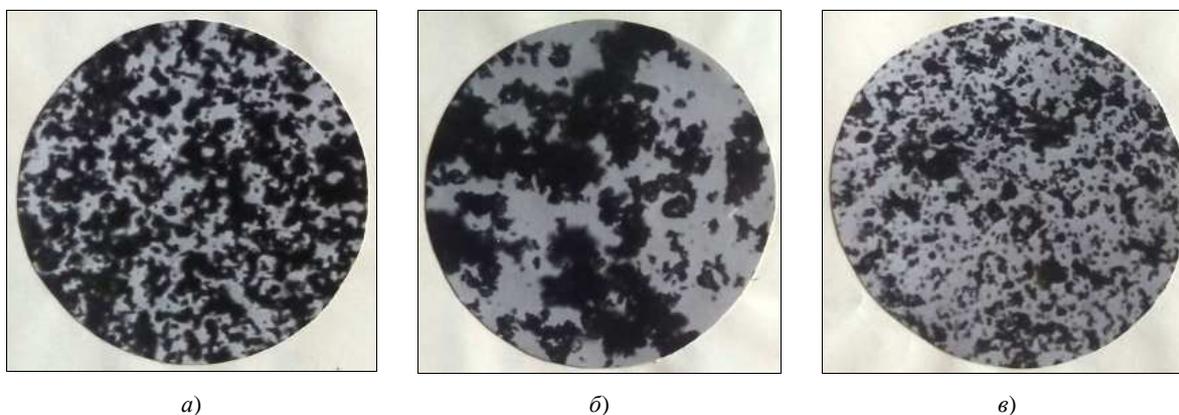
В условиях летнего бетонирования технология производства бетонных работ должна учитывать пониженную влажность и высокую температуру воздуха. Процесс гидратации цемента резко ускоряется, что приводит к уменьшению жизнеспособности бетонной смеси, быстрой потере ее удобоукладываемости и возможному появлению деформационных трещин на поверхности бетонных конструкций и покрытия, снижающих их эксплуатационные свойства и долговечность в целом. В последнем случае опасность усиливается вследствие большой площади испаряющей поверхности дорожного полотна. Проблема испарения воды решается путем укрытия отбетонированной поверхности, например, пленочным материалом. Регулировать удобоукладываемость бетонной смеси можно за счет увеличения содержания цемента при постоянном В/Ц или путем увеличения расхода воды при неизменном содержании цемента. В первом варианте повысится тепловыделение, усадочные деформации, во втором – за счет содержания «лишней» воды, не участвующей в реакции гидратации, увеличится пористость и, как следствие, понизятся прочность, морозостойкость и водонепроницаемость [2].

Применение добавок суперпластификаторов позволяет получить жизнеспособную, высокоподвижную, связную бетонную смесь без водоотделения и потери прочности бетоном в нормированные сроки – 28 суток. Введение суперпластификатора, как правило, замедляет схватывание и твердение бетона в начальный период. Степень эффективности действия суперпластификаторов на удобоукладываемость бетонной смеси зависит от типа суперпластификатора, его количества, времени ввода в бетонную смесь – сразу с водой затворения или со второй порцией после предварительного перемешивания – водоцементного отношения, количества и вида заполнителя и температуры окружающей среды. Суперпластификаторы представляют собой органические вещества коллоидного размера с большим количеством полярных групп в цепи, обеспечивающих им гидрофильные свойства. Адсорбируясь на поверхности цемента, добавка способствует образованию водных сольватных оболочек вокруг цементных зерен, вызывающих уменьшение предельного напряжения сдвига, диспергирующее отталкивающее действие и, как следствие, повышение пластичности смеси и замедление ее схватывания [3].

В связи с вышеизложенным в работе исследовали влияние неорганической противоморозной добавки-поташа и органической суперпластификатора С-3 на поверхностные свойства цемента и реологические водоцементных систем.

Влияние добавок на поверхностные свойства вяжущего изучалось на цементных суспензиях состава Ц:Р = 1:5 по скорости седиментации цементных зерен, плотности образованного осадка и с использованием поляризационного микроскопа в проходящем свете, степень увеличения  $\times 90$ . В качестве воды затворения использовали воду (контрольный состав), раствор поташа из расчета реально используемых 5 и 10 % от расхода цемента и водный раствор С-3 – 0,3 и 0,6 % по сухому веществу от массы цемента.

Результаты эксперимента проиллюстрированы рисунком и таблицей.



а)

б)

в)

Влияние добавок на флокуляцию цементных зерен:  
а – без добавки; б – 10 % поташ; в – 0,6 % С-3

## Влияние добавок на свойства цементных суспензий

Вид добавки	Количество добавки, % от цемента	Время оседания, мин	Плотность осадка, г/см <sup>3</sup>	Осадка конуса, см	Диаметр расплыва, см
б/д	–	15	2,84	0,95	4,5
С-3	0,3	360	3,79	5,25	9,1
	0,6	360	3,81	5,55	9,8
Поташ	5	12	2,32	0,36	4,0
	10	10	2,25	0,20	3,7

Видим, что введение пластифицирующей, гидрофильной добавки вследствие образования на поверхности цементных зерен сольватных оболочек вызывает дефлокуляцию цементных зерен, их медленное оседание и образование плотного осадка (по сравнению с водной системой).

В растворе электролита повышение щелочности вызывает резкое снижение гидратации поверхности цементных зерен, усиливающееся при повышении концентрации. В результате происходит слипание цементных частиц в крупные агрегаты, коагуляция крупных флокул размером до 300 мкм, быстрое, беспорядочное оседание под действием собственного веса и, как следствие, образование рыхлого, объемного осадка, что видно из рисунка и таблицы.

Следовательно, резкое уменьшение поверхности соприкосновения вяжущего и водного раствора может вызвать такие отрицательные эффекты, как расслоение и водоотделение в цементных системах, приводящих к формированию дефектной, пористой структуры искусственного камня, снижение его долговечности.

Влияние добавок на пластичность смеси оценивали с использованием стандартного мини-конуса ( $d_b = 2$  см,  $d_n = 4$  см,  $h = 6$  см) по осадке и расплыву цементного теста ( $V/C = 0,5$ ).

Анализ полученных данных (таблица) подтверждает пластифицирующий эффект добавки С-3, облегчающий взаимное скольжение частиц, окруженных гидратной оболочкой, по отношению друг к другу, который усиливается с увеличением ее концентрации. Добавка поташа снижает плотность осадка и повышает жесткость смеси.

Подводя итог, можно сделать следующие выводы:

- природа добавок, их химический состав оказывают решающее влияние на поверхностные свойства цементных зерен;
- суперпластифицирующая, гидрофильная добавка С-3, адсорбируясь на поверхности цементных зерен, вызывает их диспергирование;
- дефлокулирующий эффект, наблюдаемый при вводе добавки С-3, способствует пластификации смеси и образованию плотного осадка;
- щелочная, противоморозная добавка-поташ вызывает образование крупных агрегатов – флокул, быстрое оседание которых приводит к образованию рыхлого, объемного осадка;
- влияние добавок на устойчивость пластичных цементных систем окажет решающее влияние на формирование структуры искусственного камня.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Добавки для бетонов. Общие технические условия: СТБ 1112-98. – Введ. 18.06.1998. – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 1998. – 23 с.
2. Бабаев, В.А. Исследование реологических свойств цементного теста с суперпластификатором С-3 / В.А. Бабаев // Реология бетонных смесей и ее технологические задачи: тез. докл. IV Всесоюз. симпозиум; Рижский политехн. ин-т; под ред. Г.Я. Куннос. – Рига, 1982. – С. 58–60.
3. Шипулин, А.А. Реологические свойства цементного теста с суперпластификатором С-3 / А.А. Шипулин // Реология бетонных смесей и ее технологические задачи: тез. докл. IV Всесоюз. симпозиум; Рижский политехн. ин-т; под ред. Г.Я. Куннос. – Рига, 1982. – С. 75–76.
4. Курбатова, И.И. Влияние сульфата и карбоната калия на кинетику изменения состава жидкой фазы и структуру цементных паст / И.И. Курбатова // Физико-химические исследования цементного камня и бетона: тр. НИИЖБ, 1972. – М.: Госстройиздат. – Вып. 7. – С. 23–25.
5. Ратинов, В.Б. Химия в строительстве / В.Б. Ратинов, Ф.М. Иванов. – М.: Стройиздат, 1977. – 210 с.

УДК 666.972.135

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ДОБАВОК  
НА СТРУКТУРУ И ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ****Т.Г. ЕРМОЛАЕВА, К.А. КОСТЮРИНА***(Представлено: канд. техн. наук, доц. Ю.И. КИРЕЕВА)*

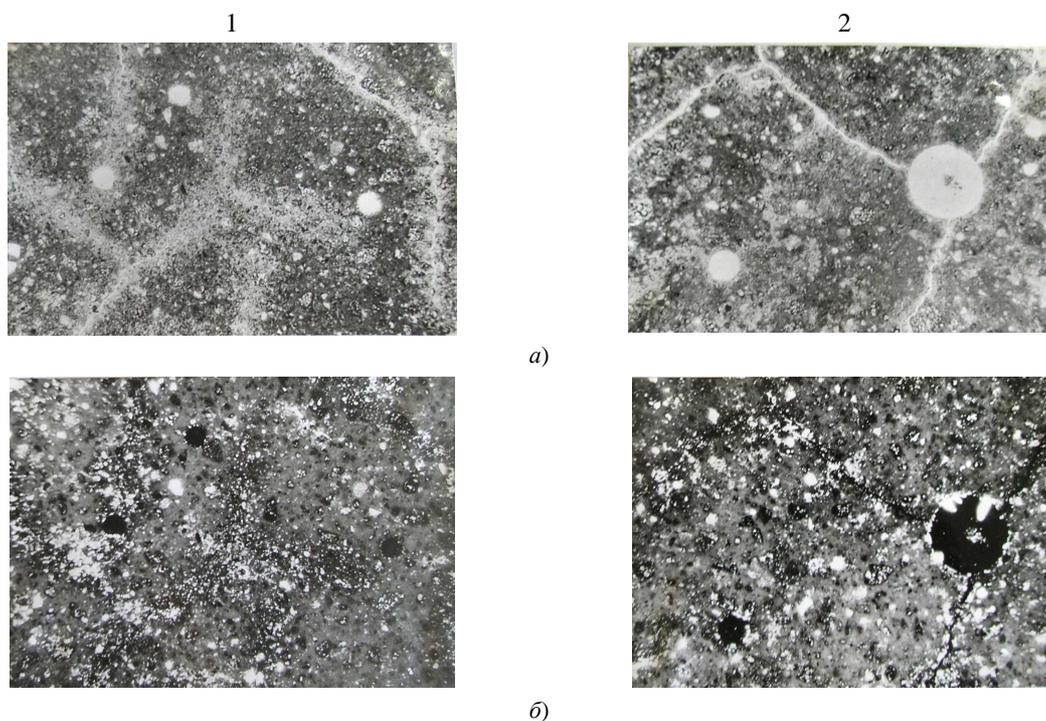
*Представлены данные исследования влияния добавок (С-3, поташ) на структуру цементного камня по кинетике водопоглощения и результатам микроскопии, а также на интенсивность роста прочности до нормируемой цементных образцов, твердевших в нормальных условиях.*

Процесс структурообразования цементных систем, как показывают результаты исследований ряда авторов [1–6], начинается сразу после приготовления смеси. Наблюдаемые при высоком водосодержании такие отрицательные явления, как водоотделение, расслоение, приводят в дальнейшем при твердении к формированию пористой структуры, преобладанию открытой пористости и, как следствие, к снижению эксплуатационных свойств – морозостойкости, водонепроницаемости, прочности. Однородная, связная смесь обеспечивает получение искусственного камня, имеющего высокие показатели качества.

В тяжелом бетоне заполнитель всегда имеет более высокие плотность и прочность по сравнению с цементным камнем, структура которого в основном зависит от начального водосодержания, поэтому определяющее влияние на свойства бетона оказывают структура и объем цементного камня. Следовательно, можно предположить, что те начальные физико-химические процессы, которые происходят при контакте цемента с водой или раствором затворения, в случае использования химических добавок определяют макроструктуру цементного камня и бетона в целом.

Исследования, проведенные нами на цементных суспензиях без добавок и с химическими добавками (противоморозная – карбонат калия (поташа) и суперпластификатор – С-3), показали, что щелочная добавка поташа вызывает флокулирующий эффект, сопровождаемый образованием крупных агрегатов, их быстрое оседание и формирование объемного пористого осадка. Органическая, гидрофильная добавка С-3 способствует диспергированию цементных зерен, окруженных сольватной оболочкой, их медленному оседанию и, как следствие, формированию плотного осадка. Предположительно, что характер осадка окажет определяющее влияние на пористость и прочность цементного камня.

Показатели структуры оценивали по стандартной методике Бруссера – кинетике водопоглощения [7] – и на прозрачных шлифах из цементного камня с исследуемыми добавками под поляризационным микроскопом МИН-8 (×90) в проходящем и отраженном свете (рисунок).



Структура цементного камня с добавками:  
С-3 (1) и поташ (2) в проходящем (а) и отраженном (б) свете

Кинетику водопоглощения определяли на предварительно высушенных до постоянной массы образцах из цементного камня ( $V/C = 0,5$ ), размером  $2 \times 2 \times 2$  см, твердевших 28 суток в нормальных условиях. Контроль водопоглощения проводили через 15 минут, 30 минут и 24 часа.

Представленные в таблице экспериментальные данные подтверждают сделанные ранее предварительные предположения.

В первые 15 минут контакта с водой самое высокое водопоглощение наблюдалось у образцов со щелочной добавкой, что говорит о преобладании в структуре камня крупных, открытых пор, наименьшее – у образцов с пластифицирующей добавкой, обладающих плотной, мелкопористой структурой. Составы, затворенные водой, занимают промежуточное положение. Кинетика роста прочности цементных образцов отображена в таблице.

Влияние добавок на структуру и прочность цементного камня

Вид добавки	Количество добавки, % от цемента	Водопоглощение (m), %			Предел прочности на сжатие, МПа,		
		через определенное время					
		15 мин	1 ч	24 ч	7 сут	14 сут	28 сут
б/д	–	13,03	14,90	17,00	25,70	30,19	34,72
С-3	0,3	10,80	11,85	13,61	26,90	32,98	39,84
	0,6	10,05	11,15	13,11	27,09	33,79	43,32
Поташ	5	14,54	17,06	18,60	20,47	23,96	28,88
	10	14,95	17,78	18,91	17,98	20,29	25,21

Сравнение полученных данных показывает четкую корреляцию показателей. Причем влияние структуры, сформированной на начальном этапе контакта «вяжущее – вода затворения», на прочность камня является определяющей не только на ранних стадиях твердения, но и в нормируемом возрасте – 28 суток. При сравнении с контрольным бездобавочным составом недобор прочности в образцах с поташом в 28 суток твердения в нормальных условиях составил около 30 %, в то время как прирост прочности у образцов с добавкой С-3 – 20 %.

Таким образом, в заключение исследования можно сделать следующие выводы:

- структура цементного теста, сформированная в результате седиментационных процессов, определяет структуру цементного камня;
- гидрофильная, пластифицирующая добавка С-3 благодаря диспергирующему влиянию на цементные зерна обеспечивает формирование плотной, мелкопористой структуры цементного камня;
- противоморозная щелочная добавка поташ, обладающая флокулирующим действием на цементные зерна, способствует образованию открытых пор и повышению общей пористости;
- характер структуры является определяющим показателем прочности цементного камня;
- по сравнению с бездобавочным составом цементный камень с добавкой поташа имеет пониженную прочность, недобор которой в 28 суток твердения в нормальных условиях составляет около 30 %;
- состав цементного камня с добавкой С-3 на протяжении всех контролируемых сроков твердения имел более высокую прочность. Прирост прочности по сравнению с бездобавочным составом в 28 суток составил 20 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рамачандран, В.С. Наука о бетоне. Физико-химическое бетоноведение / В.С. Рамачандран, Дж.Б. Фельдман. – М.: Стройиздат, 1986. – 277 с.
2. Рамачандран, В.С. Добавки в бетон: справ. пособие / В.С. Рамачандран, Дж.Б. Фельдман, Р.К. Колмбардем. – М.: Стройиздат, 1988. – 420 с.
3. Изотов, В.С. Химические добавки для модификации бетона / В.С. Изотов. – М.: ПАЛЕОТИП, 2006. – 205 с.
4. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1973. – 210 с.
5. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны / В.Г. Батраков. – М.: Стройиздат, 1982. – 150 с.
6. Афанасьев, Н.Ф. Добавки в бетоны и растворы / Н.Ф. Афанасьев, М.К. Целуйко. – Киев, Будівельник, 1989. – 165 с.
7. БЕТОНЫ. Методы определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости: ГОСТ 12730.0-78. – Введ. 01.01.80. – Переизд. – Минск: Госстандарт, 1986. – 31 с.