Строительные материалы и изделия

УДК 691: 620.193.26

© А. Н. Гришина, канд. техн. наук, с. н. с.
(Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет,
Москва, Россия)

E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru

© Е. В. Королев, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: prorektor.umn@spbgasu.ru

© А. В. Михеев, начальник управления
(ООО «Трансстроймеханизация», Москва, Россия)

E-mail: mikheev@tsm-msk.ru

© В. А. Гладких, директор
(Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет,
Москва, Россия)

E-mail: gladkich_87@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-6-140-148

© А. Н. Grishina, PhD in Sci. Tech.,
senior research worker

(National Research Moscow State University
of Civil Engineering, Moscow, Russia)

E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru

© E. V. Korolev, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: prorektor.umn@spbgasu.ru

© A. V. Mikheev, head of department
(LLC "Transstroymekhanizaciya",
Moscow, Russia)

E-mail: mikheev@tsm-msk.ru

© V. A. Gladkikh, director
(National Research Moscow State University
of Civil Engineering, Moscow, Russia)

E-mail: gladkich_87@mail.ru

ВЛАЖНОСТНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ БЕТОНА, ПОДВЕРЖЕННОГО ЩЕЛОЧНОЙ КОРРОЗИИ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ¹

MOISTURE DEFORMATION OF CONCRETE SUBJECTED TO ALKALINE CORROSION. EXPERIMENTAL RESULTS

Представлены результаты исследования образцов-керна бетона, извлеченных из бетонного покрытия летного поля и подверженных щелочной коррозии. Показано, что по характеру кинетики объемных деформаций образцы бетона можно классифицировать на три группы: образцы, подверженные преимущественно набуханию; образцы, подверженные преимущественно усадке; образцы, имеющие выраженный техногенный метасоматоз. Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические выводы, сделанные из модели техногенного метасоматоза. Выявлены факты протекания скрытого техногенного метасоматоза, подтверждающие его широкое распространение для бетонных изделий. Исследование объемных деформаций образцов в процессе их экспозиции в различных средах является дополнительной информацией для оценки долговечности материала: наличие деформаций образцов является свидетельством протекания обменных процессов, которые будут снижать эксплуатационные свойства материала с интенсивностью, возрастающей во времени.

Ключевые слова: щелочная коррозия, техногенный метасоматоз, объемные деформации, внутренние напряжения, интенсивность деформаций, химический состав.

The authors present the results of the study of concrete core samples extracted from the concrete coating of the airfield that was exposed to alkaline corrosion. It is shown that by the nature of the volumetric deformation kinetics, concrete samples can be classified into three groups: samples mainly subjected to swelling; samples mainly subjected to shrinkage; samples that have a marked technogenic metasomatism. The experimental investigation results have confirmed the theoretical conclusions drawn on the base of the technogenic metasomatism model. There have been revealed the facts of latent technogenic metasomatism, confirming its prevalence in concrete products. The study of volumetric deformation of samples during their exposure to various media provides additional information for assessing the material's durability: the ascertained deformation of the samples is the evidence of the exchange processes that will reduce the operation properties of the material with an intensity increasing over time.

Keywords: alkaline corrosion, technogenic metasomatism, volumetric deformation, internal stresses, intensity of deformation, chemical composition.

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз # FSWG-2020-0007»).

Введение

При эксплуатации строительных материалов (структурообразование в эксплуатационный период) протекают процессы, приводящие к изменению химического состава и/или параметров структуры материала, которые можно образно представить как «приспособление к изменяющимся внешним условиям». Такие изменения, сопровождающиеся закономерным уменьшением изобарно-изотермического потенциала (свободной энергии Гиббса системы), в [1, 2] предложено называть техногенным метасоматозом. При его протекании отмечается, что материал проявляет свойства самовосстановления [3], повышения долговечности [4, 5], особенно отмечается положительное влияние подобных структур в составе композитов [6]. Фактически техногенный метасоматоз представляет собой последовательность физико-химических процессов, протекание которых становится возможным в связи с изменением условий окружающей среды. Поэтому протекающие физико-химические процессы могут приводить как к повышению физико-механических свойств и долговечности материала [7, 8], так и вызывать его деструкцию.

В работе [9] предложена модель циклического изменения деформаций бетона вследствие протекания процессов техногенного метасоматоза. Теоретический анализ представленной модели показывает, что при эксплуатации материала должны наблюдаться явления, называемые своеобразными индикаторами техногенного метасоматоза:

- циклические деформации «набухание–влажностная усадка». Причем число циклов может быть различным. Оно зависит от количества и активности вещества материала, участвующего в техногенном метасоматозе;
- наличие асимметрии в максимальных деформациях при набухании и при влажностной усадке;
- вынос вещества материала в жидкую фазу и/или на поверхность материала.

Бетон, подверженный щелочной коррозии, даже при нормальной эксплуатации подвергается попеременному воздействию различных внешних факторов. При этом происходит приспособление материала к каждому из поочередно воздействующих факторов. Указанное не

всегда позволяет своевременно идентифицировать протекание техногенного метасоматоза в конструкциях, что может привести к разрушению материала. Поэтому для идентификации деструктивных процессов необходимо экспериментальное исследование влажностных деформаций бетона и процессов техногенного метасоматоза при его длительном увлажнении.

Методика проведения исследований. Для проведения исследований были использованы образцы-kerne цементного бетона, эксплуатируемые более 10 лет в бетонном покрытии аэродрома. Физико-химическими и химическими методами для указанного бетона была подтверждена щелочная коррозия [10]. Из различных участков летного поля было отобрано 55 образцов-kerne.

Измерение деформаций таких образцов, полностью погруженных в водопроводную воду, производили в двух взаимно перпендикулярных направлениях в течение 28 суток с использованием линейного компаратора. Точность измерения составляла 0,001 мм.

Также производили анализ соединений, выделяющихся как на поверхности образцов, так и в воду в процессе экспозиции. Для идентификации был применен метод ИК-Фурье-спектроскопии (ИК-Фурье-спектрофотометр Cary 630).

Для обработки полученных результатов были использованы различные индикаторы (рис. 1):

- максимальные $A_{\max}$ и минимальные $A_{\min}$ деформации образцов. Величина $A_{\max}$ характеризует максимальные объемные деформации набухания образцов, а $A_{\min}$ — деформации объемной влажностной усадки (в [9] влажностная усадка — усадка образцов материала, которая наблюдается при его экспозиции в жидкой фазе), а также число переходов V_i от набухания к влажностной усадке;
- соотношение деформаций образца в двух взаимно перпендикулярных направлениях $|A_{\min}/A_{\max}|$ и коэффициент $k_{\sigma}^{(-)}$, характеризующий величину внутренних растягивающих напряжений;
- интенсивность изменения окраски поверхности образца-керны. Оценка проводилась визуально в баллах I_c ;

• показатель, характеризующий интенсивность деформации, «набухание — влажностная усадка»:

$$k_s = \frac{S^{(+)} + S^{(-)}}{S^{(+)} - S^{(-)}},$$

где $S^{(i)}$ — площадь под кривой кинетики деформации; символ «+» указывает на набухание, символ «-» — на влажностную усадку.

Показатель k_s может принимать следующие значения:

- $k_s = 1$ — указывает на протекание только набухания материала;
- $k_s = -1$ — указывает на протекание только влажностной усадки материала;
- $-1 < k_s < 1$ — наличие циклического изменения «набухание–влажностная усадка»: при $k_s \rightarrow -1$ — преобладание влажностной усадки, а при $k_s \rightarrow 1$ — преобладание набухания.

Полученные результаты и их обсуждение.

Результаты экспериментальных исследований и расчетов представлены в табл. 1.

Анализ полученных данных показывает, что по характеру кинетики влажностного деформирования все образцы бетона можно классифицировать на три группы:

- образцы бетона, для которых характерно набухание. Доля таких образцов составила 18,2 % (I группа);
- образцы бетона, для которых наблюдается уменьшение размеров в процессе экспозиции в воде. Доля таких образцов составила 25,5 % (II группа);

• образцы бетона, для которых характерен четко выраженный техногенный метасоматоз со сменой режима «набухание–влажностная усадка». Доля таких образцов составляет 56,4 % (III группа).

Необходимо отметить, что для образцов I и II групп (образцы, для которых характерно увеличение или уменьшение размера) также характерно слабовыраженное протекание техногенного метасоматоза. Особенностью для этих групп образцов является отсутствие точек перехода режима «набухание–влажностная усадка». Однако им также присуще отсутствие асимптотического характера кинетики деформирования (рис. 2) и окрашивание поверхности образцов $I_c > 0$, что совместно указывает на протекание обменных процессов. Доля образцов бетона, для которых имеются четко выраженные признаки техногенного метасоматоза (наличие точек перехода и окрашивание поверхности), составляет 45,5 %.

Однако проявление техногенного метасоматоза может быть замаскировано, поэтому образцы, для которых характерно проявление только набухания или только влажностной усадки, должны исследоваться на протекание скрытого техногенного метасоматоза (рис. 3)

Расчет $|A^{(-)}/A^{(+)}|$, k_s и $k_s^{(-)}$ при этом проводится на основании рис. 3. При этом за $A_{\min}$ или $A_{\max}$ принимается сумма максимальных расстояний между точками $A_{\min}$ или $A_{\max}$ и прямыми, соединяющими ближайшие точки экстремумов кривой деформации. Площади $S^{(-)}$ и $S^{(+)}$ рассчитыва-

Рис. 1. Схема обработки результатов экспериментов

Таблица 1

Результаты исследований образцов-кернах и некоторые результаты их анализа

№ образца	Характеристики кинетики деформации $\varepsilon_{w,v} = f(t)$						$ A_{\min}/A_{\max} $	k_s	$k_{\sigma}^{(-)}$
	$A_{\max}$	$A_{\min}$	B_i	$S^{(+)}$	$S^{(-)}$	I_c			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,0002	-0,0048	2	0,0001	-0,0572	1	25,4	-1,00	0,04
2	0,0045	-	0	0,0721	0,0000	3	-	1,00	-
3	0,0014	-0,0010	2	0,0051	-0,0081	4	0,7	-0,23	1,34
4	0,0066	-	0	0,1069	0,0000	2	-	1,00	-
5	0,0017	-0,0004	3	0,0180	-0,0009	4	0,3	0,90	3,91
6	-	-0,0065	0	0,0000	-0,1365	3	-	-1,00	-
7	-	-0,0062	0	0,0000	-0,1008	5	-	-1,00	-
8	0,0009	-0,0006	1	0,0079	-0,0019	4	0,7	0,62	1,38
9	0,0036	-	0	0,0687	0,0000	3	-	1,00	-
10	-	-0,0075	0	0,0000	-0,1071	3	-	-1,00	-
11	0,0020	-	0	0,0395	0,0000	3	-	1,00	-
12	-	-0,0030	0	0,0000	-0,0371	6	-	-1,00	-
13	0,0062	-0,0011	3	0,0198	-0,0051	1	0,2	0,59	5,46
14	-	-0,0014	0	0,0000	-0,0268	3	-	-1,00	-
15	0,0067	-0,0002	1	0,0727	-0,0011	0	0,0	0,97	29,72
16	0,0017	-0,0009	1	0,0224	-0,0036	3	0,5	0,73	1,93
17	0,0011	-0,0035	1	0,0022	-0,0653	3	3,1	-0,94	0,32
18	0,0078	-0,0026	3	0,0491	-0,0145	0	0,3	0,54	3,03
19	0,0001	-0,0048	1	0,0001	-0,0741	3	89,0	-1,00	0,01
20	0,0029	-0,0001	1	0,0429	-0,0002	4	0,0	0,99	26,39
21	0,0004	-0,0050	1	0,0010	-0,0641	2	12,1	-0,97	0,08
22	0,0023	-0,0043	3	0,0102	-0,0266	1	1,8	-0,44	0,54
23	0,0001	-0,0036	1	0,0003	-0,0476	3	24,9	-0,99	0,04
24	0,0009	-0,0032	1	0,0023	-0,0373	4	3,6	-0,88	0,28
25	-	-0,0018	0	0,0000	-0,0323	3	-	-1,00	-
26	0,0095	-0,0048	1	0,0296	-0,0804	0	0,5	-0,46	1,96
27	0,0023	-0,0022	2	0,0080	-0,0265	1	1,0	-0,54	1,02
28	0,0039	-	0	0,0641	0,0000	3	0,0	1,00	-
29	0,0083	-0,0028	1	0,0256	-0,0422	3	0,3	-0,24	2,93
30	0,0006	-0,0014	2	0,0013	-0,0123	4	2,4	-0,80	0,41
31	-	-0,0023	1	0,0000	-0,0391	3	-	-1,00	-
32	0,0097	-0,0009	1	0,0378	-0,0074	0	0,1	0,67	10,63
33	0,0014	-0,0006	2	0,0183	-0,0013	5	0,4	0,87	2,27
34	-	-0,0048	0	0,0000	-0,0781	3	-	-1,00	-
35	0,0020	-	0	0,0233	0,0000	3	-	-1,00	-
36	-	-0,0058	0	0,0000	-0,0682	3	-	-1,00	-
37	-	-0,0069	0	0,0000	-0,1444	3	-	-1,00	-
38	-	-0,0063	0	0,0000	-0,0815	3	-	-1,00	-
39	-	-0,0021	0	0,0000	-0,0398	3	-	-1,00	-
40	0,0027	-0,0019	2	0,0097	-0,0239	4	0,7	-0,42	1,43
41	0,0044	-	0	0,0718	0,0000	3	-	1,00	-
42	0,0022	-0,0006	2	0,0165	-0,0011	3	0,3	0,87	3,54
43	0,0015	-0,0011	2	0,0081	-0,0104	1	0,8	-0,13	1,33
44	0,0006	-0,0001	2	0,0069	-0,0001	0	0,2	0,97	5,45

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
45	0,0068	–	0	0,1366	0,0000	3	–	1,00	–
46	–	–0,0029	0	–0,0578	0,0000	3	–	1,00	–
47	–	–0,0079	0	–0,1777	0,0000	4	–	1,00	–
48	0,0028	–0,0003	1	0,0097	–0,0033	3	0,1	0,49	11,12
49	–	–0,0016	0	0,0000	–0,0202	3	–	–1,00	–
50	0,0005	–0,0031	1	0,0010	–0,0659	1	5,9	–0,97	0,17
51	0,0023	–	0	0,0355	0,0000	5	–	1,00	–
52	0,0005	–0,0022	1	0,0007	–0,0288	5	4,1	–0,95	0,24
53	0,0008	–0,0011	2	0,0034	–0,0094	4	1,3	–0,47	0,77
54	0,0002	–0,0015	2	0,0016	–0,0101	0	7,0	–0,72	0,14
55	0,0060	–	0	0,1455	0,0000	3	–	1,00	–

лись как сумма площадей ограниченных прямыми областей.

Результаты расчетов приведены в табл. 2, их анализ показывает, что для всех образцов значение коэффициента k_s не принимает значений, равных $|1,0|$, то есть верно: $-1 < k_s < +1$. При этом величина $|A_{\min}/A_{\max}|$ близка к нулю, а значения $k_{\sigma}^{(-)}$ не превышают 0,02, что значительно меньше указанного коэффициента для образцов бетона с четко выраженным проявлением техногенного метасоматоза (см. табл. 1).

Таким образом, для всех образцов характерны процессы техногенного метасоматоза различной интенсивности: уменьшения величины амплитуды колебаний свидетельствуют о протекании либо начальной (в случае положительной величины деформаций), либо конечной (в слу-

чае отрицательной величины деформаций) стадии процесса.

С увеличением продолжительности протекания щелочной коррозии в цементном бетоне наблюдается уменьшение величины k_s , что также свидетельствует об усадке длительно эксплуатирующегося бетона, подверженного щелочной коррозии и, соответственно, релаксации внутренних напряжений. Процессы релаксации сопровождаются накоплением в теле бетона продуктов щелочной и иной коррозии. В естественных условиях из-за смены условий работы цементного бетона продукты метасоматоза остаются в теле бетона или выделяются в небольшом количестве, создавая внутренние напряжения. Однако при длительном влажностном воздействии происходит окрашивание некоторых об-

Рис. 2. Кинетика деформирования образцов бетона I и II групп

Рис. 3. Особенности расчетов деформаций образцов I и II групп

Таблица 2

Результаты исследований образцов-кернах I и II групп и некоторые результаты их анализа

№ образца	Характеристики кинетики деформации $\varepsilon_{w,v} = f(t)$					$ A_{\min}/A_{\max} $	k_s	$k_{\sigma}^{(-)}$
	$A_{\max}$	$A_{\min}$	$S^{(+)}$	$S^{(-)}$	I_c			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	0,0045	-0,0036	0,0721	-0,0209	3	0,0081	0,5509	0,0080
4	0,0066	-0,0014	0,1069	-0,0224	2	0,0080	0,6531	0,0080
6	0,0043	-0,0065	0,0154	-0,1365	3	0,0108	-0,7970	0,0107
7	0,0058	-0,0062	0,0574	-0,1008	5	0,0120	-0,2741	0,0119
9	0,0036	-0,0007	0,0687	-0,0075	3	0,0043	0,8035	0,0043
10	0,0089	-0,0075	0,0131	-0,1071	3	0,0164	-0,7816	0,0162
11	0,0020	-0,0003	0,0395	-0,0009	3	0,0023	0,9578	0,0023
12	0,0051	-0,0030	0,0152	-0,0371	6	0,0080	-0,4194	0,0080
14	0,0005	-0,0014	0,0007	-0,0268	3	0,0019	-0,9460	0,0019
25	0,0016	-0,0018	0,0047	-0,0323	3	0,0033	-0,7453	0,0033
28	0,0039	-0,0024	0,0641	-0,0177	3	0,0063	0,5670	0,0062
34	0,0049	-0,0048	0,0171	-0,0781	3	0,0098	-0,6410	0,0097
35	0,0020	-0,0006	0,0233	-0,0097	3	0,0026	0,4106	0,0026
36	0,0056	-0,0058	0,0011	-0,0682	3	0,0114	-0,9689	0,0113
37	0,0040	-0,0069	0,0079	-0,1444	3	0,0110	-0,8961	0,0108
38	0,0060	-0,0063	0,0308	-0,0815	3	0,0122	-0,4516	0,0121
39	0,0017	-0,0021	0,0099	-0,0398	3	0,0038	-0,6010	0,0038
41	0,0044	-0,0011	0,0718	-0,0168	3	0,0055	0,6200	0,0055
45	0,0068	-0,0014	0,1366	-0,0165	3	0,0082	0,7843	0,0082
46	0,0019	-0,0029	0,0065	-0,0578	3	0,0049	-0,7982	0,0048
47	0,0059	-0,0079	0,0070	-0,1777	4	0,0138	-0,9239	0,0136
49	0,0015	-0,0016	0,0172	-0,0202	3	0,0031	-0,0810	0,0031
51	0,0023	-0,0018	0,0355	-0,0123	5	0,0040	0,4861	0,0040
55	0,0060	-0,0006	0,1455	-0,0122	3	0,0066		0,0065

разцов бетона белым налетом, состоящим из карбоната кальция (рис. 4). Интенсивность этого окрашивания может быть связана со стадией протекания щелочной коррозии. Так, для неокрашенных образцов $A_{\min} < A_{\max}$ при условиях: $A_{\min} > -0,5 \%$ и $A_{\max} < 1,0 \%$. В остальных случаях наблюдается в различной степени выраженное выделение карбоната кальция [11] на поверхности, что связано как с интенсивностью карбонизации бетона при разрушении, так и с вымыванием карбоната кальция при эксплуатации бетонного покрытия (рис. 4).

В случае окрашивания образцов бетона следует для установления протекания щелочной коррозии проводить исследования жидкости (воды), в которой проводилась экспозиция образцов. Это связано с изменением вязкости и химического состава жидкости при протекании техногенного метасоматоза. Растворенное вещество было выделено методом выпаривания и исследовано методом ИК-Фурье-спектроскопии (рис. 5).

Анализ рис. 5 показывает, что образец содержит примесь в форме карбоната кальция,

Рис. 4. ИК-Фурье-спектрограмма белого налета, образующегося при хранении в воде цементного бетона

Рис. 5. ИК-спектрограмма вещества, выделившегося из образцов-керна бетона при их экспозиции в воде

а основные линии соответствуют мегациклиту — водорастворимому гидросиликату натрия и калия [12].

Выводы

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования на образцах-кернах бетона, подверженного щелочной коррозии, подтвердили теоретические выводы, сделанные из модели техногенного метасоматоза [9]. Кроме того, выявлены факты протекания скрытого техногенного метасоматоза. Установление данного факта указывает на широкое распространение техногенного метасоматоза. Исследование объемных деформаций образцов в процессе их экспозиции в различных средах — дополнительная информация для оценки долговечности материала: наличие деформаций образцов является свидетельством протекания обменных процессов, которые будут снижать эксплуатационные свойства материала с интенсивностью, возрастающей во времени.

Библиографический список

1. Лесовик В. С., Володченко А. А. К проблеме техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // Вестник Белгородского гос. технологического ун-та им. В. Г. Шухова. 2015. № 4. С. 38–41.
2. Лесовик В. С. Строительные материалы. Настоящее и будущее // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12, № 1 (100). С. 9–16.
3. Лесовик В. С. Техногенный метасоматоз в строительном материаловедении // Стройсиб-2015. Строительные материалы — 4С: состав, структура, состояние, свойства: междунар. сб. науч. тр. Томск: Томский гос. архит.-строит. ун-т, 2015. С. 26–30.
4. Лесовик В. С., Володченко А. А. Современное представление об эволюции строительных материалов // Региональная научно-техническая конференция по итогам ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимая Российским фондом фундаментальных исследований и правительством Белгородской области: сб. докл. Белгород: Белгородский гос. технологический ун-т им. В. Г. Шухова, 2016. С. 188–198.
5. Толстой А. Д., Пучка О. В., Глаголев Е. С., Козленко Б. В., Ахмед А. А. А., Аль-бу-али У. С. Д. Техногенный метасоматоз и решение вопроса долговечности строительных материалов // Наука молодых — будущее России: сб. науч. ст. 4-й Междунар. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых: в 8 т. /

отв. ред. А. А. Горохов. Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2019. Т. 6. С. 363–370.

6. Чулкова И. Л. Геоника и закон сродства структур в строительном материаловедении // Архитектура, строительство, транспорт: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (к 85-летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ»). Омск: СибАДИ, 2015. С. 576–581.

7. Лесовик В. С., Фомина Е. В. Кристаллогенетические аспекты техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства: междунар. науч.-практ. конф., посвященная 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, чл.-корр. РААСН, д-ра техн. наук, проф. Валерия Станиславовича Лесовика. Белгород: Белгородский гос. технологический ун-т им. В. Г. Шухова, 2016. С. 151–156.

8. Лесовик В. С., Фомина Е. В., Айзенштадт А. М. Некоторые аспекты техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // Строительные материалы. 2019. № 1–2. С. 100–106.

9. Королев Е. В., Гришина А. Н., Михеев А. В., Гладких В. А. Влажностные деформации бетона, подверженного щелочной коррозии. Модель процесса // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 134–143.

10. Гришина А. Н., Земляков А. Н., Королев Е. В., Охотникова К. Ю., Смирнов В. А. Статистическое моделирование как метод выявления коррозии цементных композитов // Вестник МГСУ. 2014. № 4. С. 87–97.

11. Коровкин М. В., Ананьева Л. Г. Инфракрасная спектроскопия карбонатных минералов. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2016. 75 с.

12. Зубкова Н. В., Пеков И. В., Чуканов И. В., Лисицын Д. В., Рабаданов М. Х., Пушаровский Д. Ю. Новые данные о мегациклите // Новые данные о минералах. 2007. Вып. 42. С. 81–92.

References

1. Lesovik V. S., Volodchenko A. A. *K probleme tekhnogennoy metasomatoza v stroitel'nom materialovedenii* [On the problem of technogenic metasomatoses in construction materials science]. *Vestnik Belgorodskogo gos. tekhnologicheskogo un-ta im. V. G. Shukhova – Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 2015, no. 4, pp. 38–41.
2. Lesovik V. S. *Stroitel'nye materialy. Nastoyashchee i budushchee* [Construction materials. The present and the future]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2017, vol. 12, no. 1 (100), pp. 9–16.
3. Lesovik V. S. *Tekhnogenniy metasomatoz v stroitel'nom materialovedenii* [Technogenic metasomatoses in construction materials science]. *Sb.*

nauch. tr. «Stroysib-2015. Stroitel'nye materialy — 4S: sostav, struktura, sostoyanie, svoystva» [In: Collection of scientific works «Stroysib-2015. Building materials-4C: composition, structure, condition, properties»]. Tomsk, Tomskiy gos. arkhitekt.-stroitel. un-t Publ., 2015, pp. 26–30.

4. Lesovik V. S., Volodchenko A. A. *Sovremennoe predstavlenie ob evolyutsii stroitel'nykh materialov* [Modern interpretation of building materials' evolution]. *Trudy Regional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po itogam orientirovannykh fundamental'nykh issledovaniy po mezhdistsiplinarnym temam, provodimaya Rossiyskim fondom fundamental'nykh issledovaniy i Pravitel'stvom Belgorodskoy oblasti* [Proceedings of the Regional scientific and technical conference on the results of fundamental research on interdisciplinary topics held by the Russian Foundation for basic research and the Government of the Belgorod region]. Belgorod, Belgorodskiy Gos. Tekhnologicheskii Un-t im. V. G. Shukhova Publ., 2016, pp. 188–198.

5. Tolstoy A. D., et al. *Tekhnogenniy metasomatoz i reshenie voprosa dolgovechnosti stroitel'nykh materialov* [Technogenic metasomatoses and solving the problem of durability of building materials]. *Trudy 4-y Mezhdunar. nauch. konf. perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh «Nauka molodykh — budushchee Rossii»* [Proceedings of the 4-th International scientific conference of promising developments of young scientists «Science of young people as the future of Russia»]. In 8 vols. Ed. By Gorokhov A. A. Kursk, Yugo-Zapadnyy Gos. Un-t Publ., 2019, vol. 6, pp. 363–370.

6. Chulkova I. L. *Geonika i zakon srodstva struktur v stroitel'nom materialovedenii* [Geonics and the law of affinity of structures in construction materials science]. *Trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (k 85-letiyu FGBOU VPO «SibADI») «Arkhitektura, stroitel'stvo, transport»* [Proceedings of the International scientific and practical conference (devoted to the 85-th anniversary of SibADI) «Architecture, Construction, Transport»]. Omsk, SibADI Publ., 2015, pp. 576–581.

7. Lesovik V. S., Fomina E. V. *Kristallogeneticheskie aspekty tekhnogennogo metasomatoza v stroitel'nom materialovedenii* [Crystallogenic aspects of technogenic

metasomatoses in construction materials science]. *Trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennaya 70-letiyu zasluzhennogo deyatelya nauki RF, chl.-korr. RAASN, d-ra tekhn. nauk, prof. Valeriya Stanislavovicha Lesovika «Intellectual'nye stroitel'nye kompozity dlya zelenogo stroitel'stva»* [Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 70-th anniversary of the Honored Scientist of the Russian Federation, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Prof. Valery Stanislavovich Lesovik «Intelligent building composites for green construction»]. Belgorod, Belgorodskiy Gos. Tekhnologicheskii Un-t im. V. G. Shukhova Publ., 2016, pp. 151–156.

8. Lesovik V. S., Fomina E. V., Ayzenshtadt A. M. *Nekotorye aspekty tekhnogennogo metasomatoza v stroitel'nom materialovedenii* [Some aspects of technogenic metasomatoses in construction materials science]. *Stroitel'nye materialy – Building materials*, 2019, no. 1(2), pp. 100–106.

9. Korolev E. V., Grishina A. N., Mikheev A. V., Gladkikh V. A. *Vlazhnostnyye deformatsii betona, podverzhennogo shchelochnoy korrozii. Model' protsessa* [Humidity deformation of concrete subjected to alkaline corrosion. The process model]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 4 (81), pp. 134–143.

10. Grishina A. N., et al. *Statisticheskoe modelirovanie kak metod vyyavleniya korrozii tsementnykh kompozitov* [Statistical modeling as a method for detecting corrosion of cement composites]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2014, no. 4, pp. 87–97.

11. Korovkin M. V., Anan'eva L. G. *Infrakrasnaya spektroskopiya karbonatnykh mineralov* [Infrared spectroscopy of carbonate minerals]. Tomsk, Tomsk Politekh. Un-t Publ., 2016, 75 p.

12. Zubkova N. V., et al. *Novye dannye o megatsiklite* [New data on megacyclite]. *Novye dannye o mineralakh – New Data on Minerals*, 2007, iss. 42, pp. 81–92.