

УДК 691.32

Эдуард Иванович БАТЯНОВСКИЙ,
доктор технических наук,
профессор,
заведующий кафедрой
"Технология бетона
и строительные материалы"
Белорусского национального
технического университета (БНТУ)

**Александр Иванович
БОНДАРОВИЧ,**
инженер научно-исследовательской
испытательной лаборатории
(НИИЛ)
модифицированного бетона
и строительной продукции БНТУ

Павел Владимирович РЯБЧИКОВ,
инженер НИИЛ
модифицированного бетона
и строительной продукции БНТУ

ВЛИЯНИЕ МНОГОКРАТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА СВОЙСТВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

REPEATED MECHANICAL LOADS AFFECTING THE PROPERTIES OF HEAVY CONCRETE

В статье изложены результаты исследований влияния повторяющихся статических (сжатие) и динамических (ударных) нагрузок на прочность, водопоглощение и истираемость вибропрессованного тяжелого бетона (мелкозернистого и с крупным заполнителем).

Целью исследований явилось установление критериальных значений различных нагрузок, способных вызвать деструкцию бетона и снижение его сопротивляемости воздействию других агрессивных факторов, в частности, замораживания-оттаивания, водонасыщения-высушивания, а также воздействия солей-антиобледенителей для разработки в последующем методики неразрушающего контроля ожидаемой долговечности бетона конструкций покрытий дорог и зон благоустройства в процессе эксплуатации.

Выполненные исследования позволили расширить и углубить представления о влиянии многократно повторяющихся механических нагрузок на прочность, водопоглощение и износоустойчивость тяжелого бетона и выявить их роль и значение как факторов, влияющих на эксплуатационную надежность и долговечность бетона.

The paper presents the research results of the repeated static (compression) and dynamic (impact) loads affecting the strength, water absorption and abrasion of vibrated heavy concrete (fine grained and coarse concrete).

The research aimed at establishing the criterion values of different loads which can cause concrete destruction and reduce its capacity to resist the effects of other aggressive factors such as freezing-thawing, water saturation-drying out, as well as deicing salt effects. These values were needed for the subsequent development of a nondestructive inspection technique for evaluating the durability of concrete in the road pavement structures and rehabilitation zones in service.

The investigation carried out allowed to widen and deepen the knowledge of the repeated mechanical loads affecting the strength, water absorption and abrasion of heavy concrete and reveal their role and significance as factors influencing on the serviceability and durability of concrete.

ВВЕДЕНИЕ

Долговечность и эксплуатационная надежность бетонных покрытий дорог, элементов благоустройства городов и поселений зависят от сочетания ряда факторов. В частности, качества бетона и изготовленных из него изделий, связанного с технологическими факторами, рассмотренными в статье [1] на основе литературных данных и результатов исследований авторов, а также совокупностью эксплуатационных факторов. Последние образуют сложное физико-химическое воздействие на бетон, которое дополняется и усиливается механическими нагрузками: истиранием, ударным воздействием, нагрузками от массы перемещающихся технических средств при строительстве, уборке или обслуживании территории, нагрузками от движущегося транспорта и

пр. При этом уровень механических нагрузок на бетон вполне может превысить порог начала трещинообразования и существенно повлиять на его долговечность, что по существу не учитывается при оценке последней по морозостойкости бетона.

Изменения прочностных и упруго-деформативных свойств бетона под сжимающей статической нагрузкой, проявляющиеся при этом упругие и пластические деформации, развивающиеся в процессе загрузки при длительном воздействии нагрузки, а также при воздействии многократных динамических нагрузок, достаточно детально изучены для конструктивных бетонов различной прочности, составов и видов [2–12]. Влияние же возникающего под действием механических нагрузок напряженного состояния, вызывающего образование дефектов в объеме цементного камня и бетона в целом,

на его эксплуатационные свойства изучено не достаточно [13–18]. По существу отсутствуют системные данные о влиянии многократно приложенной статической или динамической (ударной) нагрузки различного уровня на возможные изменения, например, морозостойкости, водонепроницаемости, а также на изменение количества поглощаемой бетоном воды, износоустойчивости (истираемости). В результате не представляется возможным на основании имеющейся в нормативных документах информации обосновать роль и степень влияния механических нагрузок на эксплуатационные свойства бетона и, соответственно, оценить и спрогнозировать эксплуатационную надежность и долговечность изделий из него, находящихся в процессе эксплуатации.

В статье представлены результаты исследований влияния многократно повторяющихся механических нагрузок на изменение структуры (трещинообразование) и свойств тяжелого бетона в кинетике накопления "усталости" материала под их воздействием без дополнительного влияния других физико-химических агрессивных эксплуатационных факторов. Целью исследований явилось установление критериальных значений различных нагрузок, способных вызвать деструкцию бетона и снижение его сопротивляемости воздействию других агрессивных факторов, в частности, замораживания-оттаивания, водонасыщения-высушивания, а также воздействия солей-антиобледенителей для разработки в последующем методики неразрушающего контроля ожидаемой долговечности бетона конструкций покрытий дорог и зон благоустройства в процессе эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ БЕТОНА И ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалы для бетона

Вязущее — портландцемент марки ПЦ 500-ДО ПРУП "Кричевцементношифер" (активность $R_{ц} = 44$ МПа (прочность на растяжение при изгибе 6,2 МПа)); коэффициент нормальной густоты $K_{нг} = 0,26$; плотность $\rho_{ц} \sim 3100$ кг/м³; удельная поверхность $S_{уд,ц} \sim 2980$ см²/г.

Мелкий заполнитель — природный песок заглавного месторождения, мытый (средняя плотность: в рыхло-насыпном состоянии $\rho_{п}^0 \sim 1580$ кг/м³, в виброуплотненном $\rho_{п}^a \sim 1800$ кг/м³; плотность зерен $\rho_{п}^z = 2650$ кг/м³; крупнозернистый $M_k = 2,7$; удельная поверхность $S_{уд,п} = 6410$ м²/т; удельное водопоглощение поверхности $V_{ад,уд} = 25,8$ л/кг; пустотность в виброуплотненном состоянии $P_{п}^e = 32$ %).

Крупный заполнитель — щебень гранитный микашевичского месторождения (марка по дробимости 1400; средняя плотность: в рыхло-насыпном состоянии $\rho_{щ}^0 \sim 1310$ кг/м³, в виброуплотненном $\rho_{щ}^a \sim 1480$ кг/м³; плотность зерен $\rho_{щ}^z = 2700$ кг/м³; зерновой состав: фракция менее 5 — 5 %; фракция от 5 до 10 — 90 %; фракция от 10 до 20 — 5 %; пустотность в виброуплотненном состоянии $P_{щ}^e = 0,454$).

Для затворения бетона использовали водопроводную воду, удовлетворяющую требованиям СТБ 1114-98.

Общая методика исследований

Цель выполненных исследований заключалась в выявлении закономерностей изменения свойств бетона: прочности на сжатие, пористости (по водопоглощению) и истираемости под воздействием многократно повторяющихся механических нагрузок (статических и динамических). Предполагая, что продолжительное их воздействие на бетон должно в какой-то момент привести к нарушениям его структуры, отслеживали изменение скорости прохождения ультразвукового импульса (далее — скорость распространения ультразвука) в процессе экспериментов, чтобы установить взаимосвязь "деструкция бетона—его прочность (водопоглощение, истираемость)—скорость ультразвука" с целью разработки в последующем методики неразрушающего контроля состояния бетона в процессе эксплуатации. При этом статическую механическую нагрузку на образцы бетона имитировали многократным загрузением их под прессом с усилием, соответствующим 30 %, 50 %, 70 % и 90 % прочности бетона от ее значения в проектном возрасте (28 суток); динамическую механическую нагрузку на образцы бетона имитировали ударами копра-плотномером по одной из поверхностей образца.

Во всех случаях состав бетона характеризовался расходом его составляющих на 1 м³ бетона, принятых как оптимальные [1] при показателе жесткости $J \sim 15-25$ с:

а) мелкозернистый (цементно-песчаный) бетон:

- цемент Ц = 500 кг;
- сухой песок П = 1600 кг;
- вода В $\approx 160-170$ л (В/Ц $\sim 0,32-0,33$);

б) бетон со щебнем:

- цемент Ц = 450 кг;
- щебень гранитный Щ = 600 кг;
- песок П = 1150 кг;
- вода В $\approx 160-170$ л (В/Ц $\sim 0,35-0,37$).

Образцы бетона уплотняли на виброплощадке со стандартными параметрами ($A = 0,5$ мм; $f \approx 50$ Гц) в течение времени и под пригрузом, обеспечивающим получение расчетного качества (степени) его уплотнения, соответствующего средней плотности не ниже, кг/м³:

- для свежееотформованного мелкозернистого бетона — 2250;
- для бетона со щебнем — 2350.

Данные по определенным в исследованиях характеристикам бетона получены как средние значения с соблюдением правил обработки результатов испытаний, установленных в соответствующих нормативных документах.

Учитывая существенное влияние на эксплуатационные свойства бетона условий его твердения, практикуемых предприятиями Беларуси, испытания вели на сериях образцов, хранившихся:

- а) от момента изготовления в помещении лаборатории в условиях гидроизоляции (под полиэтиленовой пленкой);
- б) на воздухе в помещении лаборатории (воздушно-сухие при средней температуре воздуха 18 °С–23 °С и относительной влажности 60 %–70 %);
- в) в помещении лаборатории после пропаривания по режиму: предварительная выдержка — 2 ч; подъем температуры в лабораторной ямной камере до 50 °С — 2 ч;

изотермическая выдержка при этой температуре — 6,5 ч; остывание образцов бетона вместе с камерой 6–10 ч.

Образцы испытывали в проектном (28 суток) возрасте. Для получения сравнительных характеристик в каждой серии образцов бетона имелись контрольные, которые испытывали на аналогичные показатели без воздействия механических нагрузок.

Водопоглощение бетона определяли по методике ГОСТ 12730.3 с начальным водонасыщением образцов и последующим их высушиванием.

Прочность бетона на сжатие определяли по ГОСТ 10180 (приведена к базовому образцу-кубу с ребром 150 мм) в состоянии естественной влажности образцов и после водонасыщения их по методике ГОСТ 10060.0, то есть за 96 ч с "погружением" образцов в воду за три приема. Данные по прочности насыщенных таким образом образцов являлись контрольными в процессе слежения за изменениями этого показателя при последующих испытаниях.

Истираемость бетона определяли по методике ГОСТ 13087 на круге истирания ЛКИ-3 в состоянии естественной влажности образцов и после водонасыщения их по методике ГОСТ 10060.0.

Скорость распространения ультразвука определяли в соответствии с положениями ГОСТ 18105 "Бетоны. Правила контроля прочности" и ГОСТ 17624 "Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности" при сквозном прозвучивании образцов.

ВЛИЯНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА СВОЙСТВА БЕТОНА

Изменение прочности на сжатие

При оценке изменений прочности бетона (здесь и далее — прочность на сжатие) образцы вначале многократно "сжимали и отпускали" на прессе с заданной нагрузкой установленное для данного опыта количество раз, а затем нагрузку доводили до разрушающей. Результаты этих испытаний приведены в таблице 1. Эксперимент прекращали после снижения прочности бетона на 20 % и более от уровня начальной.

Из данных таблицы 1 следует, что со временем циклически или многократно повторяющаяся статическая механическая нагрузка приводит к снижению прочности бетона. Этот отрицательный эффект прямо зависит от уровня нагрузки и числа циклов ее воздействия. При этом очевидно "лавинообразное" нарастание деструкции бетона при переходе нагрузки за предел в 70 % от проектной прочности бетона.

Вместе с тем, налицо способность бетона к длительному сопротивлению сжимающей статической периодически прикладываемой нагрузки в пределах до 40 % от ее проектных значений. Снижение прочности бетона к 70 циклам испытаний составило менее 10 %, а по данным, не вошедшим в таблицу 1, — снижение более чем на 20 % соответствовало 120 и более циклам "сжатия-отпуска" под нагрузкой в 40 % от проектной.

Полученные экспериментальные данные согласуются с теоретическими представлениями о трещинообразова-

нии тяжелого бетона под механической нагрузкой, сформулированными в теории Гриффитса в середине 20-х годов, окончательно сформировавшимися в 60–70-ых годах прошлого века и наиболее детально рассмотренными в исследованиях научной школы О.Я. Берга [3–5].

Согласно этой теории при нагружении бетона механической нагрузкой состояние его структуры и несущая способность связаны с двумя параметрическими точками: f^0_T — нижней границей трещинообразования и f^V_T — верхней границей трещинообразования. Напряжения, не превышающие уровень нижней границы трещинообразования f^0_T , не опасны для бетона при многократном приложении нагрузки или ее постоянном воздействии. В случае, если многократно повторяющаяся нагрузка находится в пределах $f^0_T < f_c < f^V_T$, то имеет место накопление "усталости" бетона и образец со временем разрушается. Естественно, что при уровне нагрузки и, соответственно, напряжений в бетоне для случая $f_c > f^V_T$ разрушение происходит ускоренно. Причины постоянного (или ускоренного) разрушения бетона видятся в образовании микротрещин за пределами напряжений, превышающих f^0_T , которые под действием повторяющейся нагрузки "развиваются" в макродефекты структуры, приводящие к необратимым деструктивным явлениям и потере прочности бетоном. Согласно имеющимся в технической литературе данным о действии статической нагрузки на бетон, заметные изменения в его структуре и несущей способности отсутствуют примерно до ее уровня $0,65f_{c,пр}$, т. е. до 65 % от значения призмочной прочности бетона. Учитывая, что по данным О.Я. Берга $f_{c,пр} \sim 0,783f_{c,cube}$ (кубиковая прочность бетона), то уровень безопасных для бетона напряжений будет примерно соответствовать $(0,65 \cdot 0,783)f_{c,cube} \sim (50\%)f_{c,cube}$. В то же время нижняя граница трещинообразования по данным О.Я. Берга соответствует $f^0_T \sim 0,46f_{c,пр}$ или в пересчете на кубиковую прочность бетона $(0,45 \cdot 0,783)f_{c,cube} \sim (36\%)f_{c,cube}$, то есть 30 %–40 % от уровня "кубиковой" прочности бетона. Верхняя граница трещинообразования f^V_T характеризует уровень напряжений, при которых имеет место необратимое развитие и "раскрытие" трещин в объеме бетона. По разным данным их значения соответствуют 60 %–65 %, достигая в отдельных случаях 70 % от уровня прочности бетона на сжатие.

Таким образом, полученные нами экспериментальные данные соответствуют важнейшим теоретическим представлениям, связывающим процессы трещинообразования в бетоне под воздействием статической механической нагрузки с изменением его прочности. То есть они с полным основанием могут служить базой и для оценки соответствующих изменений эксплуатационных свойств бетона. Следует отметить (см. таблицу 1) ускорение процесса деструкции бетона при циклическом воздействии механической нагрузки в случае испытаний водонасыщенных образцов. Наличие свободной жидкости в бетоне проявляется как в виде расклинивающего эффекта при сжатии образцов бетона, так и в том, что вода способна проникать в образующиеся в бетоне трещины, которые при ее наличии не

Таблица 1. Влияние статической нагрузки на прочность бетона при циклических испытаниях

Уровень статической нагрузки, % от $f_{c,28}$	Прочность бетона, МПа													Прочность бетона по последнему значению, %
	В возрасте 28 суток	После числа циклов "сжатие-отпуск", цикл												
		1	2	3	4	5	10	20	30	40	50	60	70	
Естественные условия твердения (под пленкой)														
30*	45	—	—	—	—	45	46	45	44	44	43	43	42	93
	53	—	—	—	—	53	53	54	52	52	53	52	51	96
50	45	—	—	—	—	45	45	43	43	43	40	37	35	78
	53	—	—	—	—	53	53	52	51	50	49	47	45	85
50**	43	—	—	—	—	43	42	40	38	37	35	33	-	77
	52	—	—	—	—	52	52	50	48	47	45	43	41	79
70	45	—	—	—	—	45	45	42	39	36	—	—	—	80
	53	—	—	—	—	53	53	51	49	45	40	—	—	75
70**	43	—	—	—	—	43	41	37	33	—	—	—	—	77
	52	—	—	—	—	52	51	48	44	39	—	—	—	75
90	45	44	42	40	38	35	—	—	—	—	—	—	—	78
	53	52	50	48	45	42	—	—	—	—	—	—	—	80
Воздушно-сухие														
30	39	—	—	—	—	39	39	38	39	38	37	35	33	85
	48	—	—	—	—	48	49	48	47	46	46	44	42	88
50	39	—	—	—	—	39	38	38	36	35	33	31	-	78
	48	—	—	—	—	48	48	46	45	43	41	39	36	75
70	39	—	—	—	—	39	37	35	30	—	—	—	—	77
	48	—	—	—	—	48	47	44	42	37	—	—	—	76
90	39	38	36	35	32	—	—	—	—	—	—	—	—	81
	48	47	45	43	40	36	—	—	—	—	—	—	—	75
Пропаривание с дозреванием														
30	43	—	—	—	—	43	43	43	42	41	40	40	39	90
	51	—	—	—	—	51	51	50	50	49	49	48	47	93
50	43	—	—	—	—	43	43	42	40	38	37	35	32	75
	51	—	—	—	—	51	51	50	48	47	46	43	40	79
70	43	—	—	—	—	43	42	40	37	34	—	—	—	79
	51	—	—	—	—	51	50	49	47	43	—	—	—	64
90	43	43	41	37	35	32	—	—	—	—	—	—	—	74
	51	50	50	47	44	40	—	—	—	—	—	—	—	78
* Для всех уровней статической нагрузки: — верхняя строка — мелкозернистый бетон; — нижняя строка — бетон со щебнем. ** В водонасыщенном состоянии.														

самоликвидируются (не закрываются) после снятия нагрузки. В результате процесс развития и раскрытия трещин при каждом повторном нагружении идет интенсивнее и логично завершается ускоренным снижением прочности бетона. Выявленные тенденции характерны для всех вариантов твердения образцов бетона: в условиях гидроизоляции (под пленкой), дозревавших после пропаривания и твердевших на воздухе. В последнем случае "выносимость" бетона ниже, т. к. сказывается более высокая пористость материала, что влечет ускоренное снижение его прочности при циклических испытаниях.

Из полученных данных следует вывод: циклически действующая статическая механическая нагрузка, превышающая уровень 40 %–50 % от проектной прочности бетона, вызывает образование микротрещин, которые постепенно развиваются в макронарушения структуры бетона, что приводит к снижению его прочности.

Водопоглощение бетона

При оценке изменений количества поглощаемой образцами бетона воды в процессе циклических испытаний "сжатие-отпуск" получены данные, частично (для образцов, твердевших под пленкой) представленные в таблице 2.

Из результатов экспериментов следует, что даже при уровне циклической нагрузки в 30 % от прочности проектного возраста после 40 циклов "сжатие-отпуск" очевидна тенденция к росту количества поглощаемой бетоном воды и соответствующего, хотя и незначительного, роста водопоглощения бетона. С ростом нагрузки до 50 %-ного уровня и с увеличением количества циклов до 60 водопоглощение бетона возрастает практически в 2 и более раза. Для нагрузки в 70 % от проектной прочности водопоглощение бетона удваивается к 30–40 циклам испытаний, а для 90 %-ного уровня нагрузки — через 4–5 циклов.

Таблица 2

Уровень статической нагрузки, % от $f_{c,28}$	Прирост количества поглощаемой воды, г							Изменение водопоглощения по массе, %						
	В возрасте 28 суток	После количества циклов "сжатие-отпуск", цикл						В возрасте 28 суток	После количества циклов "сжатие-отпуск", цикл					
		2	5	20	30	40	60		2	5	20	30	40	60
30*	32	—	33	36	—	39	50	4,0	—	4,2	4,5	—	4,9	6,3
	26	—	27	29	—	31	41	3,1	—	3,2	3,5	—	3,8	4,9
50	32	—	36	41	—	47	67	4,0	—	4,6	5,2	—	5,9	8,5
	26	—	27	31	—	36	50	3,1	—	3,3	3,8	—	4,4	6,0
70	32	—	39	48	70	—	—	4,0	—	4,9	6,0	8,8	—	—
	26	—	30	35	42	52	—	3,1	—	3,6	4,2	5,1	6,3	—
90	32	53	67	—	—	—	—	4,0	6,7	8,5	—	—	—	—
	26	41	55	—	—	—	—	3,1	4,9	6,6	—	—	—	—

* Для всех уровней статической нагрузки:
 — верхняя строка — мелкозернистый бетон;
 — нижняя строка — бетон со щебнем.

Рост количества поглощенной воды является отражением процесса трещинообразования в бетоне и нарастающего увеличения объема дефектов его структуры, доступных для заполнения жидкостью в естественных условиях (при атмосферном давлении). Это значит, что согласно классификации А.В. Лыкова [19] образовавшиеся в объеме бетона трещины характеризуются размерами сечения более 0,1 мкм (более 1000 Å) и способны заполняться водой при контакте с ней, т. е. относятся к группе "макрокапилляров". Наличие и увеличение их количества в бетоне приводит к росту его проницаемости, что и отражается в увеличении количества поглощаемой воды. В целом данные об изменении водопоглощения бетона согласуются с ранее приведенными результатами по изменению его прочности под воздействием циклической нагрузки, что естественно, т. к. эти изменения вызваны одной и той же причиной: возникновением и развитием в объеме испытываемых образцов нарушений структуры. Появляющиеся в виде локальных микротрещин, они постепенно "развиваются" под воздействием знакопеременных деформаций циклически прикладываемой к бетону нагрузки и, со временем, образуют систему макрокапиллярных пор, "дополняющих" открытую сообщающуюся пористость бетона и увеличивающих его проницаемость.

Скорость распространения ультразвука

В таблице 3 приведены данные об изменении скорости распространения ультразвука в бетоне образцов в процессе циклических испытаний. Анализируя представленные в таблице 3 показатели, можно сделать вывод, что метод контроля за изменением структурных характеристик бетона с помощью ультразвука характеризуется достаточно высокой чувствительностью и его применение с данной целью оправдано. Этот вывод следует также из сопоставления данных таблиц 1–3 по изменениям,

соответственно, прочности, водопоглощения и скорости распространения ультразвука в образцах бетона при равных уровнях статической нагрузки в динамике роста циклов испытаний. Очевидно, что фиксируемое снижение скорости распространения ультразвука "намечается" раньше, чем прямыми испытаниями на сжатие устанавливается снижение прочности бетона и значительный

рост его водопоглощения. Это свидетельствует о том, что микронарушения в его структуре, вызываемые циклическим воздействием механической нагрузки, на определенном этапе не являются необратимыми. Если процесс раскрытия микротрещин не прогрессирует, то прочность бетона остается на уровне исходной или близкой к ней. Но скорость распространения ультразвукового импульса

при появлении микротрещин в бетоне начинает снижаться. Таким образом, ультразвуковое "прозвучивание" способно обеспечить контроль за состоянием бетона элементов мощения в процессе эксплуатации на более ранней стадии, чем когда уже образуются и проявляются видимые признаки нарушений его структуры.

Приведенные экспериментальные данные подтверждают логическую взаимосвязь развития деструктивных явлений с ростом нагрузки на бетон и с увеличением количества циклов "сжатия-отпуска". Так, накопление усталостных деформаций бетона с ростом количества циклов испытаний при нагрузках до 50 % от проектной прочности, а также массовое образование и развитие трещин с ростом нагрузки более чем на 70 % от проектной сопровождается ускоренным снижением скорости распространения ультразвука.

В таблице 4 представлены данные об изменении скорости распространения ультразвука в процессе однократных испытаний серий (среднее значение по трем образцам) образцов мелкозернистого бетона и бетона с крупным заполнителем, твердевших в течение 28 суток в различных условиях.

Методика испытаний заключалась в съеме показаний изменения скорости прохождения ультразвука в бетоне при ступенчатом подъеме нагрузки с шагом в 5 МПа вплоть до разрушения образцов.

Из сопоставления данных таблиц 3 и 4 следует, что при многократном нагружении до уровня нагрузки в 50 % от проектной прочности бетона

Таблица 3

Уровень статической нагрузки, % от $f_{c,28}$	Скорость распространения ультразвука V_{yz} , м/с									
	В возрасте 28 суток	После количества циклов "сжатие-отпуск", цикл								
		3	5	10	20	30	40	50	60	70
Естественные условия твердения (под пленкой)										
30*	4360	—	4350	4310	4300	4300	4240	4160	4040	3880
	4520	—	4520	4500	4500	4500	4440	4380	4350	4330
50	4360	—	4350	4350	4180	4060	3890	3660	3290	2800
	4520	—	4520	4500	4330	4210	4130	3950	3660	3270
70	4360	—	4270	3820	3300	2970	2780	—	—	—
	4520	—	4480	4360	4100	3910	3270	—	—	—
90	4360	3390	2100	—	—	—	—	—	—	—
	4520	3640	2380	—	—	—	—	—	—	—
Воздушно-сухие										
30	4190	—	4190	4160	4120	3960	3880	3760	3630	3510
	4400	—	4400	4400	4350	4305	4270	4290	4170	4110
50	4190	—	4100	4070	3980	3680	3350	2940	2530	—
	4400	—	4390	4350	4190	4080	400	3620	3390	3100
70	4190	—	3940	3750	3160	2850	2650	—	—	—
	4400	—	4300	4180	3910	3700	3180	—	—	—
90	4190	3060	1880	—	—	—	—	—	—	—
	4400	3200	2100	—	—	—	—	—	—	—
Пропаривание с дозреванием										
30	4280	—	4280	4230	4160	4010	3950	3900	3820	3630
	4480	—	4470	4440	4400	4370	4370	4290	4250	4205
50	4280	—	4260	4220	4100	3910	3630	3380	3050	2630
	4480	—	4470	4400	4270	4150	4060	3810	3570	3180
70	4280	—	4070	3790	3210	2910	2690	—	—	—
	4480	—	4370	4220	4005	3820	3190	—	—	—
90	4280	3180	2030	—	—	—	—	—	—	—
	4480	3330	2210	—	—	—	—	—	—	—

* Для всех уровней статической нагрузки:
 — верхняя строка — мелкозернистый бетон;
 — нижняя строка — бетон со щебнем.

Таблица 4

Условия твердения бетона	Скорость распространения ультразвука V_{y3} , м/с												
	В возрасте 28 суток	Под нагрузкой, МПа											
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Естественные (под пленкой)*	4420	4420	4410	4400	4400	4380	4330	4290	4180	4090	**	—	—
	4640	4640	4640	4640	4610	4610	4600	4580	4490	4450	4330	4100	**
Воздушно-сухие	4230	4210	4130	4090	3970	3850	3580	3400	3130	**	—	—	—
	4500	4460	4440	4410	4400	4460	4300	4270	4160	4080	3880	**	—
Пропаривание с дозреванием	4300	4270	4270	4230	4200	4140	4100	3900	3790	3640	**	—	—
	4530	4530	4500	4480	4470	4430	4380	4300	4240	4180	4040	**	—

* Для всех уровней статической нагрузки:
— верхняя строка — мелкозернистый бетон;
— нижняя строка — бетон со щебнем.

** При переходе к данному уровню нагрузки образцы разрушились.

скорость распространения ультразвука примерно также стабильна, как при однократной загрузке образцов до уровня 50 %–60 %. Многократно приложенная циклическая нагрузка с 50 %-ного уровня прочности бетона вызывает более интенсивное снижение скорости распространения ультразвука, чем однократное нагружение его не только равной нагрузкой, но и нагрузкой, приближающейся к пределу прочности бетона. Например, для образцов мелкозернистого бетона естественных условий твердения (первая строка таблиц 3 и 4) скорость распространения ультразвука перед разрушением при однократных испытаниях составила 4090 м/с (нагрузка соответствовала $(45:48) \cdot 100 = 94$ % от фактической прочности). Примерно равное значение V_{y3} для циклических испытаний образцов-аналогов соответствовала 30 циклам испытаний под нагрузкой в 50 % и 5–10 циклам — при нагрузке в 70 % (строки 3 и 5 таблицы 3). Полученные данные свидетельствуют об интенсивном развитии "дефектности" структуры бетона при циклически действующей механической нагрузке.

Истираемость бетона

Оценку изменений истираемости бетона, как наиболее трудоемких испытаний, осуществляли после выявления критических изменений в прочности бетона под циклически прикладываемой нагрузкой, выбрав для сравнительных испытаний отдельные серии образцов (таблица 5). Испытания проводили на водонасыщенных образцах-кубах размерами 70x70x70 мм. Водонасыщение осуществляли после циклического нагружения образцов на "сжатие-отпуск".

Данные экспериментов, приведенные в таблице 5, свидетельствуют, что многократно повторяющаяся циклическая нагрузка до уровня 50 % от проектной прочности весьма медленно приводит к снижению показателя истираемости бетона. Этот процесс начинает прогрессировать с увеличением нагрузки до уровня более 70 % от проектной прочности бетона и только при нагрузке более 90 % от проектной, многократное воздействие

которой вызывает массовое трещинообразование в объеме бетона, его сопротивляемость истиранию резко падает: практически через 5 циклов "сжатия-отпуска" увеличивается в 1,5 и более раза. При нагрузках, не превышающих 70 %-ного уровня проектной прочности бетона, отсутствуют явно выраженные "сбросы" показателя истираемости. Ее значения постепенно увеличива-

Таблица 5

Уровень статической нагрузки, % от $f_{c,28}$	Истираемость образцов бетона И, г/см ²				
	В возрасте 28 суток	После количества циклов испытаний, цикл			
		5	30	40	60
Естественные условия твердения (под пленкой)					
30*	0,41	—	0,43	0,46	0,54
	0,32	—	0,33	0,34	0,38
50	0,41	—	0,47	0,53	0,62
	0,32	—	0,36	0,41	0,49
70	0,41	—	0,50	0,61	—
	0,32	—	0,38	0,49	—
90	0,41	0,67	—	—	—
	0,32	0,52	—	—	—
Воздушно-сухие					
30	0,49	—	0,52	—	0,69
	0,40	—	0,42	—	0,51
70	0,49	—	0,68	0,76	—
	0,40	—	0,49	0,60	—

* Для всех уровней статической нагрузки:
— верхняя строка — мелкозернистый бетон;
— нижняя строка — бетон со щебнем.

ются, что отражает поступательное развитие трещинообразования в бетоне.

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ (УДАРНОЙ) НАГРУЗКИ НА СВОЙСТВА БЕТОНА

Исследовались изменения прочности, водопоглощения, скорости распространения ультразвука и истираемости образцов, которые подвергали многократному воздействию сосредоточенной ударной нагрузкой, реализуя ее посредством ударов груза копра-плотномера динамического (СТБ 1242-2000; масса груза (ударника) — 2,5 кг; высота падения по вертикально устанавливаемому направляющему штоку — 300 мм; ударная нагрузка передается на бетон острием штока в виде конуса с углом при вершине 60°).

Грань образцов, по которой наносили удары, была верхней (кроме оговоренных в тексте случаев) в процессе испытаний на сжатие и истираемость. То есть исходили из условия, что место приложения механического воздействия на бетон образцов должно соответствовать рабочей поверхности элементов мощения, полов, дорожных покрытий и пр. Изменения скорости распространения ультразвука отслеживали в направлении, перпендикулярном направлению ударов и параллельно ему.

Изменение прочности бетона

Образцы мелкозернистого бетона и бетона со щебнем подвергали многократному ударному воздействию по приведенной ранее методике и периодически испы-

тывали на сжатие. Испытания прекращали, если снижение прочности бетона составляло более 20 % от начальной. Анализ результатов экспериментов, приведенных в таблице 6, свидетельствует, что многократно действующая динамическая сосредоточенная ударная нагрузка постепенно приводит к снижению прочности бетона на сжатие. Связано это явление с образованием в бетоне трещин под воздействием ударной нагрузки, направленных в основном по "оси удара", то есть по направлению распространения усилия от ударного импульса. Также выявлено, что если при последующем сжатии усилие направлено в соответствии с направлением действия предварительно приложенной ударной нагрузки, то снижение прочности бетона прогрессирует. В случае, если направление действия ударной нагрузки перпендикулярно направлению приложения в последствии нагрузки сжатия, отрицательный эффект трещинообразования в бетоне под воздействием ударной нагрузки снижается. Так, прочность образцов бетона (индекс — две звездочки, таблица 6) в этом случае более стабильна и темп ее снижения существенно ниже, чем у образцов-аналогов, у которых направление действия ударной и сжимающей нагрузок совпадает.

Означенное явление полностью согласуется с теоретическими представлениями [3–12] о механизме разрушения бетона при сжатии. Как известно, под усилием сжатия в образцах бетона возникают соответствующие деформации как по направлению оси приложения нагрузки, так и в поперечной ей плоскости. Последние сопровождаются образованием в бетоне трещин, которые

Таблица 6. Изменение прочности бетона на сжатие под воздействием ударной нагрузки

Условия твердения бетона	Вид бетона	Значение прочности бетона на сжатие, МПа							Прочность бетона по последнему значению, %
		В возрасте 28 суток	После количества ударов						
			25	50	75	100	125	150	
Естественные (под пленкой)	Мелкозернистый	45	45	44	43	41	39	34	75
		43*	41	37	32	—	—	—	74
		45**	45	44	43	43	42	41	91
	Со щебнем	53	53	52	52	50	48	44	83
		51*	50	47	43	39	—	—	76
		53**	53	53	52	52	51	50	94
Воздушно-сухие	Мелкозернистый	41	40	40	38	36	32	28	70
		39*	36	30	—	—	—	—	77
	Со щебнем	48	48	46	44	43	41	38	80
		46*	44	41	37	—	—	—	80
Пропаривание с дозреванием	Мелкозернистый	43	42	42	40	38	36	31	73
		41*	39	34	29	—	—	—	70
	Со щебнем	51	51	50	48	48	46	42	82
		50*	48	45	41	36	—	—	72

* В водонасыщенном состоянии.

** Направление ударов — по боковой грани.

возникают при превышении величин допустимых деформаций бетона при растяжении. Вначале возникают локальные микротрещины, которые с увеличением нагрузки развиваются (увеличиваясь в длину и по ширине) и, с течением времени или с ростом нагрузки, образуют ряд "лидирующих" макротрещин, вызывающих необратимую деструкцию и разрушение бетона. Ориентированы эти трещины вдоль оси сжатия образца.

Таким образом, в случае совпадения направления микротрещин, образующихся под воздействием ударной нагрузки, с направлением действия нагрузки сжатия, происходит "наложение" трещинообразования при сжатии образцов на уже имеющиеся и совпадающие по направлению микродефекты структуры бетона от динамической нагрузки. Отчего его прочность снижается.

Если же микротрещины от воздействия ударной нагрузки в своем большинстве расположены перпендикулярно направлению сжимающей нагрузки, то они способны самоликвидироваться и не оказывают существенного влияния на прочность бетона на сжатие. Снижение последней с ростом количества ударов может быть связано с "ответвлениями" микротрещин, ориентированных с отклонением от их "магистрального" направления и способных совпасть с трещинами, возникающими в бетоне при сжатии образцов. В какой-то мере они проявляют эффект концентраторов напряжений, приводящих к возникновению трещин в бетоне при сжатии.

Таким образом, наибольшую опасность с позиций снижения прочности бетона представляет ударная механическая нагрузка на верхнюю грань образца или изделия. При этом предварительное водонасыщение бетона способствует резкому снижению его прочности, особенно в случае сочетания многократного ударного воздействия и сжимающей нагрузки. Сущность данного явления заключается, с одной стороны, в усилении динамического ударного импульса за счет заполнения пор бетона несжимаемой жидкостью и, соответственно, более интенсивным трещинообразованием в его объеме, а с другой, — в ослаблении связей между частицами твердой фазы, т. е. между кристаллогидратными новообразованиями в цементном камне за счет адсорбции на их поверхности молекул воды, что также способствует развитию трещинообразования под воздействием динамической нагрузки. Кроме отмеченного, вследствие деформаций при сжатии бетона возрастает и "расклинивающий эффект" от присутствия жидкости в его порах, которые в рассматриваемом случае представлены не только "естественной" пористостью бетона, но и возникшими под ударной нагрузкой трещинами, способными интенсивно заполняться водой. В совокупности эти явления вызывают ускоренное снижение прочности бетона в водонасыщенном состоянии. При этом, чем больше количество поглощаемой бетоном воды (например, образцы воздушно-сухих условий твердения), тем в более высоком темпе снижается его

прочность при сочетании действия на образцы ударной и сжимающей нагрузок.

Водопоглощение бетона

В таблице 7 приведены данные об изменении водопоглощения бетона (мелкозернистого и со щебнем) различных условий твердения, образцы которого перед влагонасыщением подвергали многократному воздействию ударной нагрузки по ранее изложенной методике.

Из результатов экспериментов следует, что многократное воздействие сосредоточенной ударной нагрузки сопровождается ростом водопоглощения бетона с увеличением количества ударов копра. Общая тенденция соответствует монотонно нарастающей величине водопоглощения мелкозернистого бетона до 30 %–37 % через 150 ударов копра и до 22 %–27 % для образцов бетона со щебнем. Вместе с тем рост количества поглощаемой бетоном воды относительно невелик, так как возникающие под ударной нагрузкой дефекты структуры в основном имеют сечения с микро-размерами. Это подтверждается результатами данного эксперимента, так как только макрокапиллярные поры сечением более 0,1 мкм (более 1000 Å) могут заполняться водой в обычных условиях. Количество таких трещин, как свидетельствует данный эксперимент, относительно невелико.

Опасность трещинообразования под воздействием ударной нагрузки заключается в том, что при этом создаются локальные дефекты структуры бетона, которые затем (при сжимающей нагрузке, попеременном замораживании-оттаивании или насыщении-высушивании, под воздействием солевой коррозии и пр.) проявляют себя как концентраторы напряжений, ускоряющие процесс деструкции бетона.

Скорость распространения ультразвука

Согласно приведенным в таблице 8 данным имеет место общая тенденция к снижению скорости распространения ультразвука в бетоне с ростом количества ударов копра, но абсолютные значения понижения V_{ya} в целом невелики. Особенно это заметно в случае, когда направление приложенной ударной нагрузки и направ-

Таблица 7

Условия твердения бетона	Вид бетона	Водопоглощение по массе, %				Прирост водопоглощения, %
		В возрасте 28 суток	После количества ударов			
			50	100	150	
Естественные (под пленкой)	Мелкозернистый	4,0	4,3	4,8	5,6	30
	Со щебнем	3,1	3,3	3,5	3,8	22
Воздушно-сухие	Мелкозернистый	5,5	5,9	6,9	8,1	37
	Со щебнем	4,4	4,6	4,9	5,6	27
Пропаривание с дозреванием	Мелкозернистый	4,6	4,9	5,2	6,2	34
	Со щебнем	3,8	4,0	4,3	4,7	24

Таблица 8

Условия твердения бетона	Вид бетона	Скорость ультразвука $V_{уз}$, м/с						
		В возрасте 28 суток	После количества ударов					
			25	50	75	100	125	150
Естественные (под пленкой)	Мелкозернистый	4360	4360	4350	4335	4315	4300	4270
		4540*	4520	4505	4480	—	—	—
		4360**	4360	4350	4350	4335	4330	4320
	Со щебнем	4520	4515	4515	4505	4500	4490	4470
		4700*	4700	4685	4660	4640	—	—
		4520**	4520	4520	4510	4505	5500	4480
Воздушно-сухие	Мелкозернистый	4190	4180	4165	4145	4115	4030	4060
		4580*	4935	4470	—	—	—	—
	Со щебнем	4400	4400	4385	4380	4365	4345	4320
		4750*	4735	4710	4685	—	—	—
Пропаривание с дозреванием	Мелкозернистый	4280	4275	4270	4250	4230	4210	4175
		4500*	4430	4460	4430	—	—	—
	Со щебнем	4480*	4475	4475	4450	4365	4345	4320
		4700*	4685	4665	4640	4615	—	—

* В водонасыщенном состоянии.
** Направление ударов — по боковой грани.

ление прохождения ультразвукового импульса совпадают (данные с двумя звездочками; удары по боковой грани образцов).

Несколько больше (за равное количество ударов копра) относительное снижение величин $V_{уз}$ для водонасыщенных образцов, однако оно не соизмеримо с более значительным относительным снижением при этом прочности бетона на сжатие (см. таблицу 6), определенной после снятия показаний по скорости распространения ультразвука.

Таблица 9

Условия твердения бетона	Вид бетона	Истираемость образцов бетона И, г/см ²			
		В возрасте 28 суток	После количества ударов		
			50	100	150
Естественные (под пленкой)	Мелкозернистый	0,41	0,49	0,615	0,80
	Со щебнем	0,32	0,375	0,45	0,595
Воздушно-сухие	Мелкозернистый	0,49	0,60	0,755	0,99
	Со щебнем	0,40	0,47	0,59	0,76
Пропаривание с дозреванием	Мелкозернистый	0,43	0,515	0,65	0,845
	Со щебнем	0,36	0,43	0,52	0,675

По мнению авторов статьи, отмеченное несоответствие объясняется тем, что нарушения структуры под ударным воздействием характеризуются микроразмерами. Во многих случаях они не образуют, а "намечают" трещину, которая без последующих деформаций образцов (под нагрузкой сжатия, попеременного замораживания-оттаивания и др.) не развивается. В случае же приложения нагрузки, в частности при сжатии образцов, такой дефект структуры начинает прогрессировать. Кроме этого, в водонасыщенных образцах молекулы воды могут заполнять образующиеся под многократным воздействием ударной нагрузки макрокапилляры, что способствует стабилизации скорости распространения ультразвука, но одновременно приводит к снижению прочности бетона на сжатие.

Истираемость бетона

В таблице 9 приведены данные исследований истираемости бетона, водонасыщенного после многократного воздействия сосредоточенной ударной нагрузки на верхнюю (истираемую) грань образцов, из которых следует, что износоустойчивость образцов бетона под воздействием ударной нагрузки существенно снижается. Так, после 50, 100 и 150 ударов копра рост истираемости бетона в сравнении с образцами без нагрузки соответственно составил примерно 25 %-30 %; 60 %-70 % и 120 %-130 %. Отмеченный рост истираемости бетона очевидно связан с трещинообразованием в его поверхностном слое под воздействием многократно приложенной сосредоточенной динамической нагрузки. В результате возникновения микродефектов в структуре бетона ослабляются связи между кристаллогидратными новообразованиями в цементном камне и в зоне его контакта с заполнителем, снижается энергия их взаимодействия в местах этих нарушений и, соответственно, твердость и прочность камня. С увеличением количества ударов копра (особенно при наличии воды в порах бетона) возрастает удельная доля "пораженной" площади и увеличиваются сечение и длина трещин, что сопровождается снижением способности бетона сопротивляться воздействию абразивного материала при испытаниях на истираемость.

Следует отметить, что в рамках выполненных экспериментов установлен большой рост истираемости бетона под воздействием многократно приложенной сосредоточенной динамической нагрузки (см. таблицу 9) в сравнении с циклическим нагружением образцов статической нагрузкой при "сжатии-отпуске" (см. таблицу 5) до уровня последней более 70 % от проектной прочности бетона (т. е. до предельного значения верхней границы его трещинообразования).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 Выполненные исследования позволили расширить и углубить представления о влиянии многократно повторяющихся механических нагрузок на прочность, водопоглощение и износостойкость тяжелого бетона и выявить их роль и значение как факторов, влияющих на эксплуатационную надежность и долговечность бетона.
- 2 Установлено, что циклически действующая статическая нагрузка (реализованная циклами "сжатие образцов под прессом—отпуск нагрузки") на уровне 30 %–40 % от прочности бетона (что соответствует параметрической точке — нижней границе трещинообразования в бетоне) практически не вызывает ухудшения качества бетона длительный период. С ростом циклически действующей статической нагрузки сверх 50 %-ного уровня вызываемые ею деформации бетона проявляются в активном развитии процесса трещинообразования, а превышение 70%-ного уровня прочности бетона сопровождается образованием в его объеме макрокапиллярных пор, что приводит к рез-

кому росту водопоглощения и снижению прочности бетона.

- 3 Динамическая сосредоточенная ударная нагрузка вызывает образование в бетоне микротрещин, которые существенно снижают прочность бетона на сжатие. При этом наибольший отрицательный эффект наблюдается тогда, когда направление действия импульса от ударной нагрузки на бетон совпадает с направлением действия нагрузки при сжатии. В этом случае образующиеся в бетоне под ударной нагрузкой микротрещины инициируют образование и развитие таковых при последующем сжатии образцов бетона, что приводит к снижению его прочности.
- 4 Износостойчивость бетона резко снижается под воздействием динамической сосредоточенной ударной нагрузки на поверхность истирания, а также под воздействием статической нагрузки, превышающей 70 %-ный уровень прочности бетона, т. е. верхнюю границу трещинообразования.
- 5 Выявленные закономерности изменения скорости распространения ультразвука (V_{yz}) в бетоне в процессе испытаний его на прочность при воздействии статической и динамической нагрузок (как одного из существенных факторов, влияющих на долговечность бетона элементов благоустройства, дорожных покрытий и пр.) достоверно отражают взаимосвязь "скорость распространения ультразвука—состояние структуры бетона—свойства бетона", что обеспечивает возможность, контролируя изменение V_{yz} , оценивать изменения в структуре и свойствах бетона с перспективой разработки методики оценки его долговечности в процессе эксплуатации дорожных, тротуарных и иных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Батяновский, Э.И. Влияние технологических факторов на проницаемость вибропрессованного бетона / Э.И. Батяновский, А.И. Бондарович, П.В. Рябчиков // Строительная наука и техника. — 2006. — № 3(6). — С. 18–25.
- 2 Москвин, В.М. Морозостойкость бетона в напряженном состоянии / В.М. Москвин, А.М. Подвальный // Бетон и железобетон. — 1960. — № 2. — С. 58–64.
- 3 Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О.Я. Берг. — М.: Госстройиздат, 1962. — 96 с.
- 4 Берг, О.Я. О предельном состоянии железобетонных конструкций по долговечности / О.Я. Берг // Бетон и железобетон — 1964. — № 11. — С. 486–488.
- 5 Берг, О.Я. Усталостная прочность аглопоритобетона / О.Я. Берг, Г.С. Галузо // Бетон и железобетон. — 1969. — № 10. — С. 21–23.
- 6 Галузо, Г.С. Исследование прочности и деформации аглопоритобетона при действии статической и многократно повторяющейся сжимающих нагрузок: автореф. дисс. канд. технич. наук / Г.С. Галузо. — БПИ, Минск. — 1969. — 25 с.
- 7 Берг, О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. — М.: Стройиздат, 1971. — 208 с.
- 8 Сытник, В.И. Исследование микротрещинообразования в высокопрочных бетонах / В.И. Сытник, Ю.А. Иванов. — В сб.: Строительные конструкции. — Киев, 1969.
- 9 Ахвердов, И.Н. Напряженное состояние структуры бетона при одноосном сжатии / И.Н. Ахвердов, В.В. Сбочеляс // Доклад АН БССР. — Т. XVIII. — № 8. — 1974.
- 10 Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементных бетонов / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. — М.: Стройиздат, 1979. — 344 с.
- 11 Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. — М.: Стройиздат, 1981. — С. 403–440.
- 12 Байков, В.Н. Железобетонные конструкции. Общий курс / В.Н. Байков, Э.Е. Сигалов. — М.: Стройиздат, 1991. — Вып. XII. — С. 14–34; с. 238–251.
- 13 Дементьев, Г.К. Условие долговечности бетона и железобетона / Г.К. Дементьев. — Куйбышев: Куйбышевское книгоиздат, 1955. — 120 с.
- 14 Горчаков, Г.И. Повышение морозостойкости и прочности бетона / Г.И. Горчаков. — М.: Промстройиздат, 1956. — 107 с.
- 15 Попов, Н.Д. К вопросу об усталости бетона при многократных циклах чередующихся воздействий окружающей среды / Н.Д. Попов, В.А. Невский // Тр. МИСИ им. В.В. Куйбышева. — Сб. № 15. — М., 1957. — С. 73–90.
- 16 Москвин, В.М. Морозостойкость бетона в напряженном состоянии / В.М. Москвин, А.М. Подвальный // Бетон и железобетон. — 1960. — № 2. — С. 58–64.
- 17 Мощанский, Н.А. Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред / Н.А. Мощанский. — М.: Госстандарт, 1962. — 235 с.
- 18 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.
- 19 Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. — М.: Госиздат, 1968. — 472 с.

Статья поступила в редакцию 24.01.07.