

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

ISSN 0585-430X (Print)

ISSN 2658-6991 (Online)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ[®]

№ 4-5



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU АПРЕЛЬ-МАЙ 2020 г. (780)

БЕЗ ПРОБЛЕМ



Печи Мерц для обжига извести чрезвычайно эффективны при любом климате. На протяжении многих десятилетий. Там где Вы находитесь немного сыро? Без проблем: maerz.com





**КЛИНЦОВСКИЙ
СИЛИКАТНЫЙ
ЗАВОД**



КАЧЕСТВО, ПРОВЕРЕННОЕ ВРЕМЕНЕМ

Основан в 1973 году.

Награжден премией «Золотой Меркурий», как лучшее предприятие-экспортер в области промышленного производства. Производственные мощности: 360 тысяч тонн извести в год. Входит в состав «Союз производителей извести».

По оценке «ГС-Эксперт» – лидер продаж на рынке товарной извести Российской Федерации по итогам 2019 года.

EuroLime[®]
известь ■■■■



ЗАО «Клинцовский силикатный завод»
тел. 8 (48336) 2-98-80, www.k-silikat.ru

Официальный дистрибьютор
ООО «ХимТрейдинг», г. Брянск, ул. Красноармейская, 136 Б
тел. +7 (962) 146-44-48, e-mail: himtreading@yandex.ru

Технология производства извести

А.А. СЕМЁНОВ

Обзор российского рынка товарной извести: итоги 2019 и прогноз на 2020 год (Информация) 4

И.И. АКУЛОВА, Е.В. БАРАНОВ, Е.Н. БАРАНОВА

Региональные производители извести: потенциальные возможности и проблемы. 9

А.Н. РЯЗАНОВ, Д.А. СЕНИЦИН, Г.Ю. ШАГИГАЛИН, М.Р. БИКБУЛАТОВ, И.В. НЕДОСЕКО

**Твердые отходы содового производства – важный резерв расширения сырьевой базы
получения извести и низкоэнергоёмких бесклинкерных вяжущих на ее основе. 14**

Бетоны: наука и практика

В.И. ТРАВУШ, Н.И. КАРПЕНКО, В.Т. ЕРОФЕЕВ, И.В. ЕРОФЕЕВА,
И.Н. МАКСИМОВА, В.И. КОНДРАЩЕНКО, А.Г. КЕСАРИЙСКИЙ

Исследование порошково-активированных бетонов методами лазерной интерферометрии 18

А.А. БАТЮШЕНКО, Н.С. СОКОЛОВ

Ускоренное возведение монолитных конструкций здания в условиях пониженной температуры 29

В.В. СТРОКОВА, Н. СТОЙКОВИЧ, С.К. ЛАКЕТИЧ, П. ЖАО, А. ЛАКЕТИЧ, Н. ЛАКЕТИЧ

**Высокопроницаемые бетоны с дренающим эффектом:
анализ состояния вопроса и перспективы развития 32**

Материалы для дорожного строительства

С.Ю. АНДРОНОВ, А.Ф. ИВАНОВ, А.В. КОЧЕТКОВ

**Ремонт автомобильной дороги с применением фибросодержащих асфальтобетонных смесей
с диспергированным вяжущим 62**

А.В. КОРОЧКИН

Дорожные одежды из композитных материалов 68

М.Г. САЛИХОВ, Л.И. МАЛЯНОВА, Е.В. ВЕЮКОВ, В.М. ВАЙНШТЕЙН

**Оценка сравнительной долговечности модифицированных асфальтобетонов с отходами
дробления известняка методом искусственного старения при высокой температуре 75**

Ю.В. ШТЕФАН, Б.А. БОНДАРЕВ, Л.В. ЯНКОВСКИЙ

**Укрепление глинистых грунтов временных лесовозных дорог отходами промышленности
и металлургическими шлаками 80**

Материалы и технологии

А.С. ИНОЗЕМЦЕВ, Е.В. КОРОЛЁВ, Т.К. ДОУНГ

Структурная модель течения пластифицированных цементно-минеральных смесей 90

В.Д. КОТЛЯР, Н.И. НЕБЕЖКО, Ю.В. ТЕРЁХИНА, Ю.В. ПОПОВ, Ю.И. НЕБЕЖКО, Р.А. ЯЩЕНКО

Особенности получения клинкерного кирпича чёрного цвета 97

Р.И. ШИГАПОВ, Д.А. СЕНИЦИН, А.Р. БИКТАШЕВА, И.В. НЕДОСЕКО

Использование облегченного керамзита для утепления чердачных перекрытий 104

Founder of the journal:
«STROYMATERIALY»
Advertising-Publishing Firm, OOO
Registration certificate PI № 77-1989
Included in the list of journals of
the Higher Attestation Commission
(Russia), Project Russian Science
Citation Index (Russia), Russian
Science Citation Index on the platform
Web of Science

Editorial address:
9/3 Dmitrovskoye Highway,
127434, Moscow, Russian Federation

Monthly scientific-technical and industrial journal

STROITEL'NYE MATERIALY® № 4-5

Founded in 1955 (780) April-May 2020

Tel.: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Technology of lime manufacture

A.A. SEMENOV

Overview of the Russian Market of Commercial Lime: Results of 2019 and Forecast for 2020 (Information)..... 4

I.I. AKULOVA, E.V. BARANOV, E.N. BARANOVA

Regional Lime Producers: Potential Opportunities and Challenges 9

A.N. RIAZANOV, D.A. SINITSIN, G.Yu. SHAGIGALIN, M.R. BIKBULATOV, I.V. NEDOSEKO

**Solid Waste of Soda Production is an Important Reserve for Expanding the Raw Material Base
for Production of Lime and Low-Energy, Clinkerless Binders Based on it..... 14**

Concretes: science and practice

V.I. TRAVUSH, N.I. KARPENKO, V.T. EROFEEV, I.V. EROFEEVA,
O.V. TARAKANOV, V.I. KONDRASHCHENKO, A.G. KESARIYSKIY

Investigation of Powder-Activated Concretes by Laser Interferometry Methods 18

A.A. BATYUSHENKO, N.S. SOKOLOV

Accelerated Construction of Monolithic Structures of a Building Under Low Temperature Conditions..... 29

V.V. STROKOVA, N. STOJKOVICH, S.K. LAKETICH, P. ZHAO, A. LAKETICH, N. LAKETICH

High-Permeable Concrete with Drainage Effect: Analysis of the State and Prospects of Development..... 32

Materials for road construction

S.Yu. ANDRONOV, A.F. IVANOV, A.V. KOCHETKOV

Highway Repair Using Fiber-Containing Asphalt Concrete Mixes with Dispersed Binder 62

A.V. KOROCHKIN

Road Pavements Made of Composite Materials..... 68

M.G. SALIHOV, L.I. MALYANOVA, E.V. VEYUKOV, V.M. VAINSHEIN

**Evaluation of the Comparative Durability of Modified Asphalt Concretes
with Limestone Crushing Waste by Artificial Aging at High Temperature..... 75**

Y.V. SHTEFAN, B.A. BONDAREV, L.V. YANKOVSKI

On Strengthening Temporary Logging Road Clay Soil by Industrial Waste and Metallurgical Slags 80

Materials and technologies

A.S. INOZEMTSEV, E.V. KOROLEV, T.Q. DOUNG

Structural Flow Model of Plasticized Cement-Mineral Mixtures..... 90

V.D. KOTLYAR, N.I. NEBEZHKO, YU.V. TEREKHINA, YU.V. POPOV, YU.I. NEBEZHKO, R.A. YASHCHENKO

Features of Black Clinker Brick Production..... 97

R.I. SHIGAPOV, D.A. SINITSIN, A.R. BIKTASHEVA, I.V. NEDOSEKO

Use of Lightweight Expanded Clay for Insulation of Attic Floors 104

Редакционный совет

Главный редактор:

ЮМАШЕВА Е.И.,

инженер-химик-технолог, почетный строитель России

Председатель редакционного совета:

РЕСИН В.И.,

д-р экон. наук, профессор, академик РААСН (Москва)

АЙЗЕНШТАДТ А.М.,

д-р хим. наук, профессор (Архангельск)

АСКАДСКИЙ А.А.,

д-р хим. наук, профессор (Москва)

БУРЬЯНОВ А.Ф.,

д-р техн. наук, директор Российской гипсовой ассоциации (Москва)

ВАЙСБЕРГ Л.А.,

д-р техн. наук, профессор, академик РАН (Санкт-Петербург)

ВЕРЕЩАГИН В.И.,

д-р техн. наук, профессор (Томск)

ГОРИН В.М.,

канд. техн. наук, президент Союза производителей керамзита и керамзитобетона (Самара)

ЕРОФЕЕВ В.Т.,

д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Саранск)

КОРОЛЕВ Е.В.,

д-р техн. наук, профессор (Москва)

КРИВЕНКО П.В.,

д-р техн. наук, профессор (Украина)

ЛЕОНОВИЧ С.Н.,

д-р техн. наук, профессор (Беларусь)

ЛЕСОВИК В.С.,

д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН (Белгород)

МУРТАЗАЕВ С.-А.Ю.,

д-р техн. наук, профессор (Грозный)

НЕДОСЕКО И.В.,

д-р техн. наук (Уфа)

ПИЧУГИН А.П.,

д-р техн. наук, профессор (Новосибирск)

ПУХАРЕНКО Ю.В.,

д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН (Санкт-Петербург)

ТРАВУШ В.И.,

д-р техн. наук, академик РААСН (Москва)

ФЕДОСОВ С.В.,

д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Иваново)

ФИШЕР Х.-Б.,

доктор-инженер (Германия)

ХОЗИН В.Г.,

д-р техн. наук, профессор (Казань)

ЧЕРНЫШОВ Е.М.,

д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Воронеж)

ШЕБЛ С.М.,

д-р наук, профессор (Египет)

ШЛЕГЕЛЬ И.Ф.,

канд. техн. наук (Омск)

ШТАКЕЛЬБЕРГ Д.И.,

д-р техн. наук, профессор (Израиль)

ЯКОВЛЕВ Г.И.,

д-р техн. наук, профессор (Ижевск)

Ю ЖЯНГМЯО,

д-р философии (Китай, Гуанчжоу)

Editorial Board

Editor-in-chief

YUMASHEVA E.,

engineer-chemist-technologist, Honorary Builder of Russia

Chairman of Editorial Board

RESIN V.,

Doctor of Science (Economy), Professor (Moscow)

AYZENSHTADT A.,

Doctor of Sciences (Chemistry), Professor (Arkhangelsk)

ASKADSKIY A.,

Doctor of Science (Chemistry), Professor (Moscow)

BUR'YANOV A.,

Doctor of Science (Engineering), Director of the Russian Association of gypsum (Moscow)

VAYSBERG L.,

Doctor of Science (Engineering), Academician of RAS (St. Petersburg)

VERESHCHAGIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Tomsk)

GORIN V.,

Candidate of Science (Engineering), President of the Union of Haydite and Haydite Concrete Producers (Samara)

EROFEEV V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS (Saratov)

KOROLEV E.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Moscow)

KRIVENKO P.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Ukraine)

LEONOVICH S.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Belarus, Minsk)

LESOVIK V.,

Doctor of Science (Engineering), Corresponding Member of RAACS (Belgorod)

MURTAZAEV S.-A.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Grozniy)

NEDOSEKO I.,

Doctor of Science (Engineering) (Ufa, Bashkortostan)

PICHUGIN A.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Member of the Russian Academy of Natural Science (Novosibirsk)

PUKHARENKO Yu.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (St. Petersburg)

TRAVUSH V.,

Doctor of Science (Engineering), academician of RAACS (Moscow)

FEDOSOV S.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS (Ivanovo)

FISHER H.-B.,

Doctor-Engineer (Germany, Weimar)

KHOZIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Kazan)

CHERNYSHOV E.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS (Voronezh)

SHEBL S.M.,

Doctor of Science, Professor (Egypt)

SHLEGEL I.,

Candidate of Science (Engineering), OOO «INTA-Stroy» (Omsk)

SHTACKELBERG D.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Israel)

YAKOVLEV G.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Izhevsk)

YU JIANGMIAO,

PhD / Associate Professor (China, Guangzhou)

А.А. СЕМЁНОВ, канд. техн. наук, генеральный директор (info@gs-expert.ru)

ООО «ГС-Эксперт» (125047, г. Москва, 1-й Тверской-Ямской пер., 18)

Обзор российского рынка товарной извести: итоги 2019 и прогноз на 2020 год

Проведен анализ состояния и основных тенденций развития отечественного рынка извести в сравнении с США и Европой. Отмечено, что в связи с переходом России на новые версии Общероссийского классификатора видов экономической деятельности (ОКВЭД2) и Общероссийского классификатора продукции по видам экономической деятельности (ОКПД2), гармонизированных соответственно со Статистической классификацией видов экономической деятельности в Европейском экономическом сообществе (NACE Rev.2) и Статистической классификацией продукции по видам деятельности в Европейском экономическом сообществе (CPA 2008), возникли серьезные затруднения с объективным статистическим учетом производства (статистическим учетом производства) извести, в том числе сопоставлением данных производственной статистики с данными за предыдущие периоды. ООО «ГС-Эксперт» была разработана методика оценки объемов производства товарной извести, т. е. продукции, реализуемой на рынке, позволяющая оценить совокупный объем поставок на рынок как строительной извести, так и излишков технологической извести. Это позволило уточнить объем производства извести в 2018 г. в размере 11,7–11,9 млн т, что несколько превышает данные Росстата – 11,5 млн т. Приведены данные о динамике и структуре производства и потребления гашеной и негашеной извести, о тенденциях внешнеторговых операций. Определен производственный рейтинг 10 крупнейших российских производителей извести; показано, что благодаря вводу новых мощностей лидирующие позиции заняло ЗАО «Клинцовский силикатный завод». Отмечен рост инвестиционной активности в отрасли. Приведен прогноз развития рынка на 2020 г.

Ключевые слова: известь, товарная известь, анализ рынка, Общероссийский классификатор видов экономической деятельности, Общероссийский классификатор продукции по видам экономической деятельности.

Для цитирования: Семёнов А.А. Обзор российского рынка товарной извести: итоги 2019 и прогноз на 2020 год // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 4–7. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-4-7>

A.A. SEMENOV, Candidate of Sciences (Engineering), General Director (info@gs-expert.ru)
ООО «GS-Expert» (18, 1st Tverskoy-Yamskoy pereulok, Moscow, 125047, Russian Federation)

Overview of the Russian Market of Commercial Lime: Results of 2019 and Forecast for 2020

The analysis of the state and main trends in the development of the domestic lime market in comparison with the United States and Europe is made. It is noted that in connection with the transition of Russia to new versions of the All-Russian Classifier of Types of Economic Activity (OKVED2) and the All-Russian Classifier of Products by Types of Economic Activity (OKPD2), harmonized respectively with the Statistical Classification of Economic Activities in the European Economic Community (NACE Rev.2) and the Statistical Classification of Products by Types of Activity in the European Economic Community (CPA 2008), there are serious difficulties with the objective statistical accounting of lime including the comparison of production statistics with data for previous periods. "GS-Expert" LLC has developed a methodology for evaluating the production of commercial lime, i.e. products sold at the market, which makes it possible to estimate the total volume of deliveries to the market of both construction lime and excesses of technological lime. This made it possible to specify the volume of lime production in 2018 in the amount of 11.7–11.9 million tons, which is slightly higher than Rosstat data – 11.5 million tons. Data on the dynamics and structure of production and consumption of slaked and quicklime, trends in foreign trade operations are presented. The production rating of the 10 largest Russian lime producers was determined, and it is shown that due to the introduction of new capacities, the leading position was taken by "Klintsovsky silicate plant" CJSC. An increase in investment activity in the industry is noted. The forecast of market development for 2020 is given.

Keywords: lime, commercial lime, market analysis, all-Russian classifier of types of economic activity, all-Russian classifier of products by types of economic activity.

For citation: Semenov A.A. Overview of the Russian market of commercial lime: results of 2019 and forecast for 2020. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 4–7. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-4-7>

Известь является одним из наиболее распространенных и разносторонне используемых химических продуктов, производимых и потребляемых по всему миру. Гашеная и негашеная известь использовалась во многих цивилизациях более трех тысяч лет. Если ранее известь в основном применялась в строительстве, то в наше время ее использование существенно шире. Наиболее крупными потребителями данной продукции являются черная металлургия, строительная индустрия, целлюлозно-бумажная промышленность, химическая промышленность, сельское хозяйство, сахарная промышленность. Также в значительных объемах известь используется для нужд охраны окружающей среды (нейтрализация сточных вод и дымовых газов).

По оценкам USGS, мировое производство извести в 2019 г. выросло на 1,4% и достигло 430 млн т. Около

70% мирового производства этой продукции приходится на долю Китая, где, по оценкам экспертов, было произведено порядка 300 млн т. Второе место по производству извести занимают США (18 млн т в 2019 г.), на третьем месте находится Индия (16 млн т). Россия занимает четвертое место в мире по объемам производства извести, выпуск которой превышает 11 млн т в год.

В связи с тем, что известь является относительно дешевым крупнотоннажным продуктом, объемы внешнеторговых операций с известью крайне малы. Большинство стран мира имеют месторождения карбонатных пород и обеспечивают внутренние потребности в извести за счет собственного производства. Внешнеторговые поставки осуществляются, как правило, только на незначительные расстояния и характерны в основном для европейских стран.

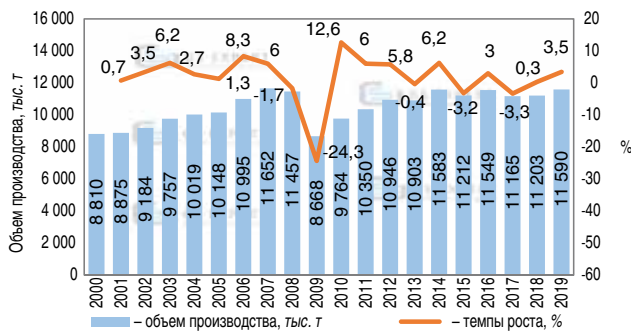


Рис. 1. Объемы и динамика производства извести в России в 2000–2019 гг., тыс. т. Источник: Росстат, оценка ГС-Эксперт
 Fig. 1. Volumes and dynamics of lime production in Russia in 2000–2019, thousand tons. Source: Rosstat, GS-Expert assessment

Основной объем потребления извести в США, по данным USGS, приходится на долю металлургической промышленности – 38% от общего объема потребления в стране (в том числе 30% – черная металлургия и 8% – цветная). Далее по мере убывания доли потребления следуют области применения: охрана окружающей среды – 31%, промышленность – 22% (в том числе химическая промышленность – 8%, производство ПСС – 5%, целлюлозно-бумажная промышленность – 5%, сахарная промышленность – 3%, производство стекла – 1%, производство минеральных удобрений – <1%), строительство и производство строительных материалов – 8%, прочие области применения – около 1%.

В европейских странах структура потребления извести несколько отличается от структуры ее потребления в США. По данным компании Fels, около 36% потребления извести приходится на промышленность, 35% – для охраны окружающей среды и 29% – для производства строительных материалов. Однако эти данные учитывают только потребление товарной извести.

После кризиса 2008–2009 гг., начиная с 2010 г. рост производства извести в России возобновился и к 2014 г. достиг докризисного уровня – 11583 тыс. т. В 2015–2018 гг. объемы производства извести в стране стабилизировались на уровне 11,2–11,5 млн т в год с ежегодными колебаниями в пределах 3%.

По оперативным данным Росстата, в 2019 г. объем производства извести в России составил 11589,6 тыс. т, что на 3,5% больше, чем годом ранее (рис. 1). Объем производства достиг уровня докризисного 2014 г. По оценкам ГС-Эксперт, с учетом малых предприятий, данные по которым не учитываются оперативной статистикой, а также предприятий, не представляющих данные в органы статистики, объем производства извести в 2018 г. оценивается примерно в 11,7–11,9 млн т.

В соответствии с существовавшим до 2017 г. отраслевым классификатором товарной продукции производство извести подразделялось на две товарные группы: известь строительная (в свою очередь подразделяется на подгруппы известь негашеная и известь гашеная, гидратная) и известь технологическая.

Ввиду особенностей использования извести предполагалось, что технологическая известь – это продукция, выпускаемая предприятиями для собственных нужд и не поставляемая на рынок. Строительная известь – продукция, реализуемая предприятиями про-

мышленности строительных материалов и прочим потребителям. Однако из-за некорректного учета продукции в последние годы наблюдаются значительные искажения данных по указанным товарным группам.

С 1 января 2017 г. в РФ осуществлен переход на применение в статистической практике новых версий Общероссийского классификатора видов экономической деятельности (ОКВЭД2) и Общероссийского классификатора продукции по видам экономической деятельности (ОКПД2), гармонизированных в соответствии со Статистической классификацией видов экономической деятельности в Европейском экономическом сообществе (NACE Rev.2) и Статистической классификацией продукции по видам деятельности в Европейском экономическом сообществе (CРА 2008). В соответствии с новым классификатором известь делится на три товарные группы: известь негашеная, известь гашеная (гидратная) и известь гидравлическая. В связи с этим сопоставление данных производственной статистики с данными за предыдущие периоды стало еще более затруднительным, так как часть производителей извести стали отчитываться по другим товарным группам. Например, многие металлургические комбинаты стали отчитываться в группе «негашеная известь». Кроме того, Росстат в 2018–2019 гг. существенно завышал объемы производства по ряду регионов РФ за счет учета других видов товарной продукции, в частности известковой муки (молотого известняка).

Для более корректного сопоставления данных ООО «ГС-Эксперт» была разработана методика оценки объемов производства товарной извести, т. е. продукции, реализуемой на рынке, позволяющая оценить совокупный объем поставок на рынок как строительной извести, так и излишков технологической извести.

На долю товарной извести в последние годы приходится всего порядка 24–25% от общего объема производства извести в стране. По оценкам ГС-Эксперт, в 2019 г. в России было произведено 2957 тыс. т товарной извести (рис. 2), что на 2,7% больше, чем в предыдущем году. В том числе объем производства негашеной товарной извести составил 2764 тыс. т (+2,2% к уровню 2018 г.), гашеной (гидратной) извести – 193 тыс. т (+10,5%) (рис. 3).

Производство товарной негашеной извести осуществляют 32 специализированных известковых за-

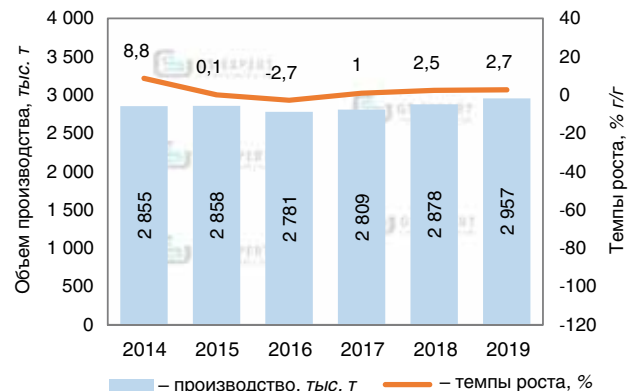


Рис. 2. Объемы и динамика производства товарной извести в России в 2014–2019 гг., тыс. т, %. Источник: оценка ГС-Эксперт
 Fig. 2. Volumes and dynamics of commercial lime production in Russia in 2014–2019, in thousand tons; %. Source: GS-Expert assessment

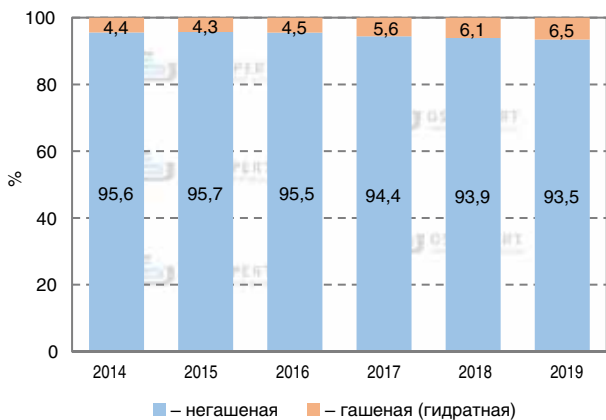


Рис. 3. Структура производства товарной извести по видам в 2014–2019 гг., %. Источник: оценка ГС-Эксперт
 Fig. 3. Pattern of production of commercial lime by types in 2014–2019, %. Source: GS-Expert assessment

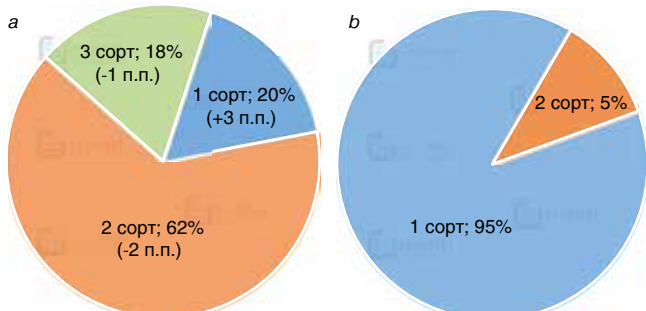


Рис. 4. Структура производства извести по сортам в 2019 г., %: а – негашеной; б – гашеной. Источник: оценка ГС-Эксперт
 Fig. 4. Structure of lime production by grades in 2019, %: a – unhydrated lime; b – slaked lime. Source: GS-Expert assessment

вода, также поставки технологической извести на рынок осуществляют несколько десятков предприятий. Производство товарной гашеной (гидратной) извести осуществляют 16 предприятий.

В структуре производства негашеной товарной извести в 2019 г. (рис. 4) преобладала продукция 2-го сорта по ГОСТ 9179 (содержание активных CaO+MgO 80–90%). Второе место занимает известь 3-го сорта (содержание активных CaO+MgO менее 80%). По сравнению с предыдущим годом наблюдается рост доли производства высококачественной товарной извести: выпуск продукции 1-го сорта вырос на три процентных пункта по сравнению с 2018 г. – до 20%. Доля извести 2-го сорта снизилась на два процентных пункта до 63%, извести 3-го сорта – сократилась на один процентный пункт до 18%.

В сегменте гидратной извести преобладает продукция 1-го сорта (рис. 4, б). В 2019 г. на ее долю пришлось около 95% от общего объема производства гидратной извести, что на четыре процентных пункта больше, чем в 2018 г.

В 2019 г. рейтинг крупнейших производителей товарной извести не претерпел существенных изменений (см. таблицу). Абсолютным лидером по итогам года является ЗАО «Клинцовский силикатный завод» (Брянская обл., ТМ EUROLIME), которое в 2018 г. ввело в эксплуатацию третью печь обжига и существенно нарастило производственные мощности.

Стоит отметить, что после нескольких лет инвестиционной паузы в известковой отрасли возобновился

Рейтинг производителей товарной извести по объемам производства в 2019 г.
 Rating of commercial lime producers by production volumes in 2019

Место в 2019 г.	Изменение по сравнению с 2018 г.	Предприятие
1	↑1	ЗАО «Клинцовский силикатный завод» (Брянская обл.)
2	↓1	АО «СолиКом» (Костромская обл.)
3	–	ООО «Центр-Известняк» / ГК «ТЕРЕКС» (Тульская обл.)
4	↑1	ООО «Фельс Известь» (Калужская обл.)
5	↓1	ООО «Придонхимстрой Известь» (Воронежская обл.)
6	–	ООО ТД «Урализвесть» (Свердловская обл.)
7	–	АО «Угловский известковый комбинат» (Новгородская обл.)
8	–	ООО «Елецизвесть» (Липецкая обл.)
9	–	АО «Эльдако» (Воронежская обл.)
10	↑1	АО «Стройматериалы» (Белгородская обл.)

Источник: оценка ГС-Эксперт на основе данных предприятий.

ввод новых производственных мощностей. Так, в 2019 г. были введены в эксплуатацию две новые печи обжига суммарной мощностью 102 тыс. т на заводах Рускальк (Ростовская обл.) и ИСТ «Казбек» (Чеченская Республика), также увеличены мощности по выпуску гидратной извести на 8 тыс. т («Атом», Свердловская обл.).

В 2020 г. запланирован ввод в эксплуатацию не менее семи новых печей суммарной мощностью 550 тыс. т в год и трех гидрататоров суммарной мощностью около 35 тыс. т в год.

Прогнозируемый выход на рынок новых игроков приведет к дальнейшему усилению конкуренции на рынке в условиях низких темпов роста спроса на известь, вероятным ценовым войнам и снижению рентабельности бизнеса. Важным фактором конкурентной борьбы в среднесрочной перспективе станет соответствие известковых производств ужесточающимся экологическим требованиям. Все это приведет к вероятному закрытию ряда старых и низкоэффективных известковых производств и санации рынка.

Роль внешнеторговых поставок в структуре предложения извести на российском рынке и соответственно в общей структуре потребления незначительна.



Рис. 5. Объемы внешнеторговых операций с известью в 2012–2019 гг. Источник: ФТС РФ, Белстат, КГД МФ РК, оценка ГС-Эксперт
 Fig. 5. Volumes of foreign trade operations with lime in 2012–2019. Source: Federal Customs Service of the Russian Federation, Belstat, Committee of State Income Ministry of Finance of the Republic of Kazakhstan, GS-Expert assessment

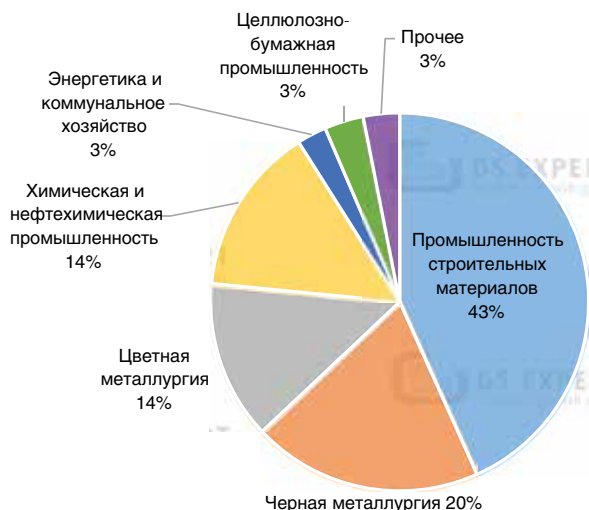


Рис. 6. Отраслевая структура потребления негашеной товарной извести. Источник: оценка ГС-Эксперт

Fig. 6. Sectoral pattern of consumption of quicklime. Source: GS-Expert assessment

Начиная с 2010 г. по мере восстановления спроса на российском рынке объемы импорта извести вновь стали возрастать и по итогам 2012 г. превысили докризисный уровень. В 2013–2014 гг. отмечен динамичный рост объемов импортных поставок на фоне существенного снижения объемов экспорта извести. Однако в 2015–2018 гг. из-за девальвации рубля и существенного усиления конкуренции на российском рынке объемы импорта существенно сократились. В то же время наблюдается активный рост экспортных поставок. Как результат – в 2017–2019 гг. Россия стала нетто-экспортером извести (рис. 5).

По итогам 2019 г. российские производители увеличили объем экспорта извести на 22% до 169 тыс. т, в том числе экспорт негашеной извести вырос на 18% по сравнению с уровнем 2018 г., гашеной (гидратной) извести – на 81%. На экспорт было отгружено свыше 6% от объема произведенной в стране товарной извести.

Импорт извести в 2019 г. после трех лет снижения также увеличился и составил 105 тыс. т (+28% к уровню предыдущего года). В том числе объем импортных поставок негашеной извести вырос на 33%, импорт гашеной (гидратной) извести снизился на 7%. Доля импортной продукции на российском рынке составила менее 4%.

Потребление товарной извести в России в 2019 г. выросло, по оценкам ГС-Эксперт, на 2,4% – до 2,96 млн т, в том числе потребление негашеной товарной извести увеличилось на 2,2% по сравнению с предыдущим годом, потребление гашеной (гидратной) извести выросло на 5,6%.

По оценкам ГС-Эксперт (рис. 6), по итогам 2019 г. около 45% товарной извести было использовано в промышленности строительных материалов, в том числе около 15% для производства силикатного кирпича и около 25% для производства автоклавного газобетона.

В сегменте негашеной товарной извести основной объем производства пришелся на сегмент промышленности строительных материалов – около 43% потребления. Однако за последние шесть лет доля данного сегмента рынка сократилась на 15 процентных



Рис. 7. Отраслевая структура потребления гашеной (гидратной) товарной извести. Источник: оценка ГС-Эксперт

Fig. 7. Sectoral pattern of consumption of slaked (hydrated) commercial lime. Source: GS-Expert assessment

пунктов. По сравнению с 2018 г. потребление извести в данном сегменте рынка выросло примерно на 3%.

Второе место по объемам потребления товарной извести в 2019 г. занял сегмент черной металлургии – около 20%. По сравнению с 2014 г. доля данного сегмента рынка выросла на пять процентных пунктов. По сравнению с 2018 г. потребление извести в данном сегменте рынка выросло примерно на 2%.

Третье место занимает сегмент химической промышленности – около 14% по итогам 2019 г. Данный сегмент рынка является самым быстрорастущим – за шесть лет его доля в структуре потребления выросла на шесть процентных пунктов. По сравнению с 2018 г. потребление извести в данном сегменте рынка выросло примерно на 4%.

Наиболее быстрорастущим сегментом рынка в 2019 г. стала цветная металлургия и золотодобыча. По итогам года спрос в данном сегменте вырос более чем на 11%. Доля данного сегмента потребления составила около 14%.

На третьем месте – сегмент энергетики и коммунального хозяйства с долей порядка 11% от общего объема потребления.

При этом за последние шесть лет наибольшие темпы роста были характерны для сегмента цветной металлургии и золотодобычи. Объем потребления гидратной извести в этом сегменте рынка в 2019 г. в 4,4 раза превысил уровень 2014 г.

По оценкам ГС-Эксперт, в 2020 г. прогнозируется сохранение положительной динамики производства и потребления товарной извести в стране. Темпы роста спроса на негашеную известь составят 1,1–3,5% к уровню 2019 г., спрос на гашеную (гидратную) известь вырастет на 1,2–5,6%.

Прогноз был подготовлен в начале февраля 2020 г. и не учитывает негативное влияние пандемии коронавирусной инфекции на мировую и российскую экономику. Данный фактор стал достаточно значимым, но мало прогнозируемым. При негативном сценарии развития ситуации производство и потребление извести в стране в 2020 г. может сократиться на 5–7% по сравнению с предыдущим годом.



KNAUF

25 лет От учебного центра до Академии КНАУФ: обучения инновационным отделочным технологиям

В 1995 г. на территории первого производственного предприятия КНАУФ в России в г. Красногорске Московской области открылся первый собственный учебный центр компании в стране. С этого времени ведется отсчет российской истории образовательной деятельности КНАУФ. Эффективность обучения работе с новыми материалами КНАУФ на собственной учебной базе, оснащенной необходимым инструментом, материалами и специально разработанными учебными пособиями, обусловила расширение сети учебных центров во всех регионах, где действуют производственные предприятия КНАУФ.

Затем началось сотрудничество с профессиональными колледжами и вузами, создание специальной учебной литературы, нормотворчество. Спустя четверть века Академия КНАУФ объединяет 12 центров обучения технологиям современного строительства и отделки, 54 ресурсных и 14 консультационных центров. За это время более 160 тыс. человек стали выпускниками Академии КНАУФ, приобрели достойную специальность, расширили профессиональные навыки.

Помимо обучения технологиям работы с материалами КНАУФ, передачи теоретиче-

ских знаний и практических навыков, Академия ведет широкую профориентационную и просветительскую деятельность, содействует повышению престижности профессий строителей-отделочников, помогает государственным органам в кодификации и легитимации профильных профессий и специальностей. За 25 лет силами Академии было организовано множество конференций, семинаров и мастер-классов не только для строителей и научного и образовательного сообщества, но и для архитекторов, преподавателей, студентов, продавцов.

Важным преимуществом подразделений Академии является возможность работы непосредственно с материалами КНАУФ, под руководством опытных преподавателей приобрести практические навыки новых технологий сухого строительства и применения сухих строительных смесей. Обучение позволяет не только отточить стандартные приемы и решения, но и дает возможность решать более сложные задачи. Приоритетом в работе Академии, как и всей компании, является качество обучения.

Сотрудники Академии постоянно работают над совершенствованием программ об-



учения, интегрируя в них современные строительные технологии, пишут учебники для колледжей и вузов, выпускают обучающие фильмы. Важное место в учебном процессе занимают цифровые технологии, в том числе виртуальной реальности. Электронный учебник КНАУФ, созданный еще в 2016 г., активно используется в учебном процессе.

В сентябре 2020 г. Академия КНАУФ продемонстрирует первый в мире VR-тренажер по сухому строительству в рамках финала VIII Национального чемпионата «Молодые профессионалы» (WorldSkills Russia).



**Союз
Производителей
Извести**

Контактные данные Союза производителей извести

- 394043, г. Воронеж, ул. Ленина, д. 73
- E-mail: nppi.office@yandex.ru, info@soyuzizvest.ru
- www.soyuzizvest.ru

Союз производителей извести объединяет крупнейшие предприятия известковой промышленности, машиностроительные и проектно-внедренческие компании

Цели и задачи Союза:

- представление и защита интересов производителей извести
- популяризация известковых продуктов и формирование новых рынков сбыта
- сотрудничество с органами власти по выработке и принятию решений, направленных на создание благоприятной экономической и правовой ситуации для производителей извести
- участие в разработке новых материалов и технологий с применением извести, внедрение и актуализация нормативно-правовой базы
- организация сотрудничества между членами Союза в профессиональной деятельности
- содействие повышению профессионального уровня членов Союза

Реклама

И.И. АКУЛОВА, д-р экон. наук (akulovaii@yandex.ru), Е.В. БАРАНОВ, канд. техн. наук (baranov.evg@mail.ru), Е.Н. БАРАНОВА, магистрант программы «Маркетинг строительных материалов, изделий и конструкций» (elrakitina@mail.ru)

Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84)

Региональные производители извести: потенциальные возможности и проблемы

Рассматриваются потенциальные возможности и проблемы производителей извести на примере Воронежской области. Обозначен статус извести как стратегического материала, предполагающий не только внутреннее потребление, но и вывоз за границы региона. Приведены данные о наличии природного сырья и производственных мощностей, динамике спроса и конкурентоспособности извести местных производителей. Показано, что область полностью обеспечена карбонатным сырьем, используемым для производства извести, поскольку обладает значительными запасами высококачественного мела с содержанием CaCO_3 95–99%. Промышленный потенциал представлен тремя крупными предприятиями, имеющими возможность наращивать выпуск продукции при увеличении рыночного спроса. Для региональной динамики производства извести характерна некоторая нестабильность, выражающаяся в чередовании периодов подъема, а затем снижения выпуска. Представлен рейтинг конкурентоспособности извести, определенный на основе сопоставления качества вяжущего и его отпускной цены. При оценке качества учитывались содержание $\text{CaO}+\text{MgO}$, время и температура гашения, доля непогасившихся зерен. В ряду основных проблем региональных производителей извести обозначены снижение спроса, усиление конкуренции, высокие цены на энергоносители, дефицит высококвалифицированных кадров и др.

Ключевые слова: известь, сырьевая база, производственный потенциал, конкурентоспособность, отраслевые проблемы.

Для цитирования: Акулова И.И., Баранов Е.В., Баранова Е.Н. Региональные производители извести: потенциальные возможности и проблемы // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-9-13>

I.I. AKULOVA, Doctor of Sciences (Economics) (akulovaii@yandex.ru), E.V. BARANOV, Candidate of Sciences (Engineering) (baranov.evg@mail.ru), E.N. BARANOVA, Master of Sciences (elrakitina@mail.ru)

Voronezh State Technical University (84, 20 let Octyabrya Street, Voronezh, 394006, Russian Federation)

Regional Lime Producers: Potential Opportunities and Challenges

The potential opportunities and problems of lime producers are examined on the example of the Voronezh Region. The status of lime as a strategic material is indicated, which implies not only "domestic" consumption, but also export abroad. The data on the availability of natural raw materials and production capacities, the dynamics of demand and the competitiveness of lime from local producers are presented. It is shown that the region is fully provided with carbonate raw materials used for lime production, since it has significant reserves of high-quality chalk with a CaCO_3 content of 95 to 99%. The industrial potential is represented by three large enterprises that have the ability to increase output with increasing market demand. The regional dynamics of lime production is characterized by some instability, expressed in the alternation of periods of rise, and then a decrease in the output of this material. A lime competitiveness rating is presented based on a comparison of the quality of the binder and its selling price. When assessing the quality, the $\text{CaO}+\text{MgO}$ content, the time and temperature of the quenching, and the fraction of unextinguished grains was taken into account. Among the main problems of regional lime producers, there is a decrease in demand, increased competition, high-energy prices, a shortage of highly qualified personnel, etc.

Keywords: lime, raw material base, production potential, competitiveness, industry problems.

For citation: Akulova I.I., Baranov E.V., Baranova E.N. Regional lime producers: potential opportunities and challenges. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 9–13. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-9-13>

Постановка исследований. Поступательное развитие отраслей, промышленных комплексов и отдельных производств обуславливается наличием тесных партнерских взаимоотношений в триаде наука – власть – бизнес. Баланс в этой системе на уровне регионов обеспечивает решение актуальных стратегических задач во всех отраслях региональной экономики и способствует формированию инвестиционной привлекательности региона, созданию благоприятных социально-экономических условий на его территории. При этом бизнес реализует функции финансирования и производства, власть – программирования и управления, наука – исследований и научного сопровождения бизнеса и управленческих решений [1, 2].

Примером достаточно эффективного взаимодействия науки, бизнеса и власти является научно-

исследовательская работа Воронежского государственного технического университета, инициированная Департаментом строительной политики Воронежской области, цель которой заключается в разработке и реализации документов стратегического планирования региона в сфере строительства и развития промышленности строительных материалов с учетом их синхронизации с национальными проектами. При этом задачи НИР, способствующие достижению поставленной цели, предполагали проведение мониторинга действующих предприятий стройиндустрии с определением стратегических для области строительных материалов, изделий и конструкций, т. е. предназначенных не только для внутреннего потребления, но и для вывоза в другие регионы РФ. В качестве такого стратегического материала экспертами с учетом



Рис. 1. Месторождение мела Малолиманское в Россошанском районе Воронежской области
Fig. 1. The Chalk Deposit «Malolimanskoe» in the Rossosh District of the Voronezh Region



Рис. 2. Копанищенское месторождение мела (Острогожский р-н, Воронежская обл.)
Fig. 2. The Chalk Deposit Kopanishchenskiy (Ostrogozhskiy District, Voronezh Region)

факторов специфики минерально-сырьевой базы, наличия и состояния производственных мощностей, динамики рыночного спроса и конкурентоспособности продуктов была обозначена известь.

Основанием для принятия данного решения явилась информация, полученная по результатам мониторинга производственной и сырьевой баз региона, рынка извести, расчета необходимых технико-экономических показателей. Представленный ниже обобщенный анализ позволил не только определить стратегический статус извести, но и выявить потенциальные возможности и проблемы региональных производителей этого вяжущего.

Анализ сырьевой базы. Воронежская область обладает практически неограниченными запасами мела, являющегося сырьем для производства извести. Месторождения мела, приуроченные к отложениям мелового возраста, широко распространены в южной и юго-восточной частях области. Мощность мелового пласта колеблется от 12 до 60 м при достаточно небольшой глубине залегания полезной тощи 1–9 м, что обуславливает относительно низкие затраты на добычу мела.

На 01.01.2018 г. в области учитывалось 15 месторождений с объемом достоверных (категория А), вероятных (категория В) и предварительно разведанных на основе изучения естественных обнажений (категория С₁) запасов мела в 446,4 млн т, что составляет значительную долю от общероссийских запасов – 24%.

В настоящее время в распределенном фонде находятся восемь месторождений мела, три из которых со схожим составом и содержанием CaCO₃ от 95 до 99%, используются для производства извести. Это Малолиманское (рис. 1), Крупениковское и Копанищенское (рис. 2) месторождения с общим объемом запаса мела категории А+В+С₁ более 60 млн т, что свидетельствует о высоком сырьевом потенциале эксплуатирующих их организаций.

Оценка производственного потенциала. На территории Воронежской области действуют три предприятия, выпускающие известь для различных целей и отраслей экономики: АО «Эльдако» (Лискинский р-н), ООО «Придонхимстрой Известь» (г. Россошь), ЗАО «ККСМ» (Копанищенский комбинат строительных материалов) (Острогожский р-н), причем первые

два завода входят в ТОП-10 крупнейших отечественных производителей извести.

Отметим, что ООО «Придонхимстрой Известь» и ЗАО «ККСМ» относятся к группе предприятий, созданных в период СССР, сохранивших свои активы и прошедших модернизацию, а АО «Эльдако» – к группе новых предприятий, использующих современные технологии и зарубежное оборудование [3]. Общая мощность воронежских производителей извести составляет порядка 480 тыс. т, что в структуре мощностей ЦФО соответствует доле, близкой к 30%.

ЗАО «ККСМ» – одно из старейших предприятий Воронежской области, специализируется на выпуске кальциевой воздушной негашеной извести (в основном воздушной негашеной строительной извести по ГОСТ 9179–2018), как правило, 3-го сорта с ориентацией на получение извести 2-го сорта, а также технического мела. Мощность по производству извести составляет 150–170 тыс. т. Комбинатом используется мел Копанищенского месторождения, являющегося месторождением федерального значения и находящегося в непосредственной близости от завода. Мел, характеризующийся высоким содержанием CaCO₃ (до 97%) и незначительным количеством включений MgCO₃, залегает на глубине 1,5 м и добывается открытым способом. Производство извести осуществляется по сухой технологии. Для обжига мела используются 12 шахтных печей, работающих на угле (рис. 3). Треть агрегатов полностью автоматизирована.

ООО «Придонхимстрой Известь» – крупное предприятие, выпускающее кальциевую воздушную негашеную известь 2-го сорта (по ГОСТ 9179–2018), мощностью 180–200 тыс. т. С 2003 г. для производства извести используется мел Малолиманского месторождения с небольшим содержанием примесей (содержание чистого CaCO₃ около 95–98%). Технология производства извести осуществляется по мокрому способу с обжигом во вращающейся печи (рис. 4). Для приготовления шлама с влажностью 35–40% на предприятии имеются два шламбейсина, каждый из которых обеспечивает запас на 10 дней.

АО «Эльдако», в становлении которого принимали участие немецкие специалисты, применяет сухой способ производства (рис. 5). Предприятие выпускает мел и кальциевую воздушную негашеную известь



Рис. 3. Шахтные печи ЗАО «ККСМ»
Fig. 3. Shaft Furnaces of CJSC «KКСM»



Рис. 4. Вращающаяся печь ООО «Придонхимстрой Известь»
Fig. 4. Rotary furnace LLC «Pridonkhimstroy Lime»

(строительную и технологическую для металлургической промышленности – сталеплавильную) 1-го и 2-го сорта с преобладанием 1-го сорта. Это быстрогасящаяся известь на основе мела Крупениковского месторождения, обжиг которого происходит во вращающихся печах. При этом производство направлено в основном на получение извести для металлургической промышленности. Общая мощность завода по производству извести составляет 145 тыс. т.

По состоянию на 2019 г. все предприятия являются достаточно успешными, причем каждое имеет резерв мощностей. Наличие такого резерва, с одной стороны, можно расценивать как недогрузку из-за падения спроса в условиях кризисных явлений в экономике страны, а с другой – как потенциальную способность заводов оперативно подстраиваться под динамично изменяющуюся рыночную конъюнктуру [3]. На наш взгляд, профицит мощностей является положительным обстоятельством, которое способствует реализации ряда национальных проектов, требующих увеличения объемов производства по достаточно широкому перечню продуктов, в том числе и по извести. Отметим, что по РФ использование мощности в производстве извести составляет около 75%, но у воронежских производителей по итогам 2018 г. этот показатель выше общероссийского на 10%. При этом средний коэффициент износа основного технологического оборудования заводов немногим более 60%. Таким образом, в целом промышленный потенциал Воронежской области по производству извести может быть оценен как достаточно высокий.

Анализ динамики спроса. Известь входит в группу материалов, объемы производства которых полностью покрывают внутренний спрос. В настоящее время российский рынок извести насчитывает более 150 предприятий и характеризуется высоким уровнем конкуренции [4, 5]. По своему типу с учетом динамики спроса и объемов продаж он относится к растущим рынкам, но с достаточно низким темпом роста в 2–4% годовых в условиях относительно стабильной экономической ситуации.

В структуре потребления порядка 80% принадлежит технологической извести, которая применяется в металлургии, химической и пищевой отраслях, сельском хозяйстве, в сфере защиты окружающей среды и др., и только около 20% используется в строительстве, а также в производстве строительных материалов и изделий – силикатного кирпича, газосиликата, сухих смесей и пр. [6, 7].

Воронежские заводы выпускают товарную известь (технологическую и строительную), используемую в различных отраслях народного хозяйства. Каждый из них занял свою рыночную нишу с учетом свойств и особенностей своей продукции. Так, основными потребителями извести АО «Эльдако» являются металлургическая промышленность и агропромышленный комплекс. Аналогичные потребители у ООО «Придонхимстрой Известь» и дополнительно – предприятия стройиндустрии. ЗАО «ККСМ» ориентировано в большей степени на производителей строительных материалов и АПК. Тем не менее в последнее время усилилась конкуренция со стороны ООО «Елецизвесть» и АО «Строй-материалы», выпускающих известь в соседних Липецкой и Белгородской областях. Некоторые воронежские производители силикатного кирпича и мелких газосиликатных блоков уже переориентировались на продукцию этих заводов.

В целом динамика производства извести в Воронежской области, подверженная влиянию кризисных явлений и конкуренции, является достаточно неравномерной. Если в период 2013–2015 гг. наблюдался рост выпуска этого материала, то в 2016 г. и 2017 г. произошло снижение объемов его производства – на 16,3% по сравнению с 2015 г. В 2018 г. снова наметилась тенденция к увеличению выпуска извести с годовым приростом в 5% [8] (рис. 6).

В перспективе, на наш взгляд, в структуре производства и потребления возрастет доля строительной извести. Данное обстоятельство связано с декларируемым органами власти ускорением темпов жилищного строительства, обозначенным в национальном проекте «Жилье и городская среда». В соответствии с этим документом объем ввода жилья в Воронежской области к 2024 г. должен возрасти в 1,5 раза и составить 2556 тыс. м². Таким образом, увеличится спрос



Рис. 5. Производитель извести АО «Эльдако»
Fig. 5. Lime Manufacturer of ACS «El'dako»

на все виды строительных материалов и изделий, в том числе и на основе извести. Производители этого материала, ориентированные на строительную отрасль, должны будут повысить собственные объемы производства.

Однако не все воронежские производители извести могут быть максимально вовлечены в этот процесс. В последнее время в структуре стеновых материалов и изделий, применяемых в строительстве, намечилось перераспределение объемов, выразившееся в сокращении использования силикатного кирпича и возрастании объема потребления газосиликатных блоков [9, 10, 11, 12]. Быстрогасящаяся известь АО «Эльдако» и ООО «Придонхимстрой Известь» в силу своих особенностей создает определенные проблемы для заводской технологии производства газосиликата, и в этом направлении деятельность данных предприятий окажется в какой-то мере ограниченной. В то же время они могут ориентироваться на выпуск сухих строительных смесей, рынок которых в настоящее время динамично развивается [13, 14].

Оценка конкурентоспособности извести различных производителей. По результатам проведенного анализа и расчетов известь воронежских производителей является достаточно конкурентоспособной. Оценка конкурентоспособности осуществлялась по оригинальной методике, разработанной сотрудниками Воронежского государственного технического университета [15]. В основу методики положена оценка соотношения качества и цены анализируемых продуктов. При расчете комплексного показателя качества извести учитывались содержание

**Рейтинг производителей извести Воронежской области
Rating of Lime Producers in the Voronezh Region**

Рейтинг качества		Рейтинг конкурентоспособности продукции	
номер позиции	наименование предприятия	номер позиции	наименование предприятия
1	АО «Эльдако»	1	ЗАО «ККСМ»
2	ООО «Придонхимстрой Известь»	2	АО «Эльдако»
3	ЗАО «ККСМ»	3	ООО «Придонхимстрой Известь»

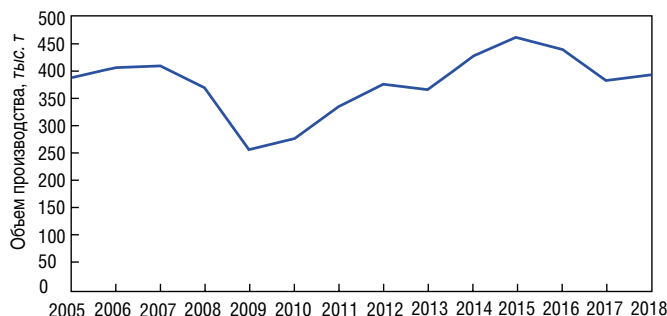


Рис. 6. Динамика производства извести в Воронежской области
Fig. 6. Dynamics of Lime Production in the Voronezh Region

CaO+MgO, время и температура гашения, доля непогасившихся зерен, а также сортность вяжущего. Определено, что наилучшими параметрами качества обладает известь АО «Эльдако». Но по значению относительного показателя конкурентоспособности первую позицию в рейтинге воронежских производителей занимает продукция ЗАО «ККСМ» ввиду наиболее сбалансированного соотношения качества и цены (см. таблицу).

Основные проблемы производителей извести.

Принимая во внимание результаты проведенного анализа сырьевой базы, технического состояния предприятий, тенденций рыночного спроса и конкурентоспособности продукции, можно констатировать, что воронежские производители извести обладают достаточно высоким потенциалом. Однако в процессе его реализации заводы сталкиваются с рядом проблем, успешность решения которых и обуславливает степень устойчивости предприятий на рынке. В качестве наиболее острых необходимо обозначить следующие:

- снижение спроса на продукцию;
- усиление влияния конкуренции;
- высокие цены на энергоносители;
- дефицит собственных средств и низкая доступность кредитных ресурсов, необходимых для поддержания и развития производства;
- дефицит высококвалифицированных кадров.

В преодолении проблемных ситуаций производители извести в определенной мере могут опираться на административный ресурс, в частности на поддержку Регионального фонда развития промышленности Воронежской области.

Выводы. Известь относится к материалам, по которым не следует ожидать дефицита по РФ в целом, но, вероятно, проявится локальный дефицит на отдельных территориях, который может быть ликвидирован за счет ввоза вяжущего из «благополучных» регионов страны. В качестве такого региона, несомненно, нужно рассматривать Воронежскую область, имеющую все возможности для «экспорта» извести.

Представленные данные являются основанием для принятия управленческих решений и программирования социально-экономического развития Воронежской области на ближайшую и долгосрочную перспективу.

Список литературы

1. Акулова И.И., Чернышов Е.М. Стратегия развития регионального строительного комплекса: технология разработки, направления и опыт реализации // *Строительные материалы*. 2018. № 3. С. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-757-3-17-23>
2. Щербакова А.А., Усова А.С. Оценка состояния и перспективы промышленности строительных материалов региона // *Вопросы территориального развития*. 2019. № 4 (49). DOI: 10.15838/tdi.2019.4.49.4
3. Давидюк А.Н., Волков Ю.С. О проекте стратегии развития строительной отрасли Российской Федерации до 2030 года // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2019. № 10 (1022). С. 30–31.
4. Семенов А.А. Тенденции развития рынка товарной извести // *Строительные материалы*. 2017. № 8. С. 4–6. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-751-8-4-6>
5. Бусыгин П.И., Цветкова А.Ю. Анализ конкуренции на российском рынке извести. *Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием*. СПб., 2017. С. 305–307.
6. Уфимцев В.М. Технологическая известь – получение и свойства // *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси*. 2018. № 2 (51). С. 64–70.
7. Нестеров А.В., Датукашвили Д.О. Производство кальциевой извести в России // *Строительные материалы*. 2017. № 3. С. 52–60. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-746-3-52-59>
8. Елецких Д.А. Оценка современного состояния производства строительных материалов и изделий в Воронежской области // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2019. № 2 (9). С. 17–25.
9. Семенов А.А. Силикатный кирпич и газосиликат. Некоторые тенденции рынка в 2018–2019 гг. // *Строительные материалы*. 2019. № 8. С. 3–5. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-3-5>
10. Буйко О.В., Котенёва П.И. Анализ и тенденции развития рынка строительства и производства стеновых строительных материалов // *Ползуновский альманах*. 2017. № 4–2. С. 20–24.
11. Гринфельд Г.И. Проблемы и перспективы автоклавного газобетона // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2020. № 1–2 (252–253). С. 24–26.
12. Акулова И.И. Исследование и учет потребительских предпочтений на рынке жилой недвижимости как основа формирования эффективной градостроительной политики // *Жилищное строительство*. 2017. № 4. С. 3–6.
13. Кузьмина В.П. Составы и способы получения сухих строительных смесей // *Сухие строительные смеси*. 2018. № 5. С. 25–30.
14. Ботка Е.И. Рынок сухих строительных смесей России: быстрый рост и его причины // *Цемент и его применение*. 2019. № 6. С. 32–33.
15. Акулова И.И., Славчева Г.С. Оценка конкурентоспособности строительных материалов и изделий: обоснование и апробация методики на примере цементов // *Жилищное строительство*. 2017. № 7. С. 9–12.

References

1. Akulova I.I., Chernyshov E.M. Strategy of development for a regional construction complex: technology of development, direction and experience of realization. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 3, pp. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-757-3-17-23> (In Russian).
2. Scherbakova A.A., Usova A.S. Assessment of the state and prospects of the building materials industry in the region. *Voprosy territorial'nogo razvitiya*. 2019. No. 4 (49), p. 4. (In Russian). DOI: 10.15838/tdi.2019.4.49.4
3. Davidyuk A.N., Volkov Yu.S. About the draft strategy for the development of the construction industry of the Russian Federation until 2030. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki*. 2019. No. 10 (1022), pp. 30–31. (In Russian).
4. Semenov A.A. Tendencies of development of the Russian commodity lime market. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 8, pp. 4–6. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-751-8-4-6>. (In Russian).
5. Busygin P.I., Tsvetkova A.Yu. Analysis of competition in the Russian lime market. *SPbPU Science Week: Materials of a scientific conference with international participation*. St. Petersburg. 2017, pp. 305–307. (In Russian).
6. Ufimtsev V.M. Technological lime – production and properties. *ALITinform: Tsement. Beton. Sukhiye smesi*. 2018. No. 2 (51), pp. 64–70. (In Russian).
7. Nesterov A.N., Datukashvili D.O. Production of high-calcium lime in Russia. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 3, pp. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-746-3-52-59>. (In Russian).
8. Yeletsikh D.A. Assessment of the current state of production of construction materials and products in the Voronezh Region. *Zhilishchnoye khozyaystvo i kommunal'naya infrastruktura*. 2019. No. 2 (9), pp. 17–25. (In Russian).
9. Semenov A.A. Silicate brick and gas silicate. Some trends at the market in 2018–2019. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 8, pp. 3–5. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-3-5>
10. Buiko O.V., Kotenyova P.I. Analysis and development trends of the construction market and production of wall building materials. *Polzunovskiy al'manakh*. 2017. No. 4–2, pp. 20–24. (In Russian).
11. Grinfel'd G.I. Problems and prospects of autoclaved aerated concrete. *Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka*. 2020. No. 1–2 (252–253), pp. 24–26. (In Russian).
12. Akulova I.I. Research and accounting of consumer preferences in the residential real estate market as the basis for the formation of an effective urban development policy. *Zhilishchnoye Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2017. No. 4, pp. 3–6. (In Russian).
13. Kuzmina V.P. Compositions and methods for producing dry construction mixtures. *Sukhiye stroitel'nyye smesi*. 2018. No. 5, pp. 25–30. (In Russian).
14. Botka E.I. The market of dry building mixtures in Russia: rapid growth and its causes. *Tsement i ego primeneniye*. 2019. No. 6, pp. 32–33. (In Russian).
15. Akulova I.I., Slavcheva G.S. Assessment of the competitiveness of building materials and products: justification and testing of the methodology on the example of cements. *Zhilishchnoye Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2017. No. 7, pp. 9–12. (In Russian).

УДК 691.51

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-14-17>

А.Н. РЯЗАНОВ¹, канд. техн. наук (aryazanov@hotmail.com), Д.А. СИНИЦИН¹, канд. техн. наук (d4013438@yandex.ru), Г.Ю. ШАГИГАЛИН¹, инженер (ufa-gazinur@mail.ru); М.Р. БИКБУЛАТОВ², главный технолог (bikbulatov@oao-gbs.ru); И.В. НЕДОСЕКО¹, д-р техн. наук (nedoseko1964@mail.ru)

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет (450080, г. Уфа, ул. Менделеева, 195)

² ООО «ГлавБашСтрой» (450591, Республика Башкортостан, Уфимский район, с. Чесноковка, ул. Карьерная, 2а)

Твердые отходы содового производства – важный резерв расширения сырьевой базы получения извести и низкоэнергетических бесклинкерных вяжущих на ее основе

Обоснована более высокая потребительская стоимость извести относительно портландцемента. Показано, что на фоне истощения природных месторождений чистых известняков важным резервом для расширения сырьевой базы производства извести являются карбонатные отходы различных отраслей промышленности, в частности производства соды. После внедрения на ОАО «Сода» прогрессивной технологии по обезвоживанию дистиллерных шламов влажность твердых отходов содового производства (ТОС) снизилась до 30%. Это определило возможность их использования для получения извести и низкоэнергетических бесклинкерных вяжущих на ее основе. После обжига ТОС получается известковый продукт, соответствующий примерно 3-му сорту традиционной извести из природного сырья. На основе обожженного фильтрованного ТОС получены образцы газобетона плотностью 500–600 кг/м³ и прочностью при сжатии до 2,5 МПа (класс В1,5), однако газобетон плотностью 400 кг/м³ имеет прочность порядка 1–1,5 МПа, что не соответствует ГОСТ 31359–2007. На основе обожженного ТОС и глиниста предложено получать бесклинкерные вяжущие марок М150 и выше. Марочность известково-глинистого вяжущего при необходимости можно существенно повышать (до М300–М400) путем смешения с 20–30% портландцемента.

Ключевые слова: экология, ресурсосбережение, дистиллерные шламы, фильтрационное прессование, твердые отходы содового производства, гранулирование, рентгенофазовый анализ, дифференциально-термический анализ, автоклавный газобетон, известково-глинистое вяжущее, бесклинкерное вяжущее.

Для цитирования: Рязанов А.Н., Синицин Д.А., Шагигалин Г.Ю., Бикбулатов М.Р., Недосеко И.В. Твердые отходы содового производства – важный резерв расширения сырьевой базы получения извести и низкоэнергетических бесклинкерных вяжущих на ее основе // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 14–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-14-17>

A.N. RIAZANOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (aryazanov@hotmail.com),

D.A. SINITSIN¹, Candidate of Sciences (Engineering) (d4013438@yandex.ru), G.Yu. SHAGIGALIN¹, Engineer (ufa-gazinur@mail.ru),

M.R. BIKBULATOV², Chief Technologist (bikbulatov@oao-gbs.ru), I.V. NEDOSEKO¹, Doctor of Sciences (Engineering) (nedoseko1964@mail.ru)

¹ Ufa State Petroleum Technological University (195, Mendeleev Street, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450080, Russian Federation)

² ООО "GlavBashStroy" (2a, Kariernaya Street, Chesnokovka Village, Ufa District, Republic of Bashkortostan, 450591, Russian Federation)

Solid Waste of Soda Production is an Important Reserve for Expanding the Raw Material Base for Production of Lime and Low-Energy, Clinkerless Binders Based on it

The higher user cost of lime relative to Portland cement is justified. It is shown that against the background of depletion of natural deposits of pure limestones, an important reserve for expanding the raw material base of lime production is carbonate waste from various branches of the industries, in particular the production of soda. After the introduction of advanced technology for dewatering distilled slurries at JSC "Soda", the humidity of solid waste of soda production (SWS) decreased to 30%. This determined the possibility of using them to produce lime and low-energy, clinkerless binders based on it. After firing the SWS, a lime product, corresponding to about the third grade of traditional lime from natural raw materials, is obtained. Samples of aerated concrete with a density of 500–600 kg/m³ and a compressive strength of up to 2.5 MPa (class B1.5) were obtained on the basis of burnt filtered SWS, however aerated concrete with a density of 400 kg/m³ has a strength of about 1–1.5 MPa, which does not correspond to GOST 31359–2007. On the basis of annealed SWS and glinite, it is proposed to produce clinkerless binders of grades M150 and higher. If necessary, the grade of lime-glinite binder can be significantly increased (up to M300–M400) by mixing with 20–30% of Portland cement.

Keywords: ecology, resource saving, distiller slurries, filtration pressing, solid waste of soda production, granulation, x-ray phase analysis, differential thermal analysis, autoclave aerated concrete, lime-glinite binder, clinkerless binder.

For citation: Riazanov A.N., Sinitsin D.A., Shagigalin G.Yu., Bikbulatov M.P., Nedoseko I.V. Solid waste of soda production is an important reserve for expanding the raw material base for production of lime and low-energy, clinkerless binders based on it. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 14–17. (In Russian).

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-14-17>

Известь и цемент в течение более чем сотни лет являются основными минеральными вяжущими, «хлебом строительства» (в технической литературе используется устоявшийся термин – минеральные вяжущие на клинкерной основе, т. е. вяжущие, содержащие в своем составе оксиды и гидроксиды кальция, а также минералы, входящие в состав портландцементного клинкера). При этом следует отметить, что известь на мировом рынке является более востребованным и дорогостоящим продуктом, чем цемент, несмотря на то что технологические процес-

сы производства извести как во вращающихся, так и в шахтных печах требуют существенно меньших материальных и топливно-энергетических затрат (температура обжига исходного карбонатного сырья при получении извести ≈1000°C, а при производстве портландцемента более 1400°C) [1].

Объяснить данный, казалось бы, парадоксальный факт только тем, что известь в отличие от цемента используется не только в строительной индустрии, но и во многих других сферах народного хозяйства, включая металлургическую, химическую,

пищевую промышленность (здесь известь используется при очистке сахара-сырца), было бы не совсем правильно. Основной причиной высокой стоимости извести, причем производимой как в нашей стране, так и за рубежом, являются (это в целом признается большинством специалистов [2, 3]) повышенные, по сравнению с производством портландцемента требования к степени чистоты исходного известнякового сырья. В последнее время данная проблема существенно осложняется еще и тем, что действующие месторождения известняков в непосредственной близости от крупных промышленных центров и больших городских агломераций практически выработаны («чистые известняки» используются не только в строительной индустрии, но и в химической промышленности для производства соды, в сельском хозяйстве для мелиорации кислых почв и др.) и производители вынуждены нести дополнительные затраты на обустройство новых, более отдаленных месторождений (подведение автомобильных и железнодорожных путей к местам карьерных разработок, вскрышные работы и др.) и на транспортные расходы по доставке известнякового и доломитового сырья к месту производства.

Важным резервом для расширения сырьевой базы производства извести являются карбонатные отходы различных отраслей промышленности [4], накопления которых исчисляются многими сотнями миллионов тонн, что существенно ухудшает экологическую обстановку и выводит из оборота значительные площади полезных земель. В частности, на территории АО «Сода» (Башкортостан, г. Стерлитамак), крупнейшего производителя соды не только в России, но и в Европе, за полувековой период его работы скопились десятки миллионов тонн не утилизированных до настоящего времени дистиллерных шламов, причем твердые отходы содового производства оседают на дно в огромных шламбассейнах (так называемых «белых морях») [5], а жидкая фаза, содержащая хлориды натрия и калия, несмотря на предпринимаемые защитные меры, с каждым паводком частично попадает в русло реки Белой, которая является крупным притоком реки Камы, и далее Волги.

Проведенный химический и минералогический анализ состава твердого отхода содового производства (ТОС) показывает, что он состоит в основном из карбонатов кальция CaCO_3 (60–65%) и магнезия MgCO_3 (5–8%), гидроксидов кальция Ca(OH)_2 и магнезия Mg(OH)_2 (в сумме 10–15%), хлоридов калия и натрия (в пересчете на CaCl_2 в пределах 4–8%), нерастворимого остатка (преимущественно глинистые составляющие SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3) – до 5%; кроме того, присутствуют соли щелочных металлов в виде сульфатов и хлоридов и гипсовые включения. Практически все попытки утилизации и переработки данных отходов, предпринимаемые в прошлом [5], к сожалению, не могли быть реализованы, прежде всего из-за высокой влажности дистиллерных шламов (соотношение жидкой и твердой фаз примерно равно) и, естественно, огромных требуемых энергозатрат на их сушку.

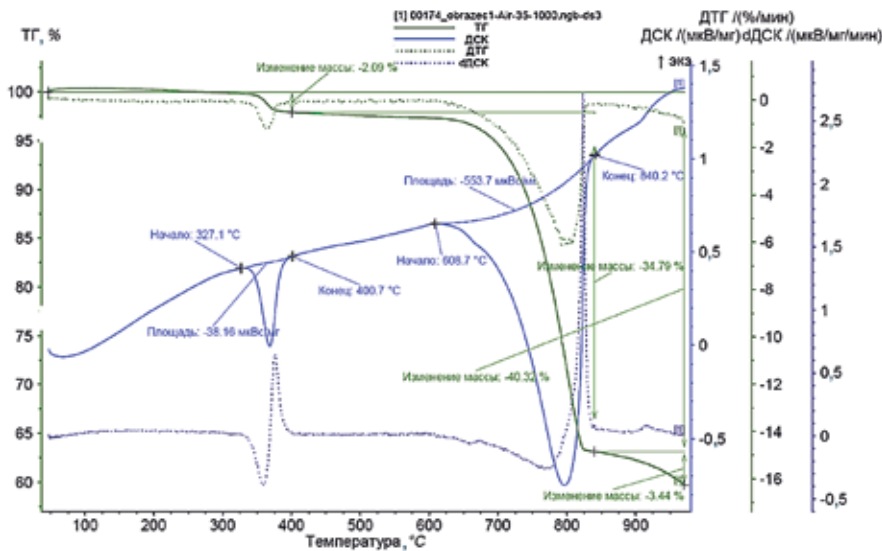
В последние годы ОАО «Сода» внедрило прогрессивную технологию по обезвоживанию дистиллерных шламов посредством фильтрационного прессования, что позволило не только существенно понизить влажность ТОС (образующийся после фильтрационного прессования так называемый кек имеет остаточную влажность не более 30%), но и частично вернуть отфильтрованную жидкую фазу в систему оборотного водоснабжения технологического процесса производства соды. В отличие от шлама низкая влажность отфильтрованного ТОС обеспечивает возможность его гранулирования, сушки и обжига, что, по нашему мнению, открывает широкие перспективы по практическому использованию данного отхода в различных направлениях, в частности для раскисления почв и в качестве исходного сырья для производства извести.

Технико-экономическая целесообразность обжига ТОС по сравнению с природными известняками объясняется двумя причинами: во-первых, сушка отфильтрованного ТОС с влажностью $W \approx 30\%$ сопоставима с аналогичными затратами на сушку природного сырья ($W \approx 15\text{--}25\%$); во-вторых, ТОС, являясь дисперсным продуктом ($S_{\text{уд}} = 1500 \text{ см}^2/\text{г}$), дает возможность получать из него гранулы любых размеров, что позволяет не только исключить из технологического процесса дорогостоящую стадию предварительного дробления известнякового сырья (получения щебня), но и существенно облегчить последующую стадию помола готовой извести после обжига.

Исследования продуктов обжига гранул из ТОС, проведенные в Инновационном центре «Лаборатория нанотехнологий цементных систем имени профессоров А.Ф. Полака и Н.Х. Каримова» УГНТУ с использованием рентгенофазового и дифференциально-термического (см. рисунок) анализа, показали, что по химико-минералогическому составу данный продукт может быть сопоставим с известью, получаемой из природного сырья (примерно 3-го сорта), и может применяться в строительной индустрии, в частности для получения низкоэнергетических бесклинкерных вяжущих.

Одним из первых положительных опытов по использованию ТОС была разработанная институтом БашНИИСтрой технология производства известково-кремнеземистого вяжущего и газобетонных стеновых блоков (средней плотностью $650\text{--}700 \text{ кг/м}^3$) на его основе, которая была апробирована на опытно-промышленной стадии и внедрена при строительстве в г. Стерлитамаке серии малоэтажных жилых домов в 1980-х гг., которые успешно эксплуатируются до настоящего времени [6].

Однако использовать данный опыт в современных условиях не представляется возможным по той причине, что газобетон со средней плотностью 700 кг/м^3 уже не соответствует современным теплотехническим нормам (СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий»), а строительному комплексу Российской Федерации требуется преимущественно газобетон с плотностью 400 кг/м^3 и менее (ряд зарубежных производителей выпускают и особо легкий газобетон плотностью $150\text{--}200 \text{ кг/м}^3$).



Результаты качественного синхронного термического анализа пробы ТСО
The results of a qualitative synchronous thermal analysis of a sample of solid waste from soda production

В результате лабораторных экспериментов с использованием обожженного фильтрованного ТСО вместо извести были получены образцы газобетона плотностью 500–600 кг/м³ и прочностью при сжатии до 2,5 МПа (класс В1,5), что соответствует минимально допустимому классу газобетонных блоков по прочности при сжатии согласно ГОСТ 31359–2007. При этом, как показали результаты производственных испытаний, проведенные в ООО «ГлавБашСтрой» (единственный в Республике Башкортостан и один из крупнейших в ПФО производитель автоклавного газобетона), стабильно получать газобетон требуемой плотности 400 кг/м³ на основе обожженного ТСО практически невозможно вследствие недостаточной прочности получаемых изделий. Газобетон плотностью 400 кг/м³, изготовленный на качественной 1-го сорта извести, имеет прочность при сжатии 2–2,5 МПа; газобетон той же плотности, но получаемый на основе обожженного ТСО (соответствующего по качеству извести 3-го сорта), имеет значительно более низкую прочность (порядка 1–1,5 МПа), что не соответствует требуемой прочности для конструктивно-теплоизоляционного газобетона по ГОСТ 31359–2007 (класс по прочности при сжатии не ниже В1,5).

Более эффективным способом использования обожженного ТСО является производство на его основе низкоэнергоемких бесклинкерных минеральных вяжущих: известково-пуццолановых, известково-шлаковых, известково-золевых и известково-глинистых [7, 8]. Целесообразность применения данного типа вяжущих, которые успешно применялись с незапамятных времен (романцемент) и, к сожалению, были в 1980-х гг. незаслуженно почти забыты отечественными строителями, сегодня переживает второе рождение, что объясняется не только значительно пониженной энергоемкостью получения (по сравнению с портландцементом), но и существенным снижением выбросов углекислого газа при производстве этих вяжущих [9].

Потребность современного строительства в низкомарочных бесклинкерных вяжущих во многом определяется значительным ростом объема малоэтажного, дорожного и подземного строительства, где они могут использоваться для устройства фундаментов зданий малой и средней этажности, цементогрунтовых и бетонных оснований дорог, а также для цементации грунтов. Это позволит не только удешевить процесс строительства данных объектов, но и, что особенно важно, более рационально использовать для других целей высвобождающиеся объемы высокомарочного портландцемента, в частности для увеличения выпуска бетонов нового поколения повышенной прочности и технологичности.

При этом, учитывая территориальное расположение отходов содового производства, а также отсутствие месторождений активных минеральных добавок (трепела, опоки и диатомита) в пределах транспортной доступности и существенно возросшую стоимость доменного гранулированного шлака (в связи с практически полным переходом металлургических предприятий с доменного на кислородно-конвертерный способ выплавки стали большинство цементных заводов испытывают дефицит в его поставках), наиболее рациональным, на наш взгляд, будет производство на основе ТСО известково-глинистого вяжущего (месторождения глин, которые в настоящее время не используются для выпуска кирпича – считаются некондиционными, распространены практически повсеместно [10]).

Исследования показали, что на основе обожженного ТСО и глиниста (глинит – глинистое сырье, обожженное при t≈500–600°C) возможно получение бесклинкерных вяжущих марок М150 и более. К тому же марочность получаемого известково-глинистого вяжущего при необходимости можно существенно повысить (до М300–М400) путем смешения с 20–30% портландцемента. Следует отметить, что смешанное с портландцементом известково-глинистое вяжущее даже экономичнее традиционного шлакопортландцемента (ШПЦ М300 содержит ≈40% портландцементного клинкера, а известково-глинистое вяжущее той же марки – ≈20%).

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что решение экологических проблем по утилизации крупнотоннажных отходов содового производства тесно связано с решением сопутствующих экономических задач и развитием производства строительных материалов массового применения, в частности низкоэнергоемких бесклинкерных минеральных вяжущих, которые на наш взгляд необходимо рекомендовать к опытно-промышленной апробации и последующему внедрению, прежде всего в жилищно-гражданском и дорожном строительстве.

Список литературы

1. Рязанов А.Н., Рахимов Р.З., Винниченко В.И., Рязанов А.А., Рахимова Н.Р., Недосеко И.В. Энергоэффективная совмещенная технология композиционных вяжущих // *Строительные материалы*. 2019. № 12. С. 62–67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-62-67>
2. Петренко В.В., Алексеев П.А. Альтернативная технология разложения карбонатов: экология, энергосбережение и комплексная переработка конверсионных продуктов // *Химическая технология*. 2012. Т.13. № 11. С. 697–703.
3. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z., Gaifullin A.R., Morozov V.P., Potapova L.I., Gubaidullina A.M., Osin Y.N. Marl-based geopolymers incorporated with limestone: a feasibility study // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018. Т. 492. С. 1–10.
4. Рахимов Р.З., Магдеев У.Х., Ярмаковский В.Н. Экология, научные достижения и инновации в производстве строительных материалов на основе и с применением техногенного сырья // *Строительные материалы*. 2009. № 12. С. 8–11.
5. Оратовская А.А., Синицин Д.А., Галеева Л.Ш., Бабков В.В., Шатов А.А. Использование отходов производства кальцинированной соды для получения известьесодержащих вяжущих и строительных материалов на их основе // *Строительные материалы*. 2012. № 2. С. 52–54.
6. Вагапов Р.Ф., Синицин Д.А., Оратовская А.А., Тэненбаум Г.В. Строительные материалы на основе промышленных отходов Республики Башкортостан // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2012. № 4 (22). С. 279–284.
7. Шелихов Н.С., Рахимов Р.З., Сагдиев Р.Р., Стоянов О.В. Низкообжиговые гидравлические вяжущие. Проблемы и решения // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. № 2 (17). С. 59–64.
8. Рязанов А.Н., Винниченко В.И., Недосеко И.В., Рязанова В.А., Рязанов А.А. Структура и свойства известково-золяного цемента и его модификация // *Строительные материалы*. 2018. № 1–2. С. 18–22. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-756-1-2-18-22>
9. Рязанов А.А., Рахимов Р.З., Винниченко В.И., Рязанов А.Н., Шагигалин Г.Ю., Недосеко И.В. Особенности диссоциации карбоната кальция в составе органоминеральной смеси // *Строительные материалы*. 2020. № 3. С. 55–61. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-779-3-55-61>
10. Ермилова Е.Ю., Рахимов Р.З., Камалова З.А., Буланов П.Е. Терморективные смеси глины и известняка как комплексные добавки для композиционного портландцемента // *Сб. Вестник Приволжского отд. РААСН*. 2019. С. 260–271.

References

1. Riazanov A.N., Rakhimov R.Z., Vinnichenko V.I., Riazanov A.A., Rakhimova N.R., Nedoseko I.V. Energy efficient combined technology of composite binders. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 12, pp. 62–67. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-62-67>
2. Petrenko V.V., Alekseyev P.A. Alternative technology for the decomposition of carbonates: ecology, energy conservation and integrated processing of conversion products. *Khimicheskaya tekhnologiya*. 2012. Vol. 13. No. 11, pp. 697–703. (In Russian).
3. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z., Gaifullin A.R., Morozov V.P., Potapova L.I., Gubaidullina A.M., Osin Y.N. Marl-based geopolymers incorporated with limestone: a feasibility study. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018. Vol. 492, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.jnon-crysol.2018.04.015
4. Rakhimov R.Z., Magdeev U.Kh., Yarmakovskiy V.N. Ecology, scientific achievements and innovations in the production of building materials based on and using technogenic raw materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2009. No. 12, pp. 8–11. (In Russian).
5. Oratovskaya A.A., Sinitsin D.A., Galeeva L.Sh., Babkov V.V., Shatov A.A. The use of wastes of soda ash production for manufacturing of lime-containing binders and construction materials on their base. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 2, pp. 52–54. (In Russian).
6. Vagapov R.F., Sinitsin D.A., Oratovskaya A.A., Tenenbaum G.V. Building materials based on industrial waste of the Republic of Bashkortostan. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2012. No. 4 (22), pp. 279–284. (In Russian).
7. Shelikhov N.S., Rakhimov R.Z., Sagdiyev R.R., Stoyanov O.V. Low baked hydraulic binders. Problems and solutions. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014. No. 2(17), pp. 59–64. (In Russian).
8. Riazanov A.N., Vinnichenko V.I., Nedoseko I.V., Riazanova V.A., Riazanov A.A. Structure and properties of lime-ash cement and its modification. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 1–2, pp. 18–22. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-756-1-2-18-22> (In Russian).
9. Riazanov A.A., Rakhimov R.Z., Vinnichenko V.I., Riazanov A.N., Shagigalin G.Yu., Nedoseko I.V. Features of dissociation of calcium carbonate in the composition of an organo-mineral mixture. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 3, pp. 55–61. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-779-3-55-61>
10. Yermilova Ye.Yu., Rakhimov R.Z., Kamalova Z.A., Bulanov P.Ye. Thermosetting clay and limestone mixtures as complex additives for composite Portland cement. *Vestnik of the Volga territorial branch of the Russian Academy of Architecture and Construction sciences*. 2019. pp. 260–271 (In Russian).

В.И. ТРАВУШ¹, д-р техн. наук, акад. РААСН, Н.И. КАРПЕНКО¹, д-р техн. наук, акад. РААСН;
В.Т. ЕРОФЕЕВ², д-р техн. наук, акад. РААСН, И.В. ЕРОФЕЕВА², канд. техн. наук (ira.erofeeva.90@mail.ru);
И.Н. МАКСИМОВА³, канд. техн. наук; В.И. КОНДРАЩЕНКО⁴, д-р техн. наук;
А.Г. КЕСАРИЙСКИЙ⁵, канд. техн. наук

¹ Российская академия архитектуры строительных наук (107031, г. Москва, ул. Большая Дмитровка, 24)

² Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, 68)

³ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)

⁴ Российский университет транспорта (МИИТ) (127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9)

⁵ ООО «Лаборатория комплексных технологий» (51412, Украина, Днепропетровская обл., г. Павлоград, ул. Искровская, 1а)

Исследование порошково-активированных бетонов методами лазерной интерферометрии

Бетон является прочным и относительно дешевым строительным материалом, и спрос на него постоянно растет. Важнейшей задачей в области строительства является обеспечение долговечности бетона и железобетонных конструкций на его основе. В настоящее время достигнуты значительные успехи в технологии получения высококачественных бетонов, высокопрочных самоуплотняющихся, дисперсно-армированных и др. Наряду с установлением физико-механических показателей является важным выявление закономерностей их деформирования и разрушения под действием силовых нагрузок. В настоящей работе для проведения подобных исследований использовали методы лазерной голографической интерферометрии, физическая сущность которой состоит в регистрации волновых полей синхронно с приложением нагрузки, отраженных исследуемой поверхностью в различные моменты времени, и последующим сравнением этих волновых полей между собой. В качестве исследуемых рассматривались порошково-активированные бетоны нового поколения в сравнении с материалами старого и переходного поколений. По полученным полным равновесным диаграммам и 3D-графикам определяли физико-механические показатели (прочность при сжатии, при изгибе, растяжении при раскалывании), параметры трещиностойкости (удельные энергозатраты на статическое разрушение образца, статический джей-интеграл, статический коэффициент интенсивности напряжений при нормальном разрыве), параметры диаграммы (цикличность, предельная растяжимость), параметры деформации поверхности (фотографии с волнами деформаций и трещины). Методами лазерной интерферометрии установлено, что введение микрокварца, особенно в сочетании с аморфно-активным микрокремнеземом, существенно отодвигает момент начала микротрещинообразования в цементных образцах, которые проявляют однорядное поле деформаций вплоть до уровня напряжений, составляющих 0,9–0,95 от разрушающих. Образец на основе цементно-песчаного раствора без тонкодисперсных наполнителей отличается более низким уровнем трещинообразования, соответствующий уровню напряжений 0,5–0,6 от разрушающих, при этом с ростом нагрузки разрушение образца имеет блочный характер.

Ключевые слова: порошково-активированные бетоны, суперпластификаторы, реакционно-реологические добавки, свойства бетонов, лазерная интерферометрия, интердиаграммы, 3D-графики.

Для цитирования: Травуш В.И., Карпенко Н.И., Ерофеев В.Т., Ерофеева И.В., Максимова И.Н., Кондращенко В.И., Кесарийский А.Г. Исследование порошково-активированных бетонов методами лазерной интерферометрии // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 18–28. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-18-28>

V.I. TRAVUSH¹, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Academician of RAACS, N.I. KARPENKO¹, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAACS; V.T. EROFEEV², Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAACS, I.V. EROFEEVA², Candidate of Sciences (Engineering) (ira.erofeeva.90@mail.ru), O.V. TARAKANOV³, Candidate of Sciences (Engineering); V.I. KONDRASHCHENKO⁴, Doctor of Sciences (Engineering); A.G. KESARIYSKIY⁵, Candidate of Sciences (Engineering)

¹ Russian Academy of Architecture of Construction Sciences (24, Bolshaya Dmitrovka Street, Moscow, 107031, Russian Federation)

² National Research N.P. Ogarev Mordovia State University (68, Bolshhevistskaya Street, Saransk, 4Republic of Mordovia, 30005, Russian Federation)

³ Penza State University of Architecture and Civil Engineering (28, Germana Titova Street, Penza, 440028, Russian Federation)

⁴ Russian University of Transport (MIIT) (9, build. 9, Obraztsova Street, Moscow, 127994, Russian Federation)

⁵ LLC Laboratory of Complex Technologies (1a, Iskraskaya Street, Dnepropetrovsk region, Pavlograd, 51412, Ukraine)

Investigation of Powder-Activated Concretes by Laser Interferometry Methods

Concrete is a strong and relatively cheap building material and the demand for it is constantly growing. The most important task in the field of construction is to ensure the durability of concrete and reinforced concrete structures based on it. In recent years, significant progress has been made in the technology of producing high-quality concretes, high-strength self-compacting, dispersed-reinforced, etc. Along with the establishment of physical and mechanical parameters, it is important to identify the patterns of their deformation and destruction under the influence of force loads. In this paper, laser holographic interferometry methods were used to conduct such studies. The physical essence of this method is to register wave fields synchronously with the application of loads reflected by the surface under study at different times, and then compare these wave fields with each other. Powder-activated concretes of the new generation were considered as the studied materials in comparison with the materials of the old and transitional generations. The obtained full equilibrium diagrams and 3D graphs were used to determine physical and mechanical parameters (compressive strength, bending strength, and tensile strength during splitting), parameters of crack resistance (specific energy consumption for static destruction of the sample, static j-integral, static coefficient of stress intensity at normal rupture),

the chart parameters (circularity, elongation limit), the deformation parameters of the surface (the photos with the waves of deformations and cracks). Using laser interferometry, it was found that the introduction of micro-quartz, especially in combination with amorphous-active micro-silica, significantly delays the start of micro-crack formation in cement samples that exhibit a single-row deformation field up to the stress level of 0.9–0.95 of the destructive ones. A sample based on a cement-sand solution without fine fillers is distinguished by a lower level of crack formation, corresponding to the stress level of 0.5–0.6 from the destructive ones, while with increasing load, the destruction of the sample has a block character.

Keywords: powder-activated concretes, superplasticizers, reaction-geological additives, concrete properties, laser interferometry, interdiagrams, 3D graphics.

For citation: Travush V.I., Karpenko N.I., Erofeev V.T., Erofeeva I.V., Tarakanov O.V., Kondrashchenko V.I., Kesariyskiy A.G. Investigation of powder-activated concretes by laser interferometry methods. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 18–28. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-18-28>

Бетон является прочным и относительно дешевым строительным материалом. В настоящее время его наиболее часто используют в качестве строительного материала по всему миру [1]. В строительной практике спрос на бетон с каждым годом увеличивается. Данные Международной федерации по конструкционному бетону свидетельствуют, что в ближайшей перспективе прогнозируется производство бетона в объеме до 4 млрд м³ [1].

Созданию бетонов с улучшенными прочностными свойствами и повышенной долговечностью в мировой практике уделяется повышенное внимание [2–10]. При этом важной задачей в области строительства является обеспечение долговечности железобетонных конструкций, так как очень часто они подвержены растрескиванию [11, 12].

В последние годы достигнуты значительные успехи в технологии получения высококачественных бетонов. Большая доля исследований в области высококачественных бетонов приходится на разработку многокомпонентных бетонов, содержащих в своем составе суперпластификаторы и активные дисперсные наполнители [2, 4, 5, 7, 8, 13–15].

В состав бетона в разных пропорциях входят заполнители, связующее, вода и различные добавки, назначаемые в зависимости от требуемой прочности и его функционального назначения.

Современные высококачественные бетоны (ВКБ) классификационно сочетают в себе большой спектр бетонов различного назначения: высокопрочные (ВПБ, Hochfester Beton – HFB) и ультравысокопрочные (УВБ, Ultrahochfester Beton – UHFB), самоуплотняющиеся (СУБ, Selbstverdichtender Beton – SVB; Self Compacting Concrete – SCC), высококоррозионно-стойкие, реакционно-порошковые, дисперсно-армированные (Reaktionspulver Beton – RPВ или Reactive Powder Concrete – RPC) и др. [1, 16].

Эти виды бетонов удовлетворяют высоким требованиям по прочности на сжатие и растяжение, трещиностойкости, ударной вязкости, износостойкости, коррозионной стойкости, морозостойкости и другим важнейшим эксплуатационным показателям [8, 14, 16–30].

Революционный характер развития бетоноведения связан с концепцией высокофункциональных бетонов НРС (High Performance Concrete). Один из

Таблица 1
Table 1

Составы бетонов старого, переходного и нового поколений
The concrete compositions of the old, transitional and new generation

Компоненты	Содержание компонентов в составе, в мас. частях		
	4	5	6
Цемент ульяновский ПЦ 500 Д0	1	1	1
Песок молотый (микрокварц)	1,1	0,75	–
Микроцемент (липецкий)	–	0,1	–
Кварцевый песок фракции 0–0,63 мм (ивановский)	2,753	1,775	2,065
Кварцевый песок фракции 0,63–2,5 мм (ивановский)	2,347	1,975	1,76
ГП Melflux 1641	0,009	0,009	0,009
Вода	0,6	0,526	0,525

Таблица 2
Table 2

Прочность бетонов различных видов
The strength of various types of concrete

Номер состава	ρ , кг/м ³	Предел прочности					
		при сжатии		при изгибе		на растяжение при раскалывании	
		R , МПа	Отн. ед.	R_{fb} , МПа	Отн. ед.	R_{bb} , МПа	Отн. ед.
4	2300	103	2,06	9,84	1,63	4,33	1,62
5	2270	110,5	2,25	11,87	1,97	6,83	2,55
6	2100	50	1	6,02	1	2,68	1

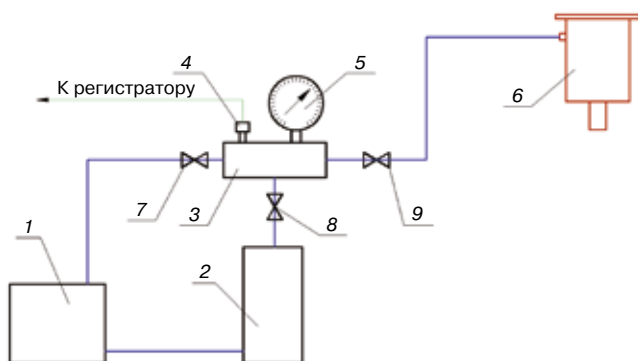


Рис. 1. Общий вид гидравлической схемы нагружающего устройства для лазерно-интерференционных исследований образцов: 1 – емкость для гидрожидкости; 2 – источник высокого давления; 3 – распределительный блок; 4 – датчик давления; 5 – образцовый манометр; 6 – нагружающий гидроцилиндр; 7 – вентиль для слива гидрожидкости; 8 – вентиль подачи гидрожидкости; 9 – запорный вентиль гидроцилиндра

Fig. 1. General view of the hydraulic circuit of the loading device for laser-interference studies of samples: 1 – capacity for hydraulic fluid; 2 – high pressure source; 3 – distribution block; 4 – pressure sensor; 5 – standard pressure gauge; 6 – loading hydraulic cylinder; 7 – valve for draining the hydraulic fluid; 8 – hydraulic fluid supply valve; 9 – hydraulic cylinder shutoff valve

ее создателей канадский ученый П.-К. Айчин констатирует ее отличие от концепции высокопрочных бетонов (ВПБ) (High Strength Concrete (HSC)). Развитие технологии высокофункциональных бетонов П.-К. Айчин и его последователи [31] видели в достижении максимально возможных показателей прочности ($R_{сж}=140$ МПа), технологичности, плотности и долговечности. Важным в этом случае является физико-химическое диспергирование высококонцентрированных минеральных порошков различной химико-минералогической природы для производства строительных материалов с сохранением чрезвычайно длительной агрегативной устойчивости.

Научные исследования, посвященные данной проблематике, были рассмотрены в многочисленных ранних публикациях сотрудников кафедры «Технология бетонов, керамики и вяжущих» (ТБК и В) Пензенского государственного архитектурно-строительного университета. Очень важными для технологий строительных материалов в этих работах были экспериментальные доказательства достижения водоредуцирующих эффектов, равных 8–15 против 1,8–2 в цементных дисперсиях [5]. В этих экспериментах гравитационная текучесть пластифицированных минеральных суспензий сохранялась при снижении расхода воды в 8–15 раз! Именно такие кардинальные изменения реологических свойств и водоредуцирующих эффектов послужили основой для создания высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов нового поколения [5, 6, 32–35]. Была сформулирована новая стратегия прогресса в получении высоконаполненных и высокоэкономичных бетонов рядовых марок М200–М600 и бетонов повышенной прочности М600–М1000, высокопрочных и сверхвысокопрочных: через рациональную реологию в будущее бетонов [13, 35, 36].

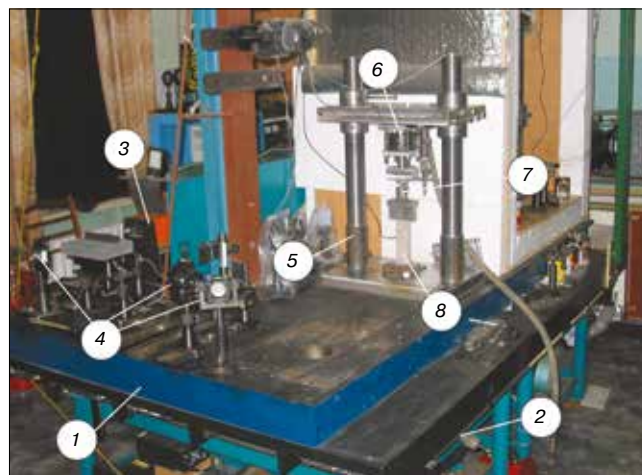


Рис. 2. Установка для регистрации голографических интерферограмм: 1 – массивная платформа (2500 кг); 2 – пневматические подушки виброзащиты; 3 – лазер; 4 – оптические элементы; 5 – нагружающее устройство; 6 – гидроцилиндр; 7 – датчик усилия; 8 – образец

Fig. 2. The installation for recording holographic interferograms: 1 – massive platform (2500 kg); 2 – pneumatic vibration protection pads; 3 – laser; 4 – optical elements; 5 – loading device; 6 – a hydraulic cylinder; 7 – force sensor; 8 – sample

Порошково-активированные бетоны характеризуются улучшенными прочностными показателями (табл. 1, 2)

Важным направлением является проведение исследований материалов по оптимизации их по показателям динамической прочности. При этом наряду с установлением физико-механических показателей цементных композитов необходимо выявление закономерностей их деформирования и разрушения под действием силовых нагрузок.

Изучение механики разрушения бетонов традиционными методами предусматривает нагружение исследуемого образца и регистрацию его деформационного отклика, зависящего от величины нагрузки. Такой подход достаточно прост и удобен, но дает информацию лишь о предельных состояниях объекта исследования. В то же время для специалистов в области механики деформированного твердого тела и расчета строительных конструкций важную роль играет понимание процесса разрушения материала и его поведение на всех стадиях испытаний.

В этой связи цель работы состояла в изучении стадий развития процессов, сопровождающих разрушение образцов с фиксацией полей перемещений/деформаций синхронно с приложением нагрузки.

Для проведения испытаний использовали методы лазерной голографической интерферометрии [37–41]. Перспективность применения лазерно-интерференционных методов для исследования строительных материалов сложных структур подтверждена рядом успешных экспериментальных исследований, позволивших выявить ранее неизвестные особенности механики разрушения различных строительных материалов, в том числе и на основе цементных вяжущих [37, 38, 42, 43].

Физическая сущность метода состоит в регистрации волновых полей, отраженных исследуемой по-

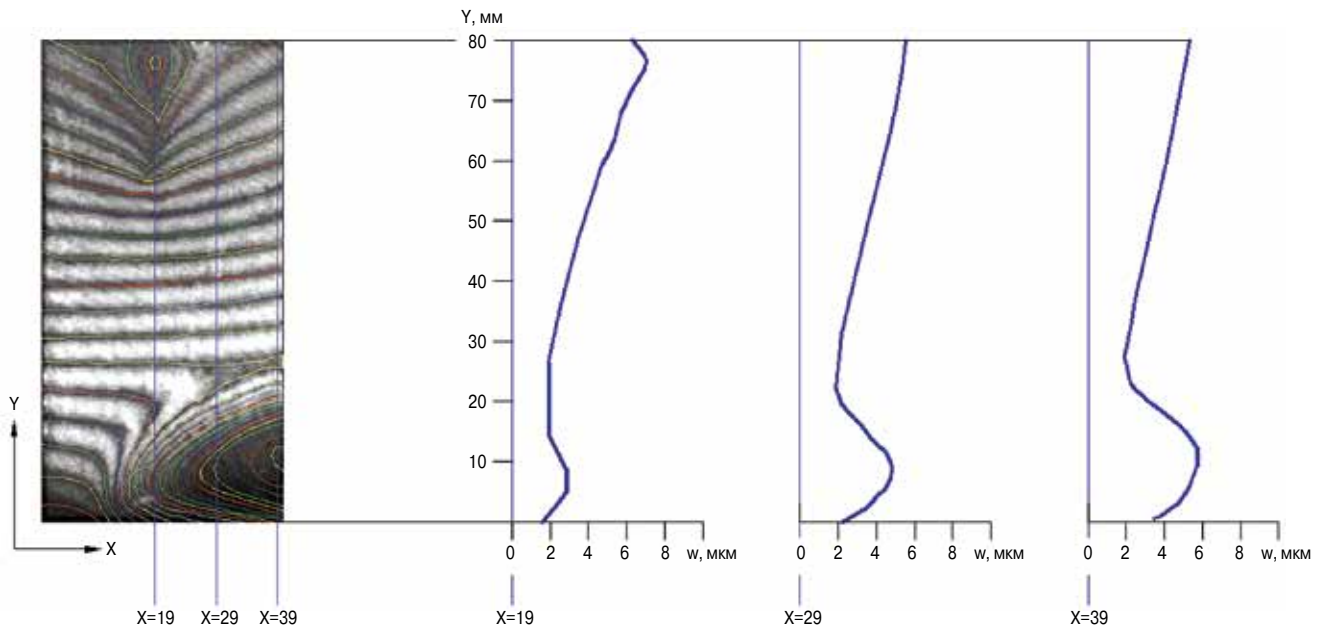


Рис. 3. Расшифровка интерферограммы с построением графиков поля перемещений по сечениям
 Fig. 3. Interferogram decoding with plotting field plot graphs

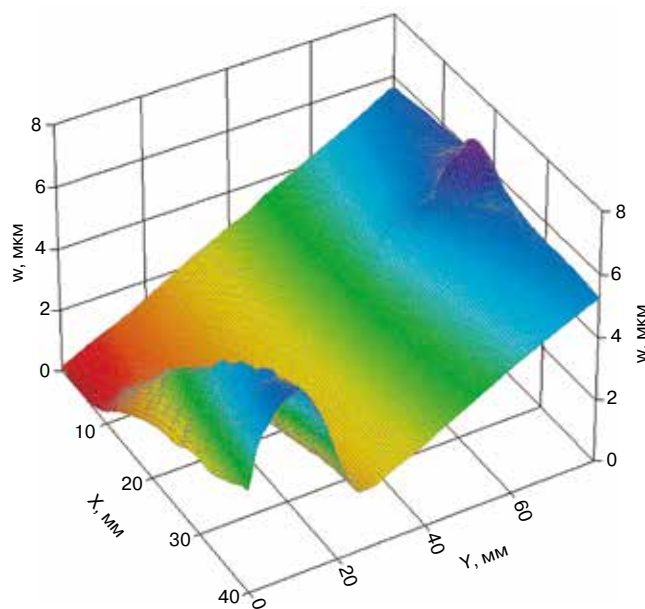


Рис. 4. Представление данных о поле перемещений образца в виде 3D-графика
 Fig. 4. Presentation of sample displacement field data as 3D-graphics

верхностью в различные моменты времени, и последующим сравнением этих волновых полей между собой. Полученные в результате сравнения интерференционные кривые однозначно связаны с полем перемещений исследуемого объекта [40].

Для нагружения образцов использовался пресс усилием до 200 кН, оснащенный силовым гидроцилиндром (рис. 1).

Метод основан на взаимодействии световых волн, сформированных голографическими изображениями объекта исследования в исходном и нагруженном состоянии [23, 38]. Чувствительность метода при регистрации полей перемещений составляет доли световой волны (0,1–0,3 мкм).

На рис. 2 показан общий вид измерительной установки, использованной для регистрации голографических интерферограмм.

Проведение исследований процессов разрушения образцов предполагает выполнение ряда последовательных этапов: опрессовка контактирующих поверхностей трехкратным нагружением с усилием, составляющим 5–10% от усилия разрушения; нагружение образца усилием 5% от прогнозируемого уси-

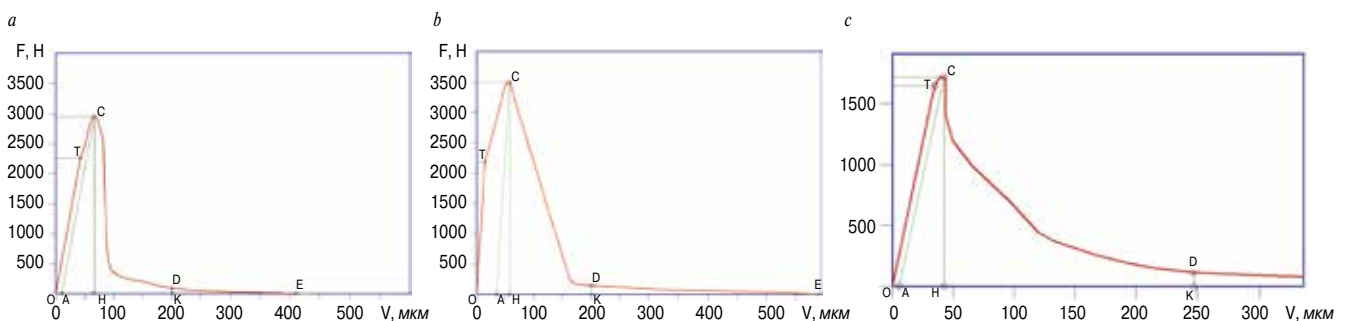


Рис. 5. Полные равновесные диаграммы деформирования песчаного бетона составов: а – № 4; б – № 5; с – № 6
 Fig. 5. Complete equilibrium deformation diagrams of sand concrete compositions: а – No. 4; б – No. 5; с – No. 6

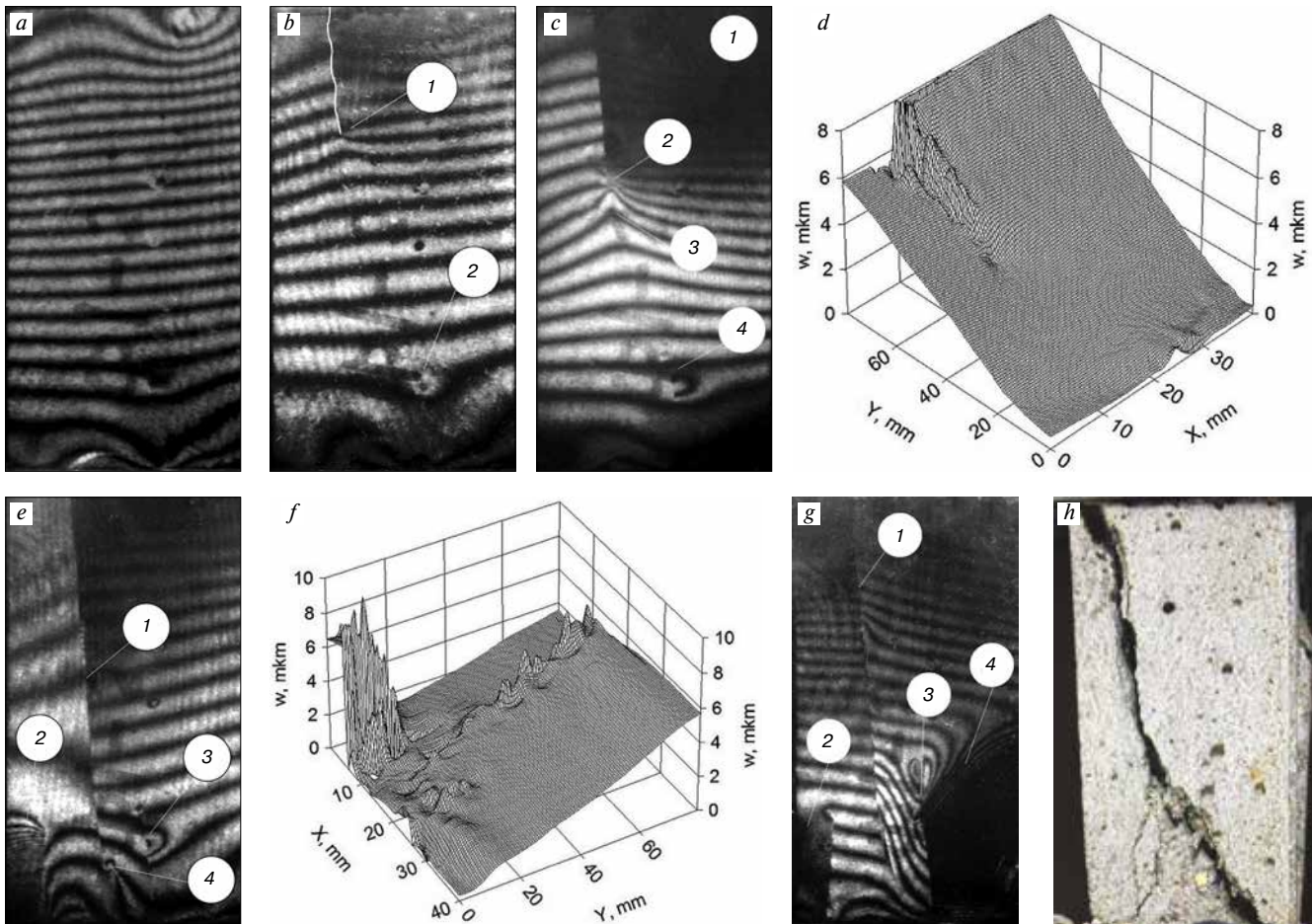


Рис. 6. Интерферограммы (a–c, e, g), 3D-графики (d, f) деформаций поверхности и фотография (h) образца состава № 6 ($\Delta\sigma=1,53$ МПа, другие пояснения приведены в тексте)

Fig. 6. Interferograms (a–c, e, g), 3D-graphics (d, f) of surface deformations and photograph (h) of sample No. 6 ($\Delta\sigma=1.53$ MPa)

лия разрушения и проведение первой экспозиции; увеличение нагрузки на образец на 2–3% от прогнозируемого усилия разрушения и проведение второй экспозиции; извлечение фотопластинки из держателя и отправка на химическую обработку; наблюдение полученной интерферограммы (если частота интерференционных полос высока, то перепад тестирующей нагрузки для следующей интерферограммы уменьшают; если частота полос низка, то перепад нагрузки соответственно увеличивают); установка новой фотопластинки; повышение тестового усилия на 10–15% и выполнение первой экспозиции второй фотопластинки; увеличение нагрузки на образец на 2–3% от прогнозируемого усилия разрушения и проведение второй экспозиции. Все действия, описанные для первой экспозиции, повторяются и для второй: установка новой фотопластинки; циклическое повторение алгоритма до полного разрушения образца; копирование полученной серии интерферограмм цифровой камерой; выполнение качественного и количественного анализа; анализ процессов деструкции исследуемых образцов и сопоставление результатов со структурой и составами образцов.

Анализ интерферограмм выполняли по методике, описанной в работах [39, 41–43], где перемещение в точке определяется по формуле:

$$\vec{d}(\vec{r}_0 + \vec{r}_H) = \lambda n,$$

где \vec{d} – вектор перемещения точки на исследуемой поверхности; \vec{r}_0 – единичный вектор освещения исследуемой поверхности; \vec{r}_H – единичный вектор наблюдения исследуемой поверхности; λ – длина волны лазерного излучения; n – порядок интерференционной полосы.

Обработку данных эксперимента проводили с применением графического комплекса AutoCAD. На рис. 3 показана одна из интерферограмм на стадии расшифровки.

Для более наглядного представления о деформировании образца применяли 3D-визуализацию поля перемещений, показанную на рис. 4, что существенно сокращает также время анализа интерферограмм.

В настоящей работе приведены результаты исследования процессов деформирования порошково-активированных бетонов нового поколения в

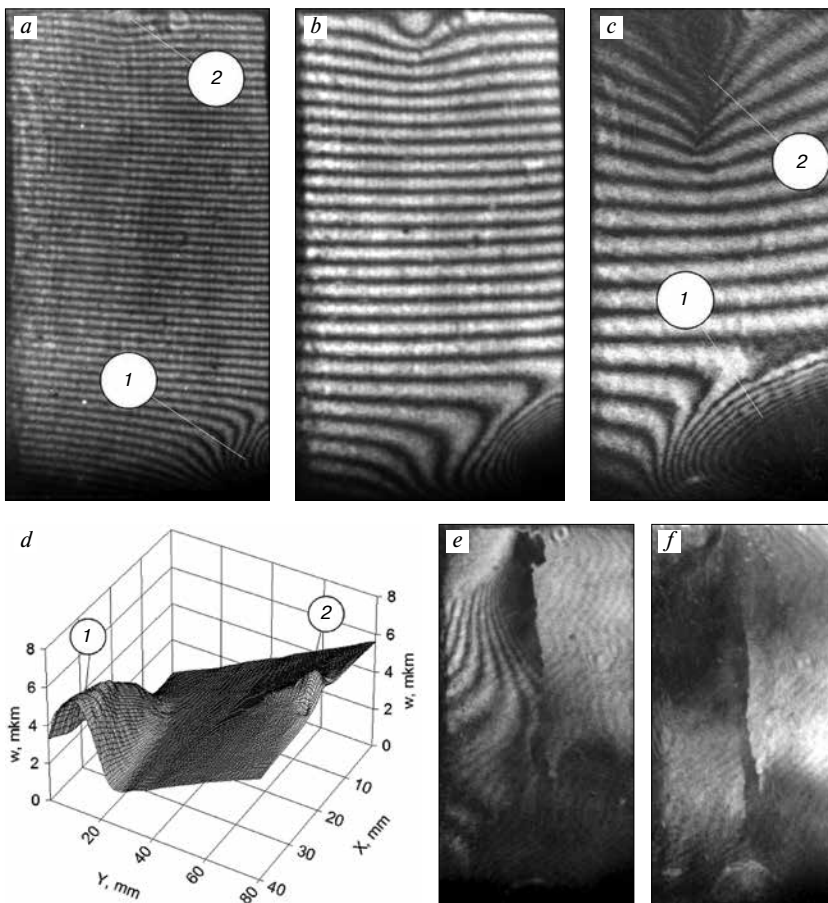


Рис. 7. Интерферограммы (а–с, е, f) и 3D-график (d) деформаций поверхности образца состава № 4 ($\Delta\sigma=1,53$ МПа, другие пояснения приведены в тексте)
Fig. 7. Interferograms (a–c, e, f), 3D-graph (d) of surface deformations of sample No. 4 ($\Delta\sigma=1.53$ MPa, other explanations are given in the text)

сравнении с материалами старого и переходного поколений.

Влияние тонкодисперсного кварца (состав № 4), сочетания микрокварца с микрокремнеземом (состав № 5) на характер деформирования песчаного бетона в сравнении с характером деформирования контрольного состава № 6 приведено на рис. 5–8.

В бетоне без кварцевого микронаполнителя (состав № 6) при уровне напряжений $0,27 \sigma_{\text{разр}}$ наблюдается деформирование образца как изотропного тела с незначительными аномалиями деформаций в зоне его контакта с нагружающими плитами пресса (рис. 6, а). С ростом нагрузки до $0,59 \sigma_{\text{разр}}$ образуется зона повышенных пластических деформаций, идентифицируемых как визуально ненаблюдаемая трещина (поз. 1, рис. 6, b), и появляется незначительная аномалия в зоне локального деформирования образца (поз. 2, рис. 6, b), которая с ростом напряжений до $0,72 \sigma_{\text{разр}}$ развивается с образованием новых аномальных зон (поз. 1–4, рис. 6, c, d). При уровне напряжений $0,82 \sigma_{\text{разр}}$ вертикальная зона пластических деформаций (поз. 1, рис. 6, e) практически полностью пересекает исследуемую поверхность образца, разделяя его на два блока, но тормозится структурным элементом материала (поз. 4, рис. 6, e). В левой

нижней части образца (поз. 2) развивается зона высокоградиентной деформации, параллельная трещине 1, разделяющая образец на два субблока. Наблюдавшаяся ранее аномалия формирует локальную трещину в зоне 3. Сформированные блоки ведут себя как отдельные упругие элементы с существенно различными деформационными полями (рис. 6, d, f). При уровне напряжений $0,95 \sigma_{\text{разр}}$ магистральная трещина развивается по всей длине образца (поз. 1, рис. 6, g).

Фрагмент в левом нижнем углу образца (поз. 2, рис. 6, g) претерпевает непрерывное перемещение. Аномальная зона 3 порождает третью вертикальную трещину, обеспечивающую свободу перемещения вновь сформированному блоку 4. Наблюдается разрушение образца, при которой крупные блоки удерживаются геометрическим замыканием на границе их поверхностей перед его физическим расчленением на фрагменты магистральной трещиной (рис. 6, h).

В образцах состава № 4 с микрокварцем при уровне напряжений $0,15 \sigma_{\text{разр}}$ наблюдаются локальные микроразрушения в зоне контакта нагружающих плит с образцом (поз. 1 и 2, рис. 7, a), связанные с не-

ровностями торцевых поверхностей образцов и их обмятием с ростом нагрузки (рис. 7, b), которые развиваются с ростом нагрузки и проявляются при уровне напряжений $\approx 0,5 \sigma_{\text{разр}}$ (поз. 1 и 2, рис. 7, c, d), приводя к началу формирования магистральной трещины, направленной вдоль сжимающей нагрузки и вначале визуально не выявляемой даже при уровне напряжений $0,91 \sigma_{\text{разр}}$ (рис. 7, e), а затем отчетливо наблюдаемой на интерферограмме при уровне напряжений $\approx \sigma_{\text{разр}}$.

Для образца состава № 5 с микрокварцем и микрокремнеземом с увеличением нагрузки от уровня напряжений $0,13$ до $0,26 \sigma_{\text{разр}}$ поле перемещений по всей поверхности образца остается равномерным, без локальных аномалий (рис. 8, a, b).

При уровне напряжений $0,47 \sigma_{\text{разр}}$ локальная кольцевая структура интерференционных полос в верхнем левом углу образца свидетельствует о смещении усилий контакта в эту зону, что объясняется продолжающейся опрессовкой контактирующих с плитой пресса поверхностей образца (рис. 8, c). Для большей части образца наблюдается равномерная деформация без признаков появления аномальных пластических деформаций (рис. 8, d). Приращение напряжений на 38% – с уровня $0,47$ до $0,65 \sigma_{\text{разр}}$ вы-

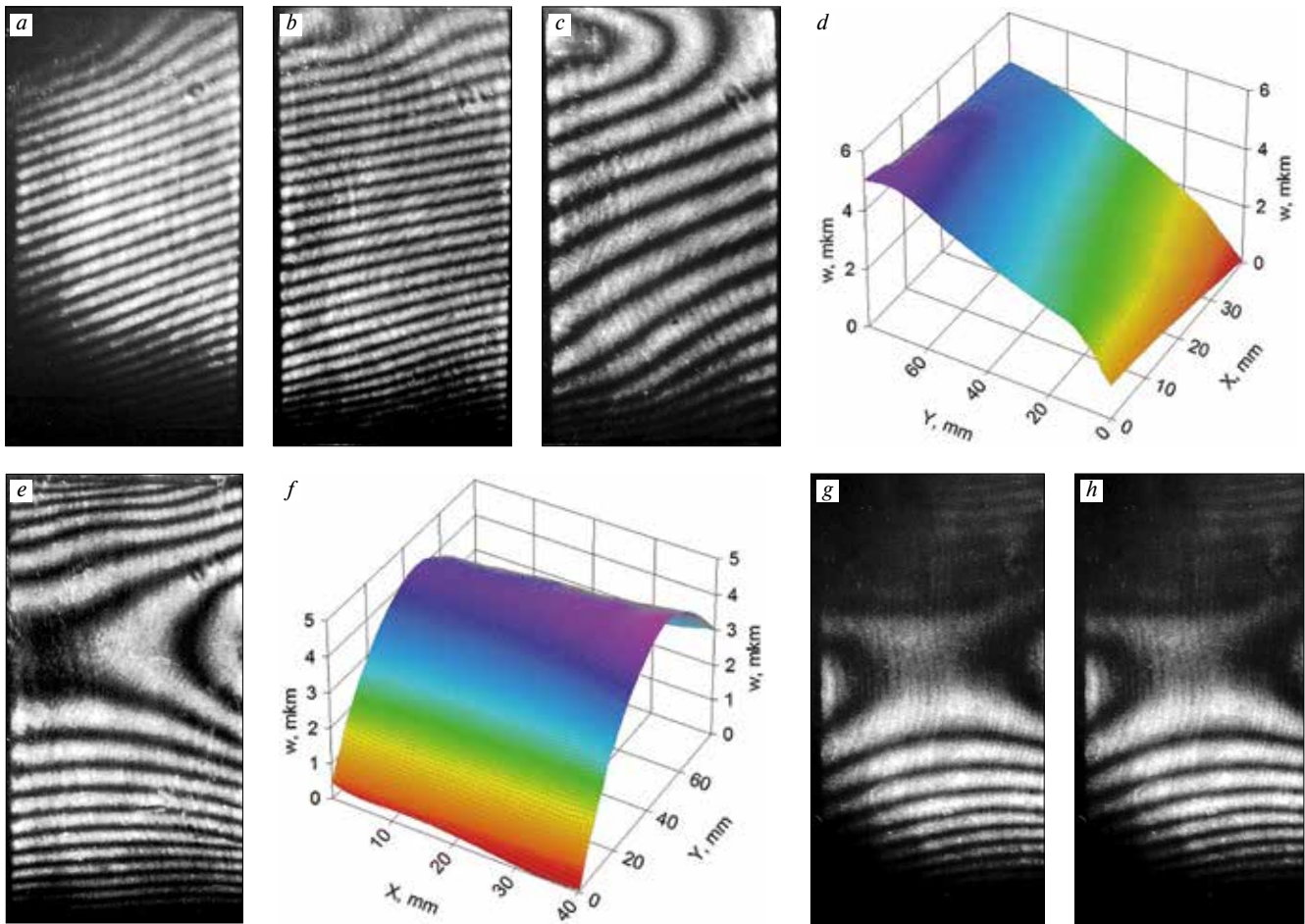
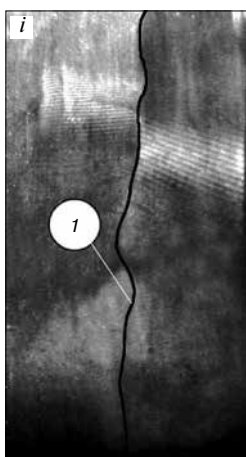


Рис. 8. Интерферограммы (a–c, e, g–i), 3D-графики (d, f) деформаций поверхности и фотография (j) образца состава № 5 ($\Delta\sigma=1,53$ МПа, другие пояснения приведены в тексте)

Fig. 8. Interferograms (a–c, e, g–i), 3D-graphics (d, f) of surface deformations, and photograph (j) of sample No. 5 ($\Delta\sigma=1.53$ MPa, other explanations are given in the text)



звало деформацию центральной части образца, что объясняется проявлением «эффекта обоймы» – его стесненными деформациями в зоне контакта с плитами пресса (рис. 8, e).

При таком уровне напряжений зон аномальных пластических деформаций по-прежнему не наблюдается (рис. 8, f), в отличие от состава № 4, у которого при уровне напряжений $\approx 0,5 \sigma_{\text{разр}}$ наблюдалось начало формирования магистральной трещины (поз. 1 и 2, рис. 7, c, d), или

состава № 6, у которого при уровне напряжений $0,59 \sigma_{\text{разр}}$ появилась зона повышенных пластических деформаций, идентифицируемых как визуально ненаблюдаемая трещина, (поз. 1, рис. 6, b) и зона локального деформирования образца (поз. 2, рис. 6, b).

При уровне напряжений от $0,78$ до $0,91 \sigma_{\text{разр}}$ характер поля перемещений существенно не изменяется – отсутствуют локальные аномалии, нет признаков зарождения трещин (рис. 8, g, h), что принципиально отличает поведение состава № 5 от состава № 4 (рис. 7) и № 6 (рис. 6). При этом потеря контраста интерференционных полос в верхней и нижней частях образца объясняется началом его деструкции в зоне контакта с опорной и нагружающей плитами пресса (рис. 8, h). Такое однородное деформирование образца вплоть до нагрузки свыше 90% от разрушающей привело при уровне напряжений $\approx 1 \sigma_{\text{разр}}$ к спонтанному развитию, по-видимому, из зон контакта образца с опорной и нагружающей плитами пресса вертикально направленной магистральной трещины (рис. 8, i), расчленившей образец на два равных фрагмента (рис. 8, j).

Выводы

1. Показана актуальность проведения исследований долговечности бетонов, так как конструкции на их основе подвержены во время эксплуатации растрескиванию. Цель исследования состояла в изучении стадий развития процессов, сопровождающих разрушение образцов бетонов методами лазерной интерферометрии с фиксацией полей перемещений синхронно с приложением нагрузки.

2. Объектами исследований являлись порошково-активированные бетоны с высокой долей суспензионной составляющей, включающей в своем составе наряду с цементом, песком и водой суперпластификатор, и реакционно-активной добавки. В качестве сравнимых материалов рассматривались бетоны переходного и старого поколений. Бетоны старого поколения формировали из цементно-песчаной смеси с суперпластификатором; переходного типа – с добавлением реакционно-активной добавки микрокремнезема.

3. В результате проведения исследований методами лазерной интерферометрии выявлено:

- снижение В/Ц вызывает изменение механизма разрушения материала, при В/Ц 0,267 – через формирование магистральной трещины на ранних стадиях нагружения и ее последующее развитие

вплоть до разрушения образца, а при В/Ц 0,35 – через образование блочной структуры с последующим закрытием поперечных трещин блоков и слиянием продольных блочных трещин в магистральную трещину. Лазерно-интерференционные исследования в целом подтвердили блочный характер предразрушения образца с гиперпластификатором «Melflux 1641F» (состав № 3) с последующим формированием магистральной трещины или трещин, приводящих к его физическому разрушению и фрагментированию на отдельные пластины [43].

- методами лазерной интерферометрии установлено, что введение микрокварца, особенно в сочетании с аморфно-активным микрокремнеземом, существенно отодвигает момент начала микротрещинообразования в цементных образцах, которые проявляют однородное поле деформаций, вплоть до уровня напряжений, составляющих 0,90–0,95 от разрушающих образец на основе цементно-песчаного раствора без тонкодисперсных наполнителей, отличается более низким уровнем трещинообразования, соответствующий уровню напряжений 0,5–0,6 от разрушающих, при этом с ростом нагрузки разрушение образца имеет блочный характер.

Список литературы

1. Баженов Ю.М. Современная технология бетона // *Бетон и железобетон – взгляд в будущее: Научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону*. Т. 7. Москва. 12–16 мая 2014 г. С. 23–28.
2. Фаликман В.Р., Сорокин Ю.В., Калашников О.О. Строительно-технические свойства особо высокопрочных быстротвердеющих бетонов // *Бетон и железобетон*. 2004. № 5. С. 5–10.
3. Сильвер Део. Аспекты применения неметаллической фибры. Исследование применения фибры для изделий из бетона // *CPI – Международное бетонное производство*. 2011. № 4. С. 46–56.
4. Петер Либлани, Даниэль Рингвельски. Влияние технологии перемешивания на свойства сверхпрочных бетонов // *CPI – Международное бетонное производство*. 2012. № 3. С. 32–35.
5. Калашников В.И. Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения // *Бетон и железобетон*. 2012. № 1. С. 82.
6. Калашников В.И., Ерофеев В.Т., Тараканов О.В. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2016. № 4 (688). С. 30–37.
7. Калашников В.И., Ерофеев В.Т., Тараканов О.В., Архипов В.П. Концепция стратегического развития пластифицированных порошково-активиро-

References

1. Bazhenov Yu.M. Modern technology of concrete. *Concrete and reinforced concrete – a look into the future: scientific papers of the III All-Russian (II International) conference on concrete and reinforced concrete*. Vol. 7. Moscow. May 12–16, 2014, pp. 23–28. (In Russian).
2. Falikman V.R., Sorokin Yu.V., Kalashnikov O.O. Construction and technical properties of particularly high-strength quick-hardening concrete. *Beton i zhelezobeton*. 2004. No. 5, pp. 5–10. (In Russian).
3. Silver Deo. Aspects of the use of non-metallic fiber. The study of the use of fiber for concrete products. *CPI – International Concrete Production*. 2011. No. 4, pp. 46–56. (In Russian).
4. Peter Liblani, Daniel Ringwelski. The influence of mixing technology on the properties of heavy-duty concrete. *CPI – International Concrete Production*. 2012. No. 3, pp. 32–35. (In Russian).
5. Kalashnikov V.I. How to turn old-generation concrete into high-performance new-generation concrete. *Beton i zhelezobeton*. 2012. No. 1, pp. 82. (In Russian).
6. Kalashnikov V.I., Erofeev V.T., Tarakanov O.V. Suspension-filled concrete mixes for new generation powder-activated concrete. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2016. No. 4 (688), pp. 30–37. (In Russian).
7. Kalashnikov V.I., Erofeev V.T., Tarakanov O.V., Arkhipov V.P. The concept of strategic development of plasticized powder-activated concrete of a new gen-

- ванных бетонов нового поколения // *Высокопрочные цементные бетоны: технологии, конструкции, экономика (ВПБ-2016): Сборник тезисов докладов междунар. науч.-техн. конф.* Казань, 2016. С. 36.
8. Гуляева Е.В., Ерофеева И.В., Калашников В.И., Петухов А.В. Влияние реакционно-активных добавок на прочностные свойства пластифицированного цементного камня // *Молодой ученый*. 2014. № 19. С. 194–196.
 9. Калашников В.И., Ерофеева И.В., Володин В.М., Абрамов Д.А. Высокоэффективные самоуплотняющиеся порошково-активированные песчаные бетоны и фибробетоны // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1–2. <https://www.science-education.ru/pdf/2015/1-2/237.pdf>
 10. Баженов Ю.М., Фаликман В.Р. Новый век: новые эффективные бетоны и технологии // *Материалы I Всероссийской конференции по бетону и железобетону*. Москва, 2001. С. 91–101.
 11. Чернышев Е.М., Потамошнева Н.Д., Артамонова О.В., Славчева Г.С., Коротких Д.Н., Макеев А.И. Приложения нанохимии в технологии твердофазных строительных материалов: научно-инженерная проблема, направления и примеры реализации // *Строительные материалы*. 2008. № 2. С. 32–36.
 12. Коротких Д.Н. Трещиностойкость современных цементных бетонов (проблемы материаловедения и технологии): Монография. Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2014. 141 с.
 13. Калашников В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов. Ч. 3. От высокопрочных и особо высокопрочных бетонов будущего к суперпластифицированным бетонам общего назначения настоящего // *Технологии бетонов*. 2008. № 1. С. 22–26.
 14. Гуляева Е.В., Ерофеева И.В., Калашников В.И., Петухов А.В. Влияние содержания воды, вида суперпластификатора и гиперпластификатора на растекаемость суспензий и прочностные свойства цементного камня // *Молодой ученый*. 2014. № 19. С. 191–194.
 15. Калашников В.И. Терминология науки о бетоне нового поколения // *Строительные материалы*. 2011. № 3. С. 103–106.
 16. Ушеров-Маршак А.В. Бетонведение: современные этюды. Харьков: Раритеты Украины, 2016. 135 с.
 17. Ушеров-Маршак А.В. Взгляд в будущее бетона // *Строительные материалы*. 2014. № 3. С. 4–6.
 18. Величко Е.Г. Морозостойкость бетона с оптимизированным дисперсным составом // *Строительные материалы*. 2012. № 2. С. 81–83.
 19. Степанова В.Ф., Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Барыкин Л.И. Влияние добавок микрокремнезема на коррозионную стойкость арматурной стали в бетоне // *Бетон и железобетон*. 1993. № 5. С. 28–30.
 20. Gulyaeva E.V., Erofeeva I.V., Kalashnikov V.I., Petukhov A.V. The effect of reactive additives on the strength properties of plasticized cement stone. *Molodoi uchenyi*. 2014. No. 19, pp. 194–196. (In Russian).
 21. Kalashnikov V.I., Erofeeva I.V., Volodin V.M., Abramov D.A. High-performance self-compacting powder-activated sand concrete and fiber concrete. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. No. 1–2. <https://www.science-education.ru/pdf/2015/1-2/237.pdf> (In Russian).
 22. Bazhenov Yu.M., Falikman V.R. New century: new effective concretes and technologies. *Materials of the 1st All-Russian Conference on Concrete and Reinforced Concrete*. Moscow, 2001, pp. 91–101. (In Russian).
 23. Chernyshev E.M., Potamoshneva N.D., Artamonova O.V., Slavcheva G.S., Korotkikh D.N., Makeev A.I. Applications of nanotechnology in the technology of solid-phase building materials: scientific and engineering problem, directions and examples of implementation. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*/ 2008. No. 2, pp. 32–36. (In Russian).
 24. Korotkikh D.N. Treshchinostoykost' sovremennykh tsementnykh betonov (problemy materialovedeniya i tekhnologii): monografiya [Crack resistance of modern cement concrete (problems of materials science and technology): monograph. Voronezh: Voronezh GASU. 2014. 141 p.
 25. Kalashnikov V.I. Through the rational rheology of the future of concrete. Part 3. From high-strength and extra-high-strength concrete of the future to superplasticized general-purpose concrete of the present. *Tekhnologii betonov*. 2008. No. 1, pp. 22–26. (In Russian).
 26. Gulyaeva E.V., Erofeeva I.V., Kalashnikov V.I., Petukhov A.V. Effect of water content, type of superplasticizer and hyperplasticizer on the spreadability of suspensions and strength properties of cement stone. *Molodoi uchenyi*. 2014. No. 19, pp. 191–194. (In Russian).
 27. Kalashnikov V.I. Terminology of science of new generation of concrete. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2011. No. 3, pp. 103–106. (In Russian).
 28. Usharov-Marshak A.V. Betonovedeniye: sovremennyye etyudy [Concrete science: modern studies]. Kharkov: Rarities of Ukraine. 2016. 135 p.
 29. Usharov-Marshak A.V. A look into the future of concrete. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2014. No. 3, pp. 4–6. (In Russian).
 30. Velichko Ye.G. Frost resistance of concrete with optimized disperse composition. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2012. No. 2, pp. 81–83. (In Russian).

20. Калашников В.И., Ерофеев В.Т., Тараканов О.В., Ерофеева И.В. Высокоэкономичные малоцементные пластифицированные бетоны // *Найновите постижения на европейската наука*. 2015. Т. 13. С. 85–87.
21. Калашников В.И., Ерофеева И.В. Высокопрочные бетоны нового поколения // *Materials of the XII International scientific and practical conference «Science without borders»*. Sheffield, 2016. Pp. 82–84.
22. Калиновский М.И. Применение фибры для повышения трещиностойкости бетона // *Транспортное строительство*. 2008. № 3. С. 7–9.
23. Каприелов С.С., Чилин И.А. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // *Бетон и железобетон – взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону*. Т. 3. Москва. 12–16 мая 2014 г. С. 158–164.
24. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н. Конструкционные бетоны новых модификаций для облегченных каркасов энергоэффективных зданий // *Российский строительный комплекс*. 2011. № 10. С. 122–128.
25. Королев Е.В., Гришина А.Н., Сатюков А.Б. Химический состав наномодифицированного композиционного вяжущего с применением нано- и микроразмерных гидросиликатов бария // *Нанотехнологии в строительстве: интернет-журнал*. 2014. № 4 (26). С. 90–103.
26. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Розина В.Е., Буянтуев С.Л. Мелкозернистый базальтофибробетон с нанокремнеземом // *Строительные материалы*. 2015. № 6. С. 45–48.
27. Каприелов С.С., Шенфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны в конструкциях высотных зданий // *II Международный форум архитектуры, строительства, реконструкции городов, строительных технологий и материалов*. Москва. 11–13 ноября 2008 г. С. 29–38.
28. Пайарес И., Барбара Х., Барраган Б., Рамос Г. Самоуплотняющийся бетон с мелкоизмельченным карбонатом кальция // *CPI*. 2012. № 1. С. 34–38.
29. Фаликман В.Р. Новые эффективные высокопрочные бетоны // *Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии*. 2011. № 1. С. 48–54.
30. Максимова И.Н., Макридин Н.И., Ерофеев В.Т., Скачков Ю.П. Прочность и параметры разрушения цементных композитов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. 360 с.
31. Aitcin P.C., Neville, A.M. High performance concrete demystified // *Concrete International*. 1993. Vol. 15, pp. 21–26.
19. Stepanova V.F., Kapriyelov S.S., Sheinfeld A.V., Barykin L.I. The effect of silica fume additives on the corrosion resistance of reinforcing steel in concrete. *Beton i zhelezobeton*. 1993. No. 5, pp. 28–30. (In Russian).
20. Kalashnikov V.I., Yerofeyev V.T., Tarakanov O.V., Yerofeyeva I.V. Highly economical low-cement plasticized concrete. *Naynovite postizheniya na yevropeyskaya nauka*. 2015. Vol. 13, pp. 85–87. (In Russian).
21. Kalashnikov V.I., Erofeeva I.V. New generation high-strength concrete. *Materials of the XII International scientific and practical conference “Science without borders”*. Sheffield 2016, pp. 82–84. (In Russian).
22. Kalinovskiy M.I. The use of fiber to increase the crack resistance of concrete // *Transportnoye stroitel'stvo*. 2008. No. 3, pp. 7–9. (In Russian).
23. Kapriyelov S.S., Chilin I.A. Ultra-high-strength self-compacting fiber-reinforced concrete for monolithic structures. *Concrete and reinforced concrete – a look into the future: scientific papers of the III All-Russian (II International) conference on concrete and reinforced concrete*. Vol. 3. Moscow. May 12–16, 2014, pp. 158–164. (In Russian).
24. Karpenko N.I., Yarmakovskiy V.N. Structural concrete of new modifications for lightweight frames of energy-efficient buildings. *Rossiyskiy stroitel'nyy kompleks*. 2011. No. 10, pp. 122–128. (In Russian).
25. Korolev Ye.V., Grishina A.N., Satyukov A.B. The chemical composition of nanomodified composite binder using nano- and micro-sized barium hydrosilicates. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: internet-zhurnal*. 2014. No. 4 (26), pp. 90–103. (In Russian).
26. Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Rozina V.E., Buyantuev S.L. Fine basalt-fibrous-concrete with nano-silica. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2015. No. 6, pp. 45–48.
27. Kapriyelov S.S., Shenfeld A.V., Kardumyan G.S. New modified concrete in the construction of high-rise buildings. *II International Forum of Architecture, Construction, Urban Reconstruction, Building Technologies and Materials*. Moscow. November 11–13, 2008, pp. 29–38. (In Russian).
28. Payares I., Barbara H., Barragan B., Ramos G. Self-compacting concrete with finely ground calcium carbonate. *CPI*. 2012. No. 1, pp. 34–38. (In Russian).
29. Falikman V.R. New effective high-strength concrete. *Beton i zhelezobeton. Oborudovaniye. Materialy. Tekhnologii*. 2011. No. 1, pp. 48–54. (In Russian).
30. Maksimova I.N., Makridin N.I., Erofeev V.T., Skachkov Yu.P. Prochnost' i parametry razrusheniya tsementnykh kompozitov [Strength and fracture parameters of cement composites]. Saransk: Mordovian University Press, 2015. 360 p.
31. Aitcin P.C., Neville, A.M. High performance concrete demystified. *Concrete International*. 1993. Vol. 15, pp. 21–26.

32. Калашников В.И., Мороз М.Н., Ерофеева И.В. Эффективные бетоны нового поколения с низким удельным расходом цемента на единицу прочности // *Молодой ученый*. 2015. № 6 (86). С. 189–191.
33. Калашников В.И., Володин В.М., Мороз М.Н., Ерофеева И.В., Петухов А.В. Супер- и гиперпластификаторы. Микрокремнеземы. Бетоны нового поколения с низким удельным расходом цемента на единицу прочности // *Молодой ученый*. 2014. № 19. С. 207–210.
34. Калашников В.И. Что такое порошково-активированный бетон нового поколения // *Строительные материалы*. 2012. № 10. С. 70–71.
35. Калашников В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов // *Технология бетонов*. 2007. № 5. С. 8–10; № 6. С. 8–11.
36. Кондращенко В.И., Ярмаковский В.Н., Кесарийский А.Г. Оценка поведения легкого и тяжелого бетонов под нагрузкой методами лазерной интерферометрии // *Строительные материалы*. 2010. № 3. С. 13–15.
37. Кесарийский А.Г., Кондращенко В.И. Практика применения методов голографической интерферометрии // *XXX международная школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике: материалы школы-симпозиума: БФУ им. И. Канта*. Калининград, 2017. С. 110–119.
38. Вест Ч. Голографическая интерферометрия / Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 504 с.
39. Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В. Голографические интерференционные методы измерения деформаций. М.: Наука, 1988. 248 с.
40. Кесарийский А.Г., Кондращенко В.И., Гребенников Д.А., Гузенко С.В. Исследование деформационных характеристик бетонных образцов лазерно-интерференционными методами // *Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ*. 2009. № 4. С. 154–159.
41. Кондращенко В.И., Кесарийский А.Г., Гребенников Д.А., Кендюк А.В., Тарарушкин Е.В. Применение голографической интерферометрии для изучения сложноструктурированных материалов // *Строительные материалы*. 2013. № 6. С. 72–77.
42. Чернышов Е.М., Коротких Д.Н., Кесарийский А.Г. Оценка параметров процесса трещинообразования в структуре современных бетонов методом лазерной голографической интерферометрии // *Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов: Сборник докладов VI международной конференции*. СПб., 2012. С. 65–71.
43. Ерофеева И.В. Физико-механические свойства, биологические и климатическая стойкость порошково-активированных бетонов. Дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2018. 318 с.
32. Kalashnikov V.I., Moroz M.N., Erofeeva I.V. Effective new generation concretes with low specific cement consumption per unit of strength. *Molodoi uchenyi*. 2015. No. 6, pp. 189–191. (In Russian).
33. Kalashnikov V.I., Volodin V.M., Moroz M.N., Erofeeva I.V., Petukhov A.V. Super and hyperplasticizers. Silica fume. New generation concrete with low specific cement consumption per unit of strength. *Molodoi uchenyi*. 2014. No. 19, pp. 207–210. (In Russian).
34. Kalashnikov V.I. What is the powder-activated concrete of new generation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 10, pp. 70–71. (In Russian).
35. Kalashnikov V.I. Through the rational rheology of the future of concrete. *Tekhnologii betonov*. 2007. No. 5, pp. 8–10; No. 6, pp. 8–11. (In Russian).
36. Kondrashchenko V.I., Yarmakovskiy V.N., Kesariyskiy A.G. The modern methods for ensuring of the reinforced concrete structures durability. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 3, pp. 13–15. (In Russian).
37. Kesariyskiy A.G., Kondrashchenko V.I. The practice of applying methods of holographic interferometry. *XXX international school-symposium on holography, coherent optics and photonics: materials of the school-symposium: IKBFU I. Kant*. Kaliningrad. 2017, pp. 110–119. (In Russian).
38. Vest C.H. Golograficheskaya interferometriya: Per. s angl. [Holographic Interferometry: Translation from English] Moscow: Mir. 1982. 504 p.
39. Ostrovskiy YU.I., Shchepinov V.P., Yakovlev V.V. Golograficheskiye interferentsionnyye metody izmereniya deformatsiy [Holographic interference strain measurement methods]. Moscow: Nauka. 1988. 248 p.
40. Kesariyskiy A.G., Kondrashchenko V.I., Grebennikov D.A., Guzenko S.V. Investigation of the deformation characteristics of concrete samples by laser-interference methods. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov SPbGASU*. 2009. No. 4, pp. 154–159. (In Russian).
41. Kondrashchenko V.I., Kesariyskiy A.G., Grebennikov D.A., Kendyuk A.V., Tararushkin E.V. The use of holographic interferometry for study of complexly structured materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 6, pp. 72–77. (In Russian).
42. Chernyshov E.M., Korotkikh D.N., Kesariyskiy A.G. Evaluation of the cracking process parameters in the structure of modern concrete using laser holographic interferometry. *The mechanics of the destruction of concrete, reinforced concrete and other building materials: Collection of reports of the 6th international conference*. St. Petersburg. 2012, pp. 65–71. (In Russian).
43. Erofeeva I.V. Physico-mechanical properties, biological and climatic resistance of powder-activated concrete. Dis. ... Candidate of Sciences (Engineering). Penza 2018. 318 p. (In Russian).

УДК 693.5

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-29-31>А.А. БАТЮШЕНКО¹, инженер; Н.С. СОКОЛОВ², канд. техн. наук (ns_sokolov@mail.ru)¹ ФГУП «Спецстройтехнологии» при Спецстрое РФ (676470, Амурская область, г. Циолковский)² Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова (428015, Чувашская Республика, г. Чебоксары, Московский пр., 15)

Ускоренное возведение монолитных конструкций здания в условиях пониженной температуры

Технологический процесс возведения монолитного железобетонного каркаса включает подбор состава бетонной смеси и режима тепловой обработки для достижения 100% проектной прочности при теоретической температуре 80°C. При этом для снятия остаточных напряжений по результатам тепловой обработки в технический процесс прогрева включено решение по снижению температуры прогрева. Оригинальная методика и разработанные авторами специальные мероприятия быстрого набора прочности монолитного бетона, используемые при высокоскоростном возведении монолитных зданий в условиях пониженной температуры, позволили при строительстве жилого дома с монолитным несущим каркасом микрорайона Радужный в г. Чебоксары в 2012 г. возвести коробку здания с кирпичными ограждающими конструкциями в темпе «40 этажей – за 40 рабочих дней». Данная технология апробирована на строительстве г. Циолковский космодрома Восточный (Амурская обл.).

Ключевые слова: зимнее бетонирование, твердение, температурный режим, технология, обогрев.

Для цитирования: Батюшенко А.А., Соколов Н.С. Ускоренное возведение монолитных конструкций здания в условиях пониженной температуры // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 29–31. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-29-31>

A.A. BATYUSHENKO¹, Engineer; N.S. SOKOLOV², Candidate of Sciences (Engineering) (ns_sokolov@mail.ru)¹ FGUP "Spetsstroytekhologii" at Spetsstroy of the Russian Federation (Tsiolkovsky City, Amur Oblast, 676470, Russian Federation)² I.N. Ulianov Chuvash State University (15, Moskovsky Prospect, Cheboksary, 428015, Chuvash Republic, Russian Federation)

Accelerated Construction of Monolithic Structures of a Building Under Low Temperature Conditions

The technological process of constructing a monolithic reinforced concrete frame includes the selection of the composition of the concrete mix and the mode of heat treatment to achieve 100% of the design strength at a theoretical temperature of 80°C. At the same time to remove residual stresses based on the results of heat treatment a solution for reducing the heating temperature is included in the technical process of warming up. The original technique and special measures of rapid strength gain of monolithic concrete developed by the authors and used for high-speed construction of monolithic buildings under low temperature conditions, made it possible, when constructing a residential building with a monolithic bearing frame in the micro-district "Raduzhny" in Cheboksary in 2012, to build a building cage with brick enclosing structures at the rate of "40 floors – in 40 working days". This technology was tested when constructing the city of Tsiolkovsky of the "Vostochny" Cosmodrome (Amur Oblast).

Keywords: winter concreting, hardening, temperature regime, technology, heating.

For citation: Batyushenko A.A., Sokolov N.S. Accelerated construction of monolithic structures of a building under low temperature conditions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 29–31. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-29-31>

В начале XXI в. в результате развития рыночных отношений при строительстве зданий с монолитным несущим каркасом произошла «техническая революция»: строительные организации произвели замену традиционно используемых в РФ материалов для изготовления опалубки при возведении монолитных конструкций: хвойную доску толщиной 40 мм, хвойный брус сечением 50×70 мм и гвозди длиной 100 мм заменили на многослойную полированную фанеру толщиной 21 мм, швеллер с порошковой покраской и оцинкованные тяз с гайкой (опалубка европейских фирм) [1–5]. Как следствие, оборачиваемость опалубки повысилась от двух до двадцати раз, снизилась трудоемкость монтажа. Одновременно в разы повысилось качество поверхности готовых бетонных конструкций. Но что особенно важно, заказчики согласились с увеличением затрат [6–10].

Одновременно с вопросами комплектации опалубкой (объем, цена, качество и т. д.) появились вопросы по разработке и совершенствованию приемов и технологий возведения зданий [11–15]. К основным из них можно отнести *темпы строительства зданий, выбор типа перекрытия (монолитное перекрытие или железобетонный многослойный настил по ригелям); возможность использования монолитного бетона для фор-*

мирования объемных конструкций фасада. Однако необходимо было обеспечить достижение полной (100%) проектной прочности возводимых железобетонных конструкций за один цикл тепловой обработки; требовалось разработать технологию и научиться возводить монолитные строительные конструкции одной захватки за одни сутки; сохранить объем финансовых затрат в пределах действующей сметы [16–17].

Ниже приведен план специальных мероприятий, разработанный авторами для решения поставленных задач:

1. *Подбор состава бетона, обеспечивающего в «комфортных условиях» сокращение срока набора прочности монолитных конструкций*, с рассмотрением возможности применения следующих технических решений:

- решение 1.1. Снижение температуры тепловой обработки;
- решение 1.2. Обоснование подбора свойств цемента;
- решение 1.3. Применение противоморозных добавок.

2. *Создание условий, «комфортных» для сокращения срока набора прочности бетоном в монолитных конструкциях*, с применением следующих технических решений:

- решение 2.1. Создание теплового контура;

– решение 2.2. Порядок приготовления и транспортировки готовой бетонной смеси в условиях отрицательных температур наружного воздуха;

– решение 2.3. Разработка температурного графика режима тепловой обработки;

– решение 2.4. Расчет мощностей электроустановок для обеспечения режима электротермообработки.

Выполненная работа завершилась успешно. Поиск решения начат в 2003 г. и завершен в 2012 г., а патент РФ получен 8 октября 2019 г. Способ высокоскоростного возведения монолитных конструкций здания в условиях пониженной температуры включает предварительную подготовку, укладку бетона в нагретую опалубку, тепловую обработку, изотермический прогрев, остывание бетона. Перед тепловой обработкой бетона осуществляют его выдерживание при температуре +20°C, а тепловую обработку бетона производят при температуре 65–80°C мощностью греющего кабеля 2,5–5 кВт на 1 м³ бетона. При этом изотермический прогрев бетона осуществляют в течение не менее шести часов при температуре 70–85°C при электрической мощности 1,2–2,5 кВт на 1 м³ бетона. (Патент РФ № 2702486. Способ высокоскоростного возведения монолитных конструкций здания в условиях пониженных температур. Батюшенко А.А. Заявл. 28.01. 2019. Оpubл. 8.10.2019. Бюл. № 28.)

Достигнутый успех является следствием коренного пересмотра всего технологического процесса работы с готовой бетонной смесью (БСГ) в погодных (и не только) условиях строительной площадки при возведении здания с целью положительного решения поставленных задач.

Так, для снятия остаточных напряжений по результатам тепловой обработки в технологический процесс прогрева включено решение по снижению температуры прогрева. Фактически высокоскоростной способ тепловой обработки является *основным* мероприятием по борьбе с силами природы. Часть технических и технологических решений была усовершенствована по сравнению с существующими, а часть была изобретена. Так как данные технические решения в упомянутом изобретении находятся в пределах действующих стандартов и норм, это позволяет применять патент в любой строительной организации страны.

В современной России из готовой бетонной смеси на объектах изготавливается 10 млн м³ монолитных железобетонных конструкций. Как следствие, экономический эффект от внедрения данного изобретения на 1 м³ товарного бетона составляет 6 тыс. р., а на весь объем монолитных железобетонных конструкций – 60 млрд р.

Таким образом, на строительной площадке после внедрения предлагаемых технических решений произойдут следующие изменения.

Список литературы

1. Гринёв А.П., Рудченко И.И., Никогда В.О. Мелкозернистый бетон для монолитного строительства // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2016. № 58. С. 203–214.

Качественные. В п. 2 табл. 5.7 Свода правил СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции» изложено требование о возможности нагружения конструкций расчетной нагрузкой только после достижения бетоном 100% проектной прочности. Одновременно тот же СП 70.13330.2012 в п. 1 табл. 5.7 разрешает производителям работ принимать решение о демонтаже опалубки конструкций при достижении прочности бетона к моменту замерзания в размере от 30 до 80% от проектной. Так как типовых решений по последующему набору прочности не существует (демонтаж опалубки, как правило, полностью уничтожает систему прогрева), производители работ делают все, что могут и знают, чтобы достичь проектную прочность. *В патентное решение заложена идея достижения 100% проектной прочности железобетонных конструкций за один непрерывный цикл тепловой обработки, т. е. «здесь и сейчас».*

Временные. Для достижения бетоном 70% прочности в зимний период на территории европейской части страны необходимо 2–3 сут; в Сибири, на Севере и на Дальнем Востоке до 5 сут. Для достижения 100% проектной прочности требуется соответственно 4 и 7 сут, что в конечном итоге существенным образом влияет на срок строительства объектов. Расчет и практика показывают, что минимальное количество времени, за которое *возможно достижение в конструкции из железобетона 100% проектной прочности, в условиях строительной площадки при любой погоде составит: для фундаментов и массивных конструкций толщиной более 600 мм – 25 ч; для стен, колонн – до 17 ч; для перекрытий – 14 ч; для стыков – 13 ч.*

При таких сроках набора проектной прочности, вопрос о демонтаже опалубки в момент достижения 70% прочности теряет всякий смысл.

Экономические. Экономический эффект в виде снижения себестоимости объекта от сокращения срока строительства здания способом, предлагаемым в патенте, извлекается из сметы расходов на возведение объекта, так как затраты по статьям «Эксплуатация машин и механизмов» и «Накладные расходы» заложены в смету. Таким образом, на внедрение патентованного решения не требуется привлечения финансов со стороны.

При строительстве жилого дома с монолитным несущим каркасом в микрорайоне Радужный г. Чебоксар в 2012 г. удалось возвести монолитный железобетонный каркас жилого здания с кирпичными ограждающими конструкциями в темпе «40 этажей – за 40 рабочих дней». Кроме того, предложенная технология была широко апробирована на строительстве г. Циолковский космодрома Восточный.

References

1. Grinev A.P., Rudchenko I.I., Nikogda V.O. Fine-grained concrete for monolithic construction. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016. No. 58, pp. 203–214. (In Russian).

2. Самускевич В., Кошевар В. Химические добавки в технологии монолитного бетона // *Наука и инновации*. 2011. № 6 (100). С. 18–20.
3. Терентьев О.М., Технология возведения зданий и сооружений. Ростов н/Д: Феникс, 2006. 223 с.
4. Акулова И.И., Чернышев Е.М., Праслов В.А. Прогнозирование развития регионального строительного комплекса: теория, методология и прикладные задачи. Воронеж: ВГТУ, 2016. 162.
5. Кузеванов Д.В., Беляев А.В. Информационное моделирование железобетонных конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 1. С. 58–63.
6. Земляков Г.В. Моделирование процесса тепловой обработки бетона монолитных конструкций // *Наука и техника*. 2015. № 6. С. 37–43.
7. Хаяутин Ю.Г. Монолитный бетон. М.: Стройиздат, 1981. 236 с.
8. Житушкин В.Г. Прочность и диагностика бетона монолитных вертикальных конструкций // *Научная дискуссия: вопросы технических наук*. 2016. № 5 (35). С. 48–61.
9. Козелков М.М., Антипов С.С. Управление жизненным циклом несущих конструкций монолитных железобетонных зданий при помощи технологии информационного моделирования // *Бетон и железобетон*. 2016. № 1. С. 12–15.
10. Sassone M., Casalegno C. Evaluation of the structural response to the time-dependent behaviour of concrete. Part 2. A general computational approach // *The Indian Concrete Journal*. 2012. Vol. 86. No. 12, pp. 39–51.
11. Комаринский М.В., Онисковец Р.В., Остаркова О.А. Бетонирование густоармированных конструкций литыми смесями // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017. № 2 (53). С. 29–41.
12. Комаринский М.В., Червова Н.А. Транспорт бетонной смеси при строительстве уникальных зданий и сооружений // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2015. № 1 (28). С. 6–31.
13. Колчеданцев Л.М., Осипенкова И.Г. Особенности организационно-технологических решений при возведении высотных зданий // *Жилищное строительство*. 2013. № 11. С. 17–19.
14. Славчева Г.С., Шведова М.А., Бабенко Д.С. Анализ и критериальная оценка реологического поведения смесей для строительной 3D-печати // *Строительные материалы*. 2018. № 12. С. 34–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-766-12-34-40>
15. Каклюгин А.В. Сравнительная оценка коррозии бетонов напорного формования. *Безвибрационные методы формования железобетонных изделий: Сборник научных трудов*. Ростов-н/Д: РГАС, 1992. С. 51–57.
16. Колчеданцев Л.М., Волков С.В. Организационно-технологические решения по транспортированию бетонной смеси к месту бетонирования конструкций высотных зданий // *Жилищное строительство*. 2015. № 11. С. 21–26.
17. Батышенко А.А., Соколов Н.С. Сокращение сроков строительства зданий из монолитного бетона // *Строительные материалы*. 2020. № 3. С. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-779-3-49-53>
2. Samuskevich V., Koshevar V. Chemical additives in the technology of monolithic concrete. *Nauka i innovatsii*. 2011. No. 6 (100), pp. 18–20. (In Russian).
3. Terentyev O.M. Tekhnologiya vozvedeniya zdaniy i sooruzhenii [Technology of construction of buildings and structures]. Rostov-on-don: Phoenix. 2006. 223 p.
4. Akulova I.I., Chernyshev E.M., Praslov V.A. Forecasting the development of the regional construction complex: theory, methodology and applied tasks. Voronezh: VSTU, 2016. 162.
5. Kuzevanov D.V., Belyaev A.V. Information modeling of reinforced concrete struct. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2017. No. 1, pp. 58–63. (In Russian).
6. Zemlyakov G.V. Modeling of the process of heat treatment of concrete monolithic structures. *Nauka i tekhnika*. 2015. No. 6, pp. 37–43. (In Russian).
7. Khayutin Yu.G. Monolitnyi beton [Monolithic concrete]. Moscow: Stroyizdat. 1981. 236 p.
8. Gitushkin V. G. The Strength and diagnosis of concrete monolithic vertical structures. *Nauchnaya diskussiya: voprosy tekhnicheskikh nauk*. 2016. No. 5 (35), pp. 48–61. (In Russian).
9. Kozelkov M.M., Antipov S.S. life cycle Management of load-bearing structures of monolithic reinforced concrete buildings using information modeling technology. *Beton i zhelezobeton*. 2016. No. 1, pp. 12–15. (In Russian).
10. Sassone M., Casalegno C. Evaluation of the structural response to the time-dependent behaviour of concrete. Part 2. A general computational approach. *The Indian Concrete Journal*. 2012. Vol. 86. No. 12, pp. 39–51.
11. Komarinskij M.V., Oniskovec R.V., Ostarkova O.A. Concreting of densely reinforced structures with cast mixtures. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzheniy*. 2017. No. 2 (53), pp. 29–41. (In Russian).
12. Komarinskiy M.V., Chervova N.A. Transportation of concrete mix in the construction of unique buildings and structures. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzheniy*. 2015. No. 1 (28), pp. 6–31. (In Russian).
13. Kolchedancev L.M., Osipenkova I.G. Features of organizational and technological decisions in the course of construction of high-rise buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2013. No. 11, pp. 17–19. (In Russian).
14. Slavcheva G.S., Shvedova M.A., Babenko D.S. Analysis and criteria assessment of rheological behavior of mixes for construction 3-D printing. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 12, pp. 34–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-766-12-34-40>
15. Kaklyugin A.V. Comparative assessment of pressureforming concrete corrosion. *Vibration-free methods of forming reinforced concrete products: a Collection of scientific papers*. Rostov-on-Don: RSAC. 1992. pp. 51–57. (In Russian).
16. Kolchedancev L.M., Volkov S.V. Organizational-technological solutions for transporting concrete mix to place of concreting of high-rise buildings structures. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2015. No. 11. pp. 21–26. (In Russian).
17. Batyushenko A.A., Sokolov N.S. Reducing the construction time of buildings made of monolithic concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 3, pp. 49–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-779-3-49-53>

В.В. СТРОКОВА¹, д-р техн. наук (vstrokova@gmail.com); Н. СТОЙКОВИЧ², д-р техн. наук (svnenad@yahoo.com); С.К. ЛАКЕТИЧ¹, магистрант (tsurkina.snezhana@mail.ru); П. ЖАО³, доктор философии (mse_zhaopq@ujn.edu.cn); А. ЛАКЕТИЧ¹, аспирант (aleksandar.laketic@hotmail.com), Н. ЛАКЕТИЧ¹, аспирант (nemanja.03@hotmail.com)

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46)

² Академия профессионально-технического образования – отдел Ниш (18000, Сербия, г. Ниш, ул. Александра Медведова, 20)

³ Университет Цзинаня (25002, Китай, провинция Шандунь, Цзинань, Западная дорога Нанксин-Чжуань, 336)

Высокопроницаемые бетоны с дренирующим эффектом: анализ состояния вопроса и перспективы развития

Предметом настоящей работы явился многокритериальный анализ состояния и перспектив развития технологий получения и применения высокопроницаемых бетонов с дренирующим эффектом, к которым отнесены материалы с коэффициентом проницаемости не ниже 0,1 см/с, обеспеченным высокопористой структурой бетона без учета технологических отверстий. Анализ результатов экспериментальных исследований, выполненных как отечественными, так и зарубежными авторами за последнее десятилетие и представленных в открытых рецензируемых источниках, позволил структурировать высокопроницаемые бетоны по функциональному назначению. Выделены бетоны для дорожных и тротуарных покрытий, систем фильтрации и дренажных водостоков, а также декоративные бетоны с органическим растительным слоем, так называемые «зеленые» бетоны, которые, в свою очередь, применяются как для горизонтальных, так и для вертикальных инженерных решений и характеризуются высокой архитектурной выразительностью. Накопленный эмпирический материал позволил провести обобщение и структурирование имеющихся данных по таким критериям, как вид применяемого вяжущего, генетический тип горных пород, используемых для получения крупного заполнителя, вид функциональных добавок. Представлен анализ результатов работ по разработке рациональных составов, повышению дренирующей способности, прочности, износо-, морозо- и коррозионной стойкости, а также изучению механизма засорения сквозных пор и разрушения высокопроницаемого бетона. Выведены граничные значения пористости, прочности и коэффициента водопроницаемости для рассматриваемого вида бетонов в зависимости от функционального назначения. Обозначены существующие проблемы и намечены пути повышения эффективности высокопроницаемых бетонов с дренирующим эффектом.

Ключевые слова: высокопроницаемый бетон, проницаемый бетон, проницаемое покрытие, дренажный бетон, пористый бетон, крупнозернистый заполнитель, сквозные поры, коэффициент проницаемости, механизм засорения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента для научных школ НШ-2584.2020.8.

Для цитирования: Строчкова В.В., Стойкович Н., Лакетич С.К., Жао П., Лакетич А., Лакетич Н. Высокопроницаемые бетоны с дренирующим эффектом: анализ состояния вопроса и перспективы развития // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 32–61. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-32-61>

V.V. STROKOVA¹, Doctor of Sciences (Engineering) (vstrokova@gmail.com); N. STOJKOVICH², Doctor of Sciences (Engineering) (svnenad@yahoo.com); S.K. LAKETICH¹, Master student (tsurkina.snezhana@mail.ru); P. ZHAO³, PhD (mse_zhaopq@ujn.edu.cn); A. LAKETICH¹, PhD student (aleksandar.laketic@hotmail.com), N. LAKETICH¹, PhD student (nemanja.03@hotmail.com)

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

² College of Applied Technical Sciences Nis (20, Aleksandra Medvedeva Street, Nis, 18000, Republic of Serbia)

³ University of Jinan (336, Nanxin Zhuang West Road, Jinan, Shandong, 250022, China)

High-Permeable Concrete with Drainage Effect: Analysis of the State and Prospects of Development

The subject of this work is a multi-criteria analysis of the status and technology development prospects for the production and use of highly permeable concrete with a drainage effect, to which are assigned materials with a permeability coefficient of at least 0.1 cm/s, provided with highly porous structure concrete without taking into account technological holes. Analysis of the results of experimental studies performed by both domestic and foreign authors in the last decade, and presented in an open peer-reviewed sources, allowed to structure highly permeable concretes on a functional purpose. Highlighted concrete for road and sidewalk coverings, filtration systems and drainage gutters, as well as decorative concrete with an organic plant layer, the so-called “green concretes”, which, in turn, are used for both horizontal and vertical engineering solutions, and characterized high architectural expressiveness. The accumulated empirical material made it possible to generalize and structure the available data according to criteria such as the type of binder used, the genetic type of rocks used to obtain coarse aggregate, and the type of functional additives. The analysis of the results of work on the development of rational compositions, increasing the drainage ability, strength, wear, frost and corrosion resistance, as well as studying the mechanism of clogging of through pores and the destruction of highly permeable concrete, is presented. Defined boundary values of porosity, strength, and water permeability coefficient for the concretes type under consideration depending on the functional purpose. The existing problems are identified and ways to increase the efficiency of highly permeable concrete with a draining effect are outlined.

Keywords: high permeability concrete, permeable concrete, permeable coating, drainage concrete, porous concrete, coarse aggregate, through pores, permeability coefficient, clogging mechanism.

The work is realized in the framework of the President Grant in Russian Federation № NSh-2584.2020.8.

For citation: Strokova V.V., Stojkovich N., Laketic S.K., Zhao P., Laketic A., Laketic N. High-permeable concrete with drainage effect: analysis of the state and prospects of development. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 32–61. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-32-61>

В настоящее время использование проницаемого бетонного покрытия и связанных с ним исследований возросло из-за его экологичности, снижения уровня загрязнения и геотермического градиента окружающей среды, улучшения условий безопасности движения, особенно в дождливые дни.

Благодаря структуре «каркас – пора» и, как следствие, высокой открытой сквозной пористости высокопроницаемый бетон отличается высоким значением коэффициента фильтрации, т. е. усиленным дренажным эффектом.

Высокопроницаемый бетон применяют в гидротехническом и дорожном строительстве, при создании фильтров и дренажных систем для отвода талых и дождевых вод с дорожных покрытий, а также при устройстве элементов крепления земляных и селезащитных сооружений и прочих конструкций. В дорожном строительстве такой вид бетона используется либо в качестве несущего дренажного слоя, укладываемого под покрытие автомобильной дороги, устанавливаемого под плиточным настилом или брусчаткой, либо для создания автостоянок, пешеходных и велосипедных дорожек и иных покрытий с низкой интенсивностью движения. В случае необходимости конструкции из высокопроницаемого бетона с дренирующим эффектом армируют, что делает их менее восприимчивыми к растягивающим усилиям. Использование подобного рода бетонов исключает необходимость в создании ливневой канализации и связевых модулей, что сокращает затраты на установку подземных трубопроводов и ливневых стоков, а также на их обслуживание. Являясь устойчивым элементом городской дренажной системы, высокопроницаемый бетон играет важную роль в уменьшении локальных наводнений в городских районах, регулировании городского микроклимата и поддержании экологического баланса [1].

Относительно новой областью использования высокопроницаемых бетонов, еще мало распространенной в России, является создание на их основе живых бетонных материалов и систем [2–5], нацеленных на развитие биофильного дизайна в городах, сталкивающихся с изменяющимся климатом и уплотнением населения. Растительный бетон [3–5] является эффективным экологически чистым материалом, который все чаще используется при создании архитектурных фасадов зданий, тротуаров, автостоянок и набережных для уменьшения загрязнения окружающей среды, контроля ливневых стоков и предотвращения оползней. По сравнению с существующими системами живых стен, легкими, «висящими на фасаде здания как шторы», сделанными из, например, войлока и пластика, ограничивающими их эксплуатацию, использование высокопроницаемых бетонов в конструкции живых стен [2] способствует продлению их жизненного цикла, уменьшению стоимости за счет устранения второстепенной поддерживающей конструкции и возможности интеграции таких стен в конструктивную структуру здания.

Однако, несмотря на возможность широкого спектра применения высокопроницаемых бетонов, обусловленную достаточными деформационно-прочностными, теплотехническими, звукоизолирующими показателями и высокой огнестойкостью, открытым остается вопрос о продлении срока службы данного материала в связи с его эксплуатацией в условиях, где он подвергается суперпозиции коррозионного воздействия, а именно физическим, химическим и биологическим факторам, а также о снижении проницаемости из-за засорения. Очевидно, что каждый вид воздействия приводит к эксплуатационной «усталости» строительного материала и оказывает существенное влияние на конечную стойкость и долговечность конструкций при эксплуатации, поэтому проницаемый бетон требует регулярного ухода с помощью вакуумной обработки, мойки под давлением и т. д. Агрессивные условия эксплуатации обуславливают необходимость оценки влияния и учета вклада каждого типа воздействия, как при разработке оптимальных составов, так и при эксплуатации конструкций из высокопроницаемых бетонов, что является важной задачей разработки методов пролонгации резистивности и стабильности.

Результаты анализа опубликованных данных

Терминологические вопросы. В ходе поиска и анализа научной литературы были выявлены разночтения в понимании ключевого определения для описания высокопроницаемых бетонов с дренирующим эффектом, в связи с чем необходимо остановиться на терминологических вопросах. Для описания подобного вида бетона ученые различных стран используют следующие термины: проницаемый [6–53], дренажный [54, 55], высокопроницаемый [56], водопроницаемый [57], пористый бетон [58–69], «живой» [2, 4], растительный [3, 5] и т. п. Поиск источников осуществлялся по всем вышеперечисленным терминам.

Согласно СП 28.13330.2017 [70] существует классификация бетонов по проницаемости, по которой максимальные значения коэффициента фильтрации ($2-7 \times 10^{-9}$ см/с) соответствуют марке бетона W4 – нормальной проницаемости. В то же время, согласно результатам анализа научной литературы, а также нормативных документов предприятий, бетон с дренирующим эффектом должен иметь пропускную способность не ниже 0,1 см/с. В связи с этим отнести дренажный бетон к материалам с «нормальной проницаемостью» или назвать его просто проницаемым, несмотря на существующую классификацию, неправомерно, поэтому используется понятие «высокопроницаемый бетон».

Под понятием «проницаемый» или дренажный бетон, также понимают создание конструктивных решений для дорожных покрытий и плит, полученных на основе крупно- или мелкозернистого, плотного или ячеистого бетона с созданием технологиче-

ских отверстий. Так, в одной из проанализированных работ [7] понятие проницаемого бетона было применено к поризованному бетону с технологически созданными сквозными открытыми порами, что принципиально отличает данный материал от остальных, попавших в обзор. Данная работа была включена в выборку статей, поскольку отвечала требованиям, предъявляемым к ней, однако к проницаемым бетонам такой материал относить не совсем корректно, поэтому подобные конструктивные решения при анализе составов и технологии получения материалов в данной статье не рассматривались.

Несмотря на то что существует немало публикаций на тему создания и применения высокопроницаемых бетонов [1–53, 71–73], остается ряд нерешенных вопросов, связанных с низкой прочностью и долговечностью материалов. С целью обобщения результатов исследований, выявления применяемых технологических решений и их влияния на свойства получаемых высокопроницаемых материалов предлагаемый анализ научных публикаций представляется весьма актуальным.

Таким образом, предметом настоящей статьи является анализ литературных источников, рассматривающих вопросы разработки бетонов с коэффициентом проницаемости не ниже 0,1 см/с, обеспеченным высокопористой структурой бетона без учета технологических отверстий, которые используются в качестве верхнего слоя конструктивного решения в дорожном строительстве, системах фильтрации и дренажных водостоках, а также в декоративных материалах и системах с органическим растительным слоем.

Анализ динамики публикационной активности. Анализ подвергалась выборка статей, опубликованных в ведущих рецензируемых российских и зарубежных изданиях, находящихся в открытом доступе за период 2010–2020 гг. Всего было проанализировано 79 научных работ, в число которых не вошли работы, носящие теоретико-обзорный характер, материалы форумов и конференций, тексты диссертаций и монографии, статьи, находящиеся в закрытом или ограниченном доступе, а также результаты исследований, не отличающиеся глубиной проработки.

Анализ публикационной активности проводился на основе нескольких факторов, таких как: число публикаций за установленный период (рис. 1), вовлеченность научных школ различных стран (рис. 2), климатические предпосылки к изучению подобного рода бетонов.



Рис. 1. Динамика публикационной активности
Fig. 1. The dynamics of publication activity

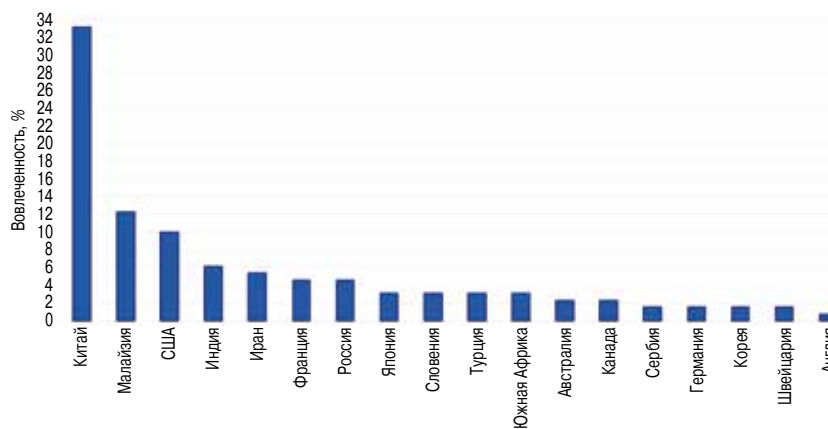


Рис. 2. Российские и зарубежные научные школы, занимающиеся исследованием высокопроницаемого бетона с дренажным эффектом
Fig. 2. Russian and foreign scientific schools that study highly permeable concrete with a draining effect

В ходе ранжирования статей по числу публикаций за установленный период (рис. 1) было выявлено, что интерес к тематике исследования имеет ярко выраженный рост. На сегодняшний день пик публикационной активности приходится на 2019 г., однако количество статей, приходящихся на первые два месяца 2020 г., составляют 22 от опубликованных в прошлом году. Это позволяет предположить превышение показателей 2019 г.

Фундаментальными и прикладными исследованиями в области разработки высокопроницаемых бетонов занимаются как российские, так и зарубежные научные школы (рис. 2). Попытки внедрения промышленных результатов исследований с выходом на промышленную апробацию технологий до сих пор в большей степени также остаются прерогативой зарубежных исследователей. Лидирующие позиции в изучении вопроса высокопроницаемого бетона с дренажным эффектом занимают ученые Китая, Малайзии, США и Индии.

Вероятно, лидерство этих научных школ обусловлено необходимостью решения практических задач, актуальных для соответствующих им климатических зон, связанных с повышенным количеством атмосферных осадков и температурой воздуха, редко опускающейся ниже 0°C.

Так, в субтропическом климатическом поясе (США, северная часть Китая) преобладают субтропические циклоны, а в холодный период, когда воздушные массы смещаются в сторону экватора, выпадают осадки. Субэкваториальный климатический пояс (Индия, южная часть Китая) в летнее время оказывается под влиянием экваториальных влажных ветров, в зимнее – пассатов. Чем ближе к экватору, тем обильнее идут дожди. Экваториальный климат (Малайзия) остается практически неизменным весь год. Показатели температур не опускаются ниже +27°C. Из-за обильных осадков образуется высокая влажность, туманы и облачность.

Таким образом, прослеживается зависимость между заинтересованностью научных школ, задействованных в исследовании высокопроницаемого бетона с дренирующим эффектом, и их принадлежностью к определенным климатическим поясам. В то же время за последние годы рост количества публикаций, в которых представлены результаты исследований по разработке составов и изучению свойств такой разновидности бетонов, конструктивных решений по применению изделий из высокопроницаемых бетонов, а также расширению областей их использования от дренажных бетонов для дорожных покрытий до так называемых «зеленых» бетонов, свидетельствует о повышенном интересе и востребованности данного вида композиционных материалов в строительстве.

Анализ результатов экспериментальных исследований

Анализ текстов публикаций выявил невозможность приведения данных по свойствам сырьевых материалов и разработанных бетонов к единым показателям качества ввиду различного представления авторами сведений, что и нашло отражение в структурированной информации таблице, а также отсутствия ряда физико-механических свойств, что не позволило включить результаты данных статей в статистическую обработку. С одной стороны, это затрудняет проведение обобщений и установление закономерностей свойств разработанных материалов от вида и свойств сырья, а с другой – позволяет расширить спектр возможных методов оценки свойств и контролируемых параметров.

Так, например, в работах авторов [1, 11, 40, 44, 45] затрагивается вопрос прогнозирования, а также повышения проницаемости и прочности исследуемого материала. Отличительной особенностью исследований, представленных в работах [6, 66], является поиск методов устранения засорения сквозных пор высокопроницаемого бетонного материала и анализ механизма их засорения; в работах [37, 69] приведены результаты исследований механизмов разрушения проницаемого бетона; в статьях [28, 31, 47, 49, 50, 57, 58, 74] – оценка фильтрационной способности; в публикациях [13, 38, 51] уделяется внимание влиянию толщины цементной пасты на характеристики высоко-

копроницаемого бетона. Для удобства восприятия информации при описании результатов исследований различных авторов на графиках и в тексте даются ссылки не только на источник информации, но и на номер образца, указанный в первой колонке таблицы.

Анализ результатов экспериментальных исследований (см. таблицу) [1–5, 8–17, 19–38, 40–48, 54–65, 67–69, 75, 76, 78, 79, 84] позволил структурировать публикации по высокопроницаемым бетонам с дренирующим эффектом по следующим критериям.

По составу:

1. На основе цемента без использования полимерного связующего.
2. На основе цемента с использованием полимерного связующего.
3. На основе полимерного или органополимерного связующего.

По функциональному назначению:

1. Бетоны для дорожных и тротуарных покрытий.
2. Бетоны для систем фильтрации и дренажных водостоков.
3. Декоративные бетоны с органическим растительным слоем.

Отличительной особенностью смесей для высокопроницаемых бетонов является отсутствие или минимальное количество мелкого заполнителя, что обеспечивает крупнопористую структуру. В качестве вяжущего наиболее часто применяется портландцемент, реже битум. Это в большей степени связано с тем, что цементобетонные дорожные покрытия имеют более высокую степень отражения, чем асфальтобетонные, а значит, препятствуют повышению температуры городского покрытия в летний период и позволяют экономить до 31% стоимости энергии и технического обслуживания, затрачиваемых на освещение данных покрытий.

Следуя устойчивой тенденции последних десятилетий в направлении снижения ресурсо- и энергоемкости промышленности строительных материалов, в целях снижения расхода вяжущего при сохранении его эксплуатационных характеристик при проектировании высокопроницаемого бетона в качестве активных минеральных добавок используются отходы промышленности (пирогенные – зола-уноса, шлак; механогенные – высокодисперсные отсеvy дробления горных пород). В зависимости от способа (раздельное введение или совместный помол) и количества введения авторы позиционируют это как использование минеральных добавок [3, 11, 12, 15, 24, 25, 31, 56, 65, 75, 76] или как получение композиционного неорганического вяжущего [13, 16, 21, 57, 61, 69]. Отдельный пласт работ связан с использованием в качестве вяжущего сульфалоюминатного цемента (быстрогидратирующий) [4, 5], шлакопортландцемента [57] и пуццоланового цемента [61] (сульфатостойкие), фосфатно-магнезиевого цемента (быстротвердеющий) [16].

Ввиду необходимости повышения водо- и морозостойкости высокопроницаемых бетонов, их механи-

ческих свойств ряд работ построен на использовании в составе сырьевой смеси полимерных вяжущих, таких как полиэфирные смолы [17], эмульсии этиленвинилацетата [35] и латекса [64], силановый полимер [9], стирол-бутадиен-стирол [7, 20, 46, 58–62, 64, 67]. При этом их содержание колеблется от 3,2% от массы цемента [34], что можно позиционировать как добавку, до соотношения «цемент:полимерное связующее», равное 2:1 [62], что соответствует понятию композиционного органоминерального вяжущего. Однако высокая стоимость полимеров и вязкость некоторых из них, например эпоксидной смолы, а также восприимчивость к воздействию открытого огня и повышенной температуры приводят к ограничению их использования, затруднениям при смешивании компонентов и разрушению материала соответственно. Ввиду этого рекомендуется использование бюджетных вариантов полимерного связующего, например полиэфирные смолы.

Оптимальный диапазон водоцементного соотношения с точки зрения прочности и проницаемости составляет от 0,3 до 0,38, однако увеличение содержания цементной пасты может вызвать локальное засорение, сегрегацию цемента и снижение проницаемости, приводящие к образованию бетонов с низкой фильтрационной способностью, несмотря на высокую пористость [11, 13, 52, 77].

Заполнители в высокопроницаемом бетоне с дренающим эффектом имеют однородную или узкую фракцию, преимущественно от 4,75 до 19,5 мм, позволяя создать более крупные поры и улучшать проницаемость. Мелкий заполнитель, как правило, исключается из проницаемого бетона, но добавление небольшого количества (до 7% от массы крупного заполнителя) увеличивает прочность, плотность и морозостойкость, сохраняя при этом достаточную водопроницающую способность. Использование заполнителей, имеющих высокое водопоглощение или низкую плотность, приводит к снижению морозостойкости бетона [14].

Наиболее часто в проанализированных работах используется известняковый заполнитель [2, 3, 10, 13, 30, 31, 33–35, 38, 45–47, 65], далее по снижению частоты встречаемости в публикациях можно назвать гранит [12, 23, 27, 36, 62, 64, 76, 78], базальт [1, 15, 25, 58], пемзу [22, 30], керамзит [4, 11], бутовый камень [79], диабаз [65], песчаник [59] (рис. 3). Это связано, во-первых, с максимальным использованием местных сырьевых ресурсов. Во-вторых, даже при наличии щебня из прочных магматических либо метаморфических пород предпочтение может отдаваться менее прочным карбонатным породам, что связано с отсутствием необходимости использования щебня

более высоких марок для устройства дорожных покрытий с низкой пропускной способностью.

При отсутствии необходимости получения высокопрочных бетонов довольно часто в состав бетонной смеси для высокопроницаемого бетона в виде заполнителя или его составной части вводятся вторичные продукты и отходы промышленности [80]: отсев дробления бетона [25–27, 62], строительный бой [5, 9, 57], стеклобой [19, 26], резиновая крошка [42, 56, 67], бой керамического кирпича [25], отходы производства пальмового масла [33, 36], шлаковые отходы [14, 16, 40] и т. д. Однако превышение определенных количественных значений вводимых отходов приводит к заметному снижению прочности бетона, что ограничивает их применение.

Исследователями отмечается: несмотря на то что смешивание заполнителей разных фракций улучшает механические свойства, происходит снижение пористости и скорости фильтрации, что негативно сказывается на высокопроницаемом бетоне. Окатанный заполнитель, такой как гравий, галька, создает более плотную упаковку, снижая пористость; лещадный — ориентируясь в одной плоскости во время уплотнения, также увеличивает плотность кроме того, он отрицательно влияет на площадь контакта и монолитизацию вяжущим [6, 9].

Для улучшения физико-механических свойств высокопроницаемого бетона с дренающим эффектом, как и для повышения качества других видов бетонов [81, 82], применяются микроармирующие добавки, такие как базальтовое [1], полипропиленовое [35] и стекловолокно [43, 57], а также наноматериалы — нанокремнезем [21, 55, 56] и наножелезо [31]. Использование наноматериалов позволяет повысить прочность, однако высокая стоимость таких компонентов затрудняет их применение [83].

Активно используются различные функциональные добавки: пластификаторы [2, 10–15, 21, 22, 24, 34–37, 40, 43, 48, 57, 60, 63, 68, 69, 76, 84], увеличива-

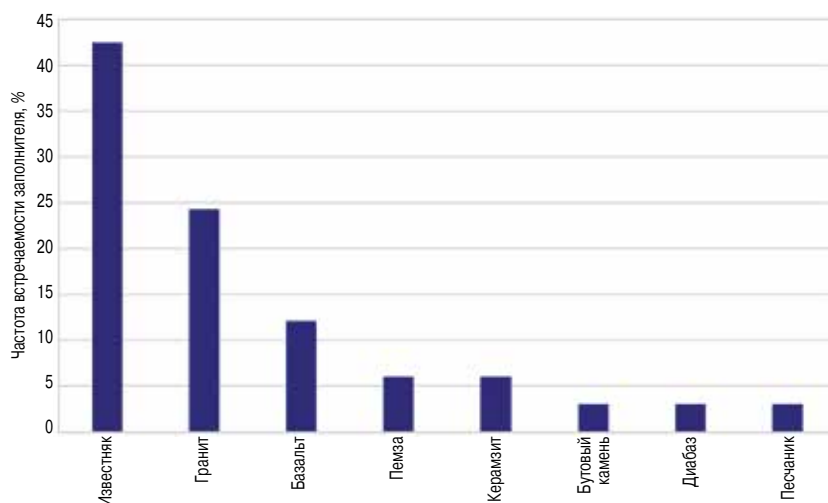


Рис. 3. Частота использования различных видов крупного заполнителя в высокопроницаемых бетонах

Fig. 3. The frequency of use of various types of coarse aggregate in highly permeable concrete

ющие подвижность смеси при неизменном количестве воды; замедлители схватывания [4, 47] для повышения работоспособности смеси за счет снижения скорости гидратации цемента; загустители [20]; водоредуцирующие добавки [3, 4, 20, 31, 45, 55, 75]; модификаторы вязкости для повышения однородности смеси и препятствия истощению цементной пасты и воздухововлекающие добавки для повышения морозостойкости цементной матрицы [37, 45]; абсорбирующие компоненты, которые благоприятно сказываются на адгезионной способности высокопроницаемого бетона, способствуя улучшению влагостойкости смеси и удалению загрязнений, снижая при этом значение pH отфильтрованной жидкости (образец 68, 72) [57, 58].

Необходимо отметить, что в большинстве работ [2, 4, 5, 8, 11, 12, 15, 20, 24, 28, 32, 42, 45, 58–60, 65, 67, 68] говорится об исследовании ряда функциональных свойств дренажного бетона, однако их численные значения в тексте статей не приводятся.

Анализируя эксплуатационные свойства высокопроницаемого бетона, можно сказать, что пористость изделий из такого бетона (рис. 4) варьируется в диапазоне от 12,4 до 38% и зависит от вида заполнителей и способа уплотнения. Средние значения пористости проанализированных образцов:

- для дорожных и тротуарных покрытий – 23,5%;
- для систем фильтрации и дренажных водостоков – 21,4%;
- декоративные бетоны с органическим растительным слоем – 31,4%.

При этом нижние границы средних значений пористости – 15,7%; 14,2%; и 20,9% соответственно, а верхние – 31,4%; 28,5%; 41,9%. В зону средних значений попали 52 образца из 63, в зоне ниже средней оказались пять образцов (номера образцов по таблице: 8, 17, 45, 54, 62), однако значения их пористости незначительно ниже средних.

Прочность при сжатии (рис. 5) колеблется от 5,7 до 73,9 МПа, средние значения прочности образцов – 21,8 МПа. Нижняя граница средних значений прочности:

- для дорожных и тротуарных покрытий – 22,7 МПа;
- для систем фильтрации и дренажных водостоков – 13 МПа;
- декоративные бетоны с органическим растительным слоем – 10,2 МПа.

Верхние границы средних значений прочности – 30,2, 17,3 и 13,7 МПа соответственно. В зону средних значений попало 35 образцов из 64, в зоне ниже средней оказалось 17 образцов. В ряде случаев (номера образцов по таблице: 7, 8, 19, 50, 51, 67) показатели прочности значительно выше остальных.

Цементная паста в проницаемом бетоне представляет собой очень тонкий слой, который связывает частицы крупного заполнителя между собой. При условии применения прочного заполнителя пористый бетон имеет тенденцию разрушаться на границе

раздела цементного камня с заполнителем [85], и это приводит к низкой прочности при сжатии. В связи с этим стремятся повысить адгезию вяжущего к заполнителю, обеспечиваемую гетероэпитаксиальным нарастанием продуктов гидратации цемента на поверхности заполнителя, выступающего в качестве подложки для кристаллизации новообразований [14].

Коэффициент водопроницаемости такого бетона (рис. 6) варьируется от 0,1 до 3,9 см/с. Средние значения проницаемости образцов:

- для дорожных и тротуарных покрытий – 1 см/с;
- для систем фильтрации и дренажных водостоков – 1,7 см/с;
- декоративные бетоны с органическим растительным слоем – 2,8 см/с.

22 образца из 58 относятся к зоне средних значений (от 0,7, 1,1, 1,9 до 1,4, 2,2, 3,9 см/с соответственно), 13 образцов (номера образцов по таблице: 14, 26, 29, 30, 33–36, 55, 63–65, 77) отличаются повышенной дренарующей способностью.

Высокопроницаемые бетоны с дренарующим эффектом независимо от функционального назначения отличаются высокой пористостью, как правило, от 15%, водопроницаемостью – от 0,1 см/с, значительным поглощением шума и температуры окружающей среды за счет пористой структуры материала и его дренарующей способности. Однако одним из негативных факторов, влияющих на эффективность использования подобных бетонов, является деградация материала, вызванная перепадами температур (переходами через нулевую отметку), физическим и биологическим засорением порового пространства, химической и биокоррозией, а также невысокой прочностью.

Обобщая проанализированную информацию с точки зрения различного функционального назначения высокопроницаемых бетонов, можно выделить следующие отличительные особенности по составу, предъявляемым требованиям и эксплуатации.

Проницаемый бетон, применяемый при устройстве тротуаров, имеет более низкую прочность и долговечность по сравнению с другими типами дорожных покрытий из-за наличия высокой пористости, что ограничивает его использование в местах с большой интенсивностью движения [82].

Для бетонов, предназначенных для однослойных или верхних слоев двухслойных дорожных покрытий с интенсивностью движения 200–6000 ед/сут, минимальный требуемый проектный класс бетона по прочности при сжатии – В25 [86], средняя прочность должна быть не ниже 32 МПа; высокопроницаемые бетоны с прочностью ниже нормируемой могут быть применены для тротуарных покрытий с низкой интенсивностью движения (номера образцов по таблице 1–69).

Высокопроницаемые бетоны для систем фильтрации и дренажных водостоков (номера образцов по таблице 70–74) отличаются от иных по функциональному назначению материалов своей более высокой стойкостью к агрессивным воздействиям среды, меньшей прочностью (10–16 МПа) и пористостью

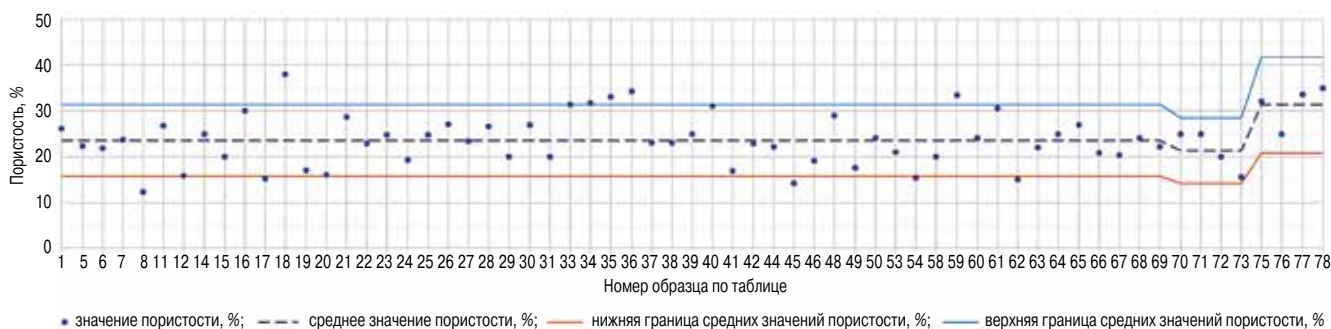


Рис. 4. Пористость образцов высокопроницаемого бетона
Fig. 4. Porosity of highly permeable concrete samples

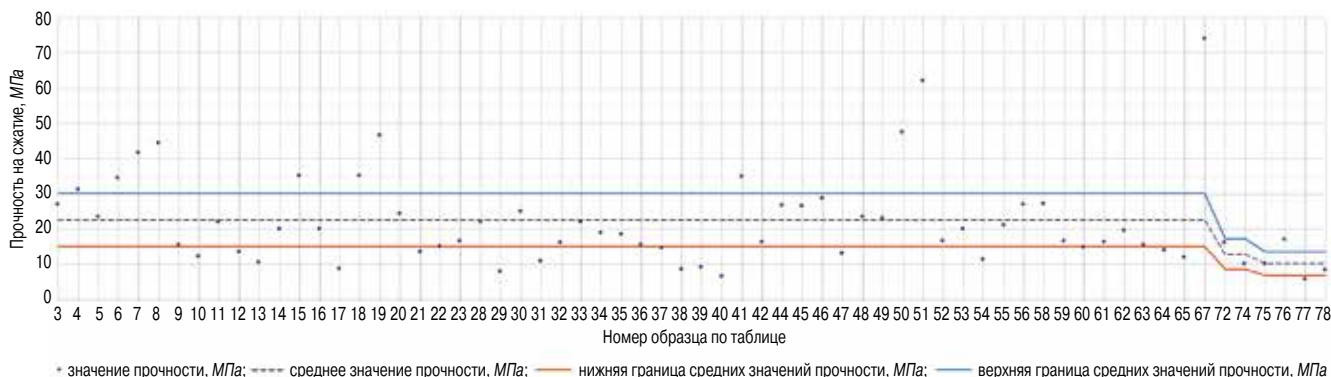


Рис. 5. Прочность образцов высокопроницаемого бетона
Fig. 5. Strength of highly permeable concrete samples



Рис. 6. Коэффициент водопроницаемости образцов высокопроницаемого бетона
Fig. 6. Water permeability coefficient of highly permeable concrete samples

(15,5–25%), но увеличенной фильтрационной способностью по отношению к высокопроницаемым бетонам для дорожных и тротуарных покрытий.

Как правило, дождевая и подземная вода содержит следы тяжелых металлов; проницаемые бетоны для систем фильтрации и дренажных водостоков позволяют воде проходить через толщу материала, поглощая и связывая тяжелые металлы в грунтовых водах.

Одной из наиболее многообещающих альтернатив традиционным фильтрам является пассивная обработка загрязненных вод с использованием высокопроницаемых реактивных барьеров, получаемых из бетонных изделий. Эти барьеры предназначены для удаления растворенных в воде тяжелых металлов и ее кислотного восстановления [11, 12, 57]. Поэтому отдельной технологической задачей является требуемый регулярный уход для восстановления фильтрационной способности.

Так, например, авторами [11] показана возможность применения высокопроницаемых бетонов в качестве реактивного барьера для очистки воды, удаления ионов кадмия и Cd (II) с использованием хелатирующих свойств тиоцианата. Для этого в состав бетонной смеси вводят гранулы золы-уноса, модифицированные 3-тиоцианатпропилтриэтоксисиланом, позволяющие секвестрировать тяжелые металлы через тиоцианатную группу.

Обнаружено, что уровни эффективности удаления Al, Fe, Mn, Co и Ni составляли 75, 98, 99, 94 и 95% соответственно, также высокопроницаемый реактивный барьер позволяет снизить кислотность воды (pH) [12]. Высокая степень кислотного восстановления и удаления металлов проницаемым бетоном объясняется растворением портландита, являющегося его компонентом. Механизм удаления металлов из воды представляет собой осаждение гидроксидов металлов.

Высокопроницаемые бетоны с дренирующим эффектом
Highly permeable concrete with drainage effect

№ п/п	Состав бетона		Соотношение компонентов	Функциональные свойства дренажного бетона	Физико-механические свойства материала	Примечания	Ссылка на источник
	Вид вяжущего	Вид заполнителя					
1. БЕТОНЫ ДЛЯ ДОРОЖНЫХ И ТРОТУАРНЫХ ПОКРЫТИЙ							
1.1. На основе цемента без использования полимерного связующего							
1	Портландцемент $\rho = 3150 \text{ кг/м}^3$	Заполнитель фракция – 5–13 мм $\rho = 2730 \text{ кг/м}^3$	-	В/Ц=0,35 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 253 Заполнитель – 1554 Вода – 88,6	- Постоянная водопроницаемость в насыщенном состоянии с различными значениями гидравлического градиента (метод Японского института бетона (JCI)); - Пористость (П); - Индекс нелинейной водопроницаемости; - Горизонтальная и вертикальная водопроницаемость	Доказана ограниченность закона Дарси применительно к проницаемым бетонам	[8]
2	Портландцемент $R_{сж} = 42,5 \text{ МПа}$	Щебень, Отходы боя керамического кирпича фракция – 5–10 мм $CW_1 = 26\%$ $\rho_{нас} = 1220 \text{ кг/м}^3$ $\rho_{каз} = 2550 \text{ кг/м}^3$	-	В/Ц=0,34 3/Ц=3 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 464 Заполнитель – 1392 Вода – 157,76	- Мембранообразующая способность для измерения толщины цементной пасты, прилипшей к поверхности заполнителя (τ – отношение массы стабильной цементной пасты на поверхности заполнителя к его массе в сухом состоянии), МПЦТ – максимальная толщина цементной пасты); - Связанная пористость методом дренирования (СД/Т 252-2016); - Плотность (ρ); - Кажущаяся ($\rho_{каз}$) и насыпная ($\rho_{нас}$) плотности; - Индекс дробления Бонда (СМТ); - Водопоглощение (W); - Рентгенологическая микрофотография		[9]
3	Портландцемент $\rho = 3085 \text{ кг/м}^3$	Просеянный известняк (карьер Цзяньнин, Китай) фракция – 7,5 мм $\rho_{нас} = 1453 \text{ кг/м}^3$ $\rho_{каз} = 2778 \text{ кг/м}^3$	Суперпластификатор РСА-1 (Subote Company, Китай)	В/Ц=0,375 3/Ц=4	- Химические и физические свойства цемента (стандарт GB175-2007); - Прочность на сжатие ($R_{сж}$); - Водопроницаемость (k); - Кажущаяся плотность		[10]
4	Портландцемент типа II	Известняковый гравий фракция – 8–11,2 мм	Гранулированный доменный шлак (GBFS); Микрокремнезем (SF); Суперпластификатор поликарбоновых кислот (SP) с содержанием твердого вещества 15%	В/Ц=0,22 Содержание компонентов цементной пасты, %: Портландцемент – 60 GBFS – 35 SF – 5 SP – 1,45	- Прочность и водопроницаемость; - Предельное напряжение сдвига и вязкость; - Реологические свойства цементного теста		[13]

№ п/п	Состав бетона			Соотношение компонентов	Функциональные свойства дренажного бетона	Физико-механические свойства материала	Примечания	Ссылка на источник
	Вид вяжущего	Вид заполнителя	Функциональные добавки					
5	Портландцемент типа I	Дробленый доломит (крупный и 1,16-4,75 мм) $\rho_{нас}=1474 \text{ кг/м}^3$; Медный шлак с воздушным охлаждением $\rho_{нас}=2164 \text{ кг/м}^3$	Суперпластификатор из поликарбонилатного эфира $\rho=1130 \text{ кг/м}^3$	V/C=0,3 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 340 Вода – 102 Суперпластификатор – 1,7 Крупный заполнитель: Доломит – 456 Медный шлак – 971 Мелкий заполнитель (доломит) – 340	– Физико-механические свойства медного шлака и доломита (водопоглощение, плотность, твердость по Моосу, величина абразивного износа по Лос-Анджелу, совокунная ударная вязкость); – Химические и минеральные свойства заполнителя; – Прочность на сжатие и изгиб ($R_{вер}$) (стандарт ASTM C496); – Плотность, пористость и водопроницаемость; – Адгезия (А) по методике испытаний, описанной в ASTM C1583	$\rho=2340 \text{ кг/м}^3$ $\Pi=22,42\%$ $k=0,336 \text{ см/с}$ $R_{сжк}=23,45 \text{ МПа}$ $R_{вер}=3,76 \text{ МПа}$ $A=3,01 \text{ МПа}$	–	[14]
6	Портландцемент (класс прочности 42,5)	Базальт фракция – 2,36–4,75 мм 4,75–9,5 мм 9,5–13,2 мм	Микрокремнезем (SF); Суперпластификатор SBT-PPC-I; Зола-уноса класса F (FA)	V/C=0,31 З/C=0,22 Состав бетонной смеси, %: Зола – 20 Заполнитель, %: 9,5–13,2 мм – 45 4,75–9,5 мм – 25 2,36–4,75 мм – 30	– Очищающий эффект; – Пористость; – Коэффициент водопроницаемости (GJJ / T 132-2009); – Щелочное тестирование осадков	$\Pi=21,8\%$ $k=0,67 \text{ см/с}$ $R_{сжк}=34,5 \text{ МПа}$	–	[15]
7	Фосфатно-магнийевый цемент (MPC)	Стальной шлак (SSA) фракция – 5–10 мм $\rho=1750 \text{ кг/м}^3$ $CWf=7,8\%$	Обоженный магний (M); Метакаолин (МК); Дигидрофосфат аммония (P); Бура (B); Диспергатор (D)	SSA/MPC=4,8 V/MPC=0,16 Состав бетонной смеси, %: M – 3 P – 1 МК – 1 B – 0,15 D – 0,15	– Индекс дробления Бонда; Пористость и водопроницаемость; Прочность на сжатие и изгиб	$\Pi=23,8\%$ $k=0,585 \text{ см/с}$ $R_{сжк}$: 1 час=17 МПа 1 сут=34,5 МПа 28 сут=41,5 МПа $R_{вер}=8 \text{ МПа}$	Образцы были получены тремя разными методами: 1) метод формирования с помощью трамбовки (в три слоя, каждый утрамбован 20–30 раз), 2) трамбовка выполняется по спирали, трамбующий стержень должен проникнуть на 20 мм; 3) метод вибрационного формирования; 3) метод гидростатической формовки	[16]

Продолжение таблицы

№ п/п	Состав бетона		Функциональные добавки	Соотношение компонентов	Функциональные свойства дренажного бетона	Физико-механические свойства материала	Примечания	Ссылка на источник
	Вид вяжущего	Вид заполнителя						
8	Портландцемент (класс прочности 42,5)	<p>Базальт фракция – 2,36–4,75 мм, 4,75–9,5 мм, 9,5–13,2 мм</p> <p>$\rho_{\text{каж}}=2465 \text{ кг/м}^3$</p> <p>$\rho_{\text{пл}}=1919 \text{ кг/м}^3$</p>	Базальтовое волокно	<p>$V/\Omega=0,25$</p> <p>$3/\Omega=0,24$</p> <p>Состав бетонной смеси, %:</p> <p>Заполнитель: 9,5–13,2 мм – 10</p> <p>4,75–9,5 мм – 70</p> <p>2,36–4,75 мм – 20</p> <p>Базальтовое волокно – 2</p>	<p>– Водопроницаемость;</p> <p>– Кажущаяся плотность и плотность упаковки ($\rho_{\text{пл}}$);</p> <p>– Прочность и пористость</p>	<p>$\Pi=12,4\%$</p> <p>$k=0,138 \text{ см/с}$</p> <p>$R_{\text{сж}}=7 \text{ сут}=29,2 \text{ МПа}$</p> <p>$28 \text{ сут}=44,3 \text{ МПа}$</p>	–	[1]
9	Портландцемент	<p>Известняковый гравий фракция – 10–25 мм</p> <p>$\rho_{\text{каж}}=2780 \text{ кг/м}^3$</p> <p>$\text{СМЛ}=8,5\%$</p>	<p>Шлак $\rho=2890 \text{ кг/м}^3$;</p> <p>Зола-уноса;</p> <p>Полкирконовый суперпластификатор</p>	<p>Состав бетонной смеси, кг/м^3:</p> <p>Цемент – 216,7</p> <p>Вода – 85,56</p> <p>Заполнитель – 1599,84</p> <p>Зола – 26</p> <p>Доменный шлак – 52</p> <p>Суперпластификатор – 1,45</p>	<p>– Кажущаяся плотность;</p> <p>– Индекс дробления Бонда;</p> <p>– Прочность;</p> <p>– Характер разрушения по численно смоделированной модели</p>	$R_{\text{сж}}=15,5 \text{ МПа}$	–	[69]
10	Портландцемент РС II (OPC)	<p>Гравий фракция – 5–15 мм;</p> <p>Каменный уголь;</p> <p>Песок</p>	<p>Зола-уноса;</p> <p>Водоредуцирующая добавка AE-d</p>	<p>$V/\Omega=0,3$</p> <p>Состав бетонной смеси, кг/м^3:</p> <p>Цемент – 450</p> <p>Вода – 150</p> <p>Гравий – 1080</p> <p>Зола – 50</p> <p>Песок – 250</p> <p>Каменный уголь – 460</p>	<p>– Плотность;</p> <p>– Коэффициент водопоглощения;</p> <p>– Прочность на сжатие методом постоянного давления под напором 10 см</p>	<p>$\rho=2244,8 \text{ кг/м}^3$</p> <p>$k=0,35 \text{ см/с}$</p> <p>$R_{\text{сж}}=12,31 \text{ МПа}$</p>	–	[75]
11	Портландцемент ASTM типа I (OPC) $R_{\text{сж}}=52,5 \text{ МПа}$	<p>Стеклобой фракция – 2,36–5 мм;</p> <p>Отходы строительства и сноса зданий фракция – 5–10 мм</p> <p>$\rho_{\text{нес}}=1335 \text{ кг/м}^3$</p>	<p>Микрокремнезем (SF)</p>	<p>$V/\Omega=0,4$</p> <p>Состав бетонной смеси, кг/м^3:</p> <p>Цемент – 272</p> <p>SF – 30</p> <p>Стеклобой – 755</p> <p>Отходы строительства и сноса зданий – 755</p>	<p>– Водопроницаемость и водопоглощение (JIS A 5371-2016);</p> <p>– Теплопроводность (λ);</p> <p>– Плотность, прочность и пористость;</p> <p>– Распределение пор по двумерным изображениям плоских срезов проницаемого бетона</p>	<p>$\rho=1932 \text{ кг/м}^3$</p> <p>$\Pi=26,8\%$</p> <p>$k=0,12 \text{ см/с}$</p> <p>$R_{\text{сж}}=22 \text{ МПа}$</p> <p>$W=3,13\%$</p> <p>$\lambda=0,63 \text{ Вт/мК}$</p> <p>Распределение пор=2,066 мм</p>	Сборные проницаемые блоки для пешеходов	[19]
12	Портландцемент типа I (OPC)	<p>Заполнитель фракция – до 10 мм</p> <p>$W=0,46\%$</p> <p>$\rho=2560 \text{ кг/м}^3$</p>	<p>Зола-уноса (FA) класса F содержанием SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 – более 70%;</p> <p>Суперпластификатор (SP);</p> <p>Нанокремнезем (NS)</p>	<p>$V/\Omega=0,3$</p> <p>$\Omega/3=0,466$</p> <p>Состав бетонной смеси, кг/м^3:</p> <p>Цемент – 250</p> <p>FA – 224,78</p> <p>NS – 11,416</p> <p>Заполнитель – 1672</p> <p>SP – 6</p> <p>Вода – 142,43</p>	<p>– Подвижность цементной пасты (ASTM C230-03);</p> <p>– Сроки схватывания;</p> <p>– Микроструктура цементного камня;</p> <p>– Прочность и пористость;</p> <p>– Коэффициент водопоглощения (по Янгу и Цзяну);</p> <p>– Скорость фильтрации (k_f) по ASTM C1701-09</p>	<p>$\Pi=15,96\%$</p> <p>$k=0,435 \text{ см/с}$</p> <p>$R_{\text{сж}}=13,5 \text{ МПа}$</p> <p>$k_f=1,265 \cdot 10^5 \text{ м/сут}$</p> <p>Совокупный объем пор=213 $\text{мм}^3/\text{г}$</p> <p>Расплав – 180 мм</p> <p>Конец схватывания – 240 мин</p>	–	[21]

№ п/п	Состав бетона			Соотношение компонентов	Функциональные свойства дренажного бетона	Физико-механические свойства материала	Примечания	Ссылка на источник
	Вид вяжущего	Вид заполнителя	Функциональные добавки					
13	Портландцемент	Пемза фракция – 2,5 мм	Суперпластификатор на основе поликарбоновых кислот; Микрокремнезем	Состав бетонной смеси, %: Цемент – 1 Микрокремнезем – 0,5 Пемза – 2,5 Суперпластификатор – 0,036 Вода – 0,22	– Коэффициент водонепроницаемости; – Прочность	$k=0,5$ см/с $R_{сж}=10,42$ МПа	–	[22]
14	Портландцемент	Заполнитель фракция – 4,8–9,5 мм	Суперпластификатор	$З/Ц=4,76$ $В/Ц=0,3$ Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 341,37 Заполнитель – 1507,73	– Сопротивление скольжению по Британскому маятниковому тесту; – Звукопоглощение (АС); – Прочность на сжатие и изгиб; – Пористость и водонепроницаемость; – Коэффициент Альбеда (эфф. эффект изменения температуры Urban Heat Island)	$\Gamma=25\%$ $k=1,74$ см/с $R_{сж}=20$ МПа $R_{изг}=2$ МПа $АС=0,4$ Коэффициент Альбеда=0,29	–	[60]
15	Цемент	Заполнитель фракция – 4,75 мм	Микрокремнезем; Нанокремнезем; Водоредуцирующая добавка	$В/Ц=0,2$ $З/Ц=4,5$ Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 320 Заполнитель – 1440 Вода – 64 Микрокремнезем – 80 Нанокремнезем – 80 Водоредуцирующая добавка – 11,52	– Прочность на сжатие и изгиб; – Пористость, плотность и водонепроницаемость	$\rho=1800$ кг/м ³ $\Gamma=20\%$ $k=1,32$ см/с $R_{сж}=35$ МПа $R_{изг}=3,8$ МПа	–	[55]
16	Портландцемент $R_{сж}=42,5$ МПа	Гранитный гравий фракция – 5–10 мм	–	$В/Ц=0,35$ Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 149 Заполнитель – 1917 Вода – 55	– Прочность на сжатие и изгиб; – Пористость	$\Gamma=30\%$ $R_{сж}=19,97$ МПа $R_{изг}=1,93$ МПа	–	[23]
17	Портландцемент типа I (OPC)	Заполнитель фракция – 10 мм $\rho=2560$ кг/м ³ . Резиновая крошка фракция – 0,425–4,75 мм	Зола-уноса класса F (FA); Нанокремнезем (NS)	$В/Ц=0,3$ $Ц/З=0,382$ Состав бетонной смеси, кг/м ³ : FA – 90 NS – 6 Цемент – 210 Вода – 91,8 Резиновая крошка – 20,83 Крупный заполнитель – 1041,36	– Водонепроницаемость в соответствии с требованием ASTM 230-03; – Прочность на сжатие и пористость	$\Gamma=15,25\%$ $k=0,344$ см/с $R_{сж}=8,81$ МПа	–	[56]

Продолжение таблицы

№ п/п	Состав бетона			Соотношение компонентов	Функциональные свойства дренажного бетона	Физико-механические свойства материала	Примечания	Ссылка на источник
	Вид вяжущего	Вид заполнителя	Функциональные добавки					
18	Цемент	Щебень (бутовый камень) фракция – 20–40 мм $\rho = 2160 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{нас}} = 1450 \text{ кг/м}^3$, Кварцевый песок $\rho = 2605 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{нас}} = 1310 \text{ кг/м}^3$	Уксусно-кислый натрий (УКН); Комплексная модифицирующая добавка (ЦМИД-4)	$V/C = 0,41$ Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 355 Заполнитель: Щебень – 1266 Песок – 443 Вода – 147 УКН – 7 ЦМИД-4 – 20	– Прочность на сжатие и изгиб; – Пористость и плотность	$\rho = 2238 \text{ кг/м}^3$ $P = 38\%$ $R_{\text{сжк}} = 35 \text{ МПа}$ $R_{\text{нат}} = 1,93 \text{ МПа}$	–	[79]
19	Портландцемент	Доломит фракция – 4,75–9,5 мм; Карьерный песок	Микрокремнезем; Суперпластификатор	$V/C = 0,25$ Состав бетонной смеси, %: Песок – 18 Вода – 0,36 Заполнитель – 4 Микрокремнезем – 7 Суперпластификатор – 0,8	– Прочность на сжатие, плотность, пористость	$\rho = 2240 \text{ кг/м}^3$ $P = 17,02\%$ $R_{\text{сжк}} = 46,5 \text{ МПа}$	–	[63]
20	Портландцемент	Доломит фракция – 4,75–9,5 мм	Микрокремнезем (SF) (Microsilica 920-ч); Гиперпластификатор на карбоксилеом эфирном полимере (SP)	$V/C = 0,38$ Состав бетонной смеси, %: SF – 7 SP – 0,8	– Плотность; – Прочность на сжатие; – Пористость и водопроницаемость	$\rho = 2079 \text{ кг/м}^3$ $P = 16\%$ $k = 1,264 \text{ см/с}$ $R_{\text{сжк}}$ 7 сут – 22 МПа 28 сут – 24,3 МПа	–	[48]
21			Зола-уноса класса F (теплоэлектростанция Меттур, Тамилнад) размер частиц – 70–90 мкм; Суперпластификатор на основе PCE	$V/C = 0,3$ $3/C = 4,4$ Зола-уноса – 20% от массы цемента/ Метаколин/UFGBFS – 10% от массы цемента Суперпластификатор – 0,167% от массы цемента	– Истираемость на абразивном станке Лос-Анджелеса без стальных шариков; – Прочность на сжатие; – Пористость и водопроницаемость; – Сульфатостойкость	$\rho = 2017,33 \text{ кг/м}^3$ $P = 28,66\%$ $k = 1,19 \text{ см/с}$ $R_{\text{сжк}} = 13,42 \text{ МПа}$		
22	Портландцемент 53 (MAHA GOLD)	Заполнитель (карьер Маджукарае, Тамилнад, Индия) фракция – 12,5–20 мм $\rho = 2680 \text{ кг/м}^3$ $\rho_{\text{нас}} = 1900 \text{ кг/м}^3$	Метаколин; Суперпластификатор на основе PCE			$\rho = 2103,15 \text{ кг/м}^3$ $P = 22,92\%$ $k = 0,81 \text{ см/с}$ $R_{\text{сжк}} = 15,1 \text{ МПа}$		[24]
23			Измельченный гранулированный доменный шлак (UFGBFS) размер частиц – 4–6 мкм; Суперпластификатор на основе PCE			$\rho = 1931,25 \text{ кг/м}^3$ $P = 24,84\%$ $k = 1,05 \text{ см/с}$ $R_{\text{сжк}} = 16,63 \text{ МПа}$		

№ п/п	Состав бетона			Соотношение компонентов	Функциональные свойства дренажного бетона	Физико-механические свойства материала	Примечания	Ссылка на источник
	Вид вяжущего	Вид заполнителя	Функциональные добавки					
24	Портландцемент СР II-F-32	Базальт фракция – до 9,5 мм	-	В/Ц=0,34 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 420 Заполнитель – 1367 Вода – 143	- Содержание порошкообразного материала в соответствии с требованиями бразильских стандартов NBR NM 46/2003; - Пористость; - Водопроницаемость по NBR NM 53/2003	П=19,3% k=0,497 см/с		[25]
25		Доменный шлак фракция – до 9,5 мм						
26		Отходы боя керамического кирпича фракция – до 9,5 мм						
27		Отсев дробления бетона фракция – до 9,5 мм						
28	Портландцемент ASTM типа I (OPC, 52.5)	Стеклобой фракция – 2,36–5 мм; Отсев дробления бетона фракция – 5–10 мм	Микрокремнезем (SF)	В/Ц=0,4 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 272 Стеклобой – 755 Отсев дробления бетона – 755 SF – 30	- Прочность на сжатие; - Плотность, пористость и водопроницаемость; - Теплопроводность;	ρ=1930 кг/м ³ П=26,7% k=1,2 см/с R _{сж} =22 МПа λ=0,61 Вт/мК	Метод сухого смешивания	[26]
29	Портландцемент ρ=3130 кг/м ³	Отходы строительного боя, Гранит фракция – 4,5–9,5 мм	-	Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 359 Гранит – 780 Строительный бой – 593 Вода – 125	- Коэффициент хрупкости и модуль упругости; - Сопротивление скольжению (R); - Истираемость; - Пористость и водопроницаемость; - Прочность на сжатие и изгиб	П=20% k=1,71 см/с R _{сж} =7,8 МПа R _{изг} =2,2 МПа Коэффициент хрупкости – 4,5 Модуль упругости – 11,8 ГПа R=90 BPN Износ – 54,48%	-	[27]
30	Портландцемент, СЕМ II / А-М (S-V) 42,5 N	Доломит GC 85/15 фракция – 8–16 мм; Песок GF85 (река Драва) фракция – 0–2 мм	-	В/Ц=0,33 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 300 Вода – 99 Заполнитель – 1783,7 Пропорции заполнителя, %: GC 85/15 – 90 GF85 – 10	- Пористость (двумерные рентгеновские изображения с помощью компьютерной рентгеновской микромографии); - Плотность; - Водопроницаемость; - Прочность на сжатие и изгиб	ρ=1948 кг/м ³ П=27% k=2,16 см/с R _{сж} =25,04 МПа R _{изг} =2,41 МПа	-	[29]

Продолжение таблицы

№ п/п	Состав бетона			Соотношение компонентов	Функциональные свойства дренажного бетона	Физико-механические свойства материала	Примечания	Ссылка на источник
	Вид вяжущего	Вид заполнителя	Функциональные добавки					
31	Портландцемент (СЕМ I 42,5R) $\rho=3150 \text{ кг/м}^3$	Известняк, Пемза фракция – 10–12 мм	–	$V/U=0,3$ Состав бетонной смеси, кг/м^3 : Цемент – 420 Вода – 126 Известняк – 1344 Пемза – 125,5	– Плотность, пористость и водопроницаемость; – Прочность на сжатие, растяжение ($R_{\text{раст}}$) и изгиб ($R_{\text{изг}}$)	$\rho=1630 \text{ кг/м}^3$ $\Pi=20\%$ $k=0,5 \text{ см/с}$ $R_{\text{сж}}=11 \text{ МПа}$ $R_{\text{раст}}=1,35 \text{ МПа}$ $R_{\text{изг}}=2 \text{ МПа}$	–	[30]
32	Портландцемент (тип IP и GU)	Известняковый гравий фракция – 4,75–12,5 мм	Зола-уноса (FA); Наноเหล็ก; Водоредуцирующая добавка (WR)	$3/U=4$ Состав бетонной смеси, кг/м^3 : Цемент – 295 Вода – 156 FA – 175 Наноเหล็ก – 30 WR – 6 Заполнитель – 2000	– Прочность на сжатие; – Водопроницаемость; – Качество пропускаемой воды (показатель pH, показатель мутности)	$k=0,94 \text{ см/с}$ $R_{\text{сж}}=16,2 \text{ МПа}$ $\rho\text{H}=7$ Показатель мутности – 1	–	[31]
33	Портландцемент (OPC) СЕМ I 52,5 R	Заполнитель фракция – 2–6,3 мм $\rho=2716 \text{ кг/м}^3$, Мелкий заполнитель – аллювиальный кварцевый песок – 0,4 мм	Хлорид-ионы	Состав бетонной смеси, кг/м^3 : Цемент – 301 Вода – 111 Песок – 110 Заполнитель – 1574 Хлорид-ионы – 0,05%	– Морозостойкость; – Истираемость; – Водопроницаемость; – Пористость и плотность; – Прочность на сжатие; – Выщелачивание и засорение	$\rho=1930 \text{ кг/м}^3$ $\Pi=31,4\%$ $k=2,25 \text{ см/с}$ $R_{\text{сж}}=22 \text{ МПа}$	–	[32]
34						$\rho=1925 \text{ кг/м}^3$ $\Pi=31,7\%$ $k=2,25 \text{ см/с}$ $R_{\text{сж}}=19 \text{ МПа}$		
35		Заполнитель фракция – 2–6,3 мм $\rho=2716 \text{ кг/м}^3$, Мелкий заполнитель – аллювиальный песок 0,4 мм; Ракушка CRericula (CR)/ SCallor (SC)/ Королевский грешок (QS) фракция – 2–4 мм		Состав бетонной смеси, кг/м^3 : Цемент – 301 Вода – 111 Песок – 110 Заполнитель – 630 Хлорид-ионы, % – 0,34/0,22/0,27 Ракушка – 945		$\rho=1860 \text{ кг/м}^3$ $\Pi=33,1\%$ $k=3 \text{ см/с}$ $R_{\text{сж}}=18,5 \text{ МПа}$		
36						$\rho=1810 \text{ кг/м}^3$ $\Pi=34,3\%$ $k=3,4 \text{ см/с}$ $R_{\text{сж}}=15,5 \text{ МПа}$		

№ п/п	Состав бетона			Соотношение компонентов	Функциональные свойства дренажного бетона	Физико-механические свойства материала	Примечания	Ссылка на источник
	Вид вяжущего	Вид заполнителя	Функциональные добавки					
37	Портландцемент (ОРС) типа I	Известняк фракция – 6,3–9,5 мм; Песок	-	V/C=0,32 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Вода – 108,6 Цемент – 339,5 Заполнитель: Известняк – 1459,8 Песок – 146	-	ρ=1890 кг/м ³ Π=23% k=0,59 см/с R _{сжк} : 7 сут – 11,5 МПа 28 сут – 14,5 МПа	-	[33]
		Известняк фракция – 6,3–9,5 мм; Отходы производства пальмового масла (ОППМ) фракция – 4,75–6,3 мм; Песок		V/C=0,32 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Вода – 108,6 Цемент – 339,5 Заполнитель: Известняк – 729,9 ОППМ (4,75–6,3 мм) – 315,3 Песок – 146				
38	Портландцемент (ОРС) типа I	Известняк фракция – 6,3–9,5 мм; Отходы производства пальмового масла (ОППМ) фракция – 4,75–6,3 мм и 6,3–9,5 мм; Песок	-	V/C=0,32 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Вода – 108,6 Цемент – 339,5 Заполнитель: Известняк – 729,9 ОППМ (4,75–6,3 мм) – 157,6 ОППМ (6,3–9,5 мм) – 157,6 Песок – 146	-	ρ=1540 кг/м ³ Π=25% k=0,82 см/с R _{сжк} : 7 сут – 6 МПа 28 сут – 9,1 МПа	-	[36]
39	Портландцемент (ОРС) типа I	Гранит фракция – 4,75–9,5 мм ρ=2720 кг/м ³ ρ _{нас} =1294 кг/м ³ , Отходы производства пальмового масла (ОППМ) фракция – 4,75–9,5 мм ρ=1880 кг/м ³ ρ _{нас} =732 кг/м ³	-	V/C=0,3 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 400 Гранит – 958 ОППМ – 662,14	-	ρ=1436 кг/м ³ Π=31% k=0,55 см/с R _{сжк} : 7 сут – 5 МПа 28 сут – 6,6 МПа	-	[36]
40	Цемент	Гравий фракция – до 10 мм	Поликарбосилатный суперпластификатор типа I (SP); Модификатор вязкости типа S (VMA)	V/C=0,3 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 370 Гравий – 1398 Вода – 111 SP – 3,7 VMA – 0,96	-	Π=16,9% k=0,24 см/с R _{сжк} =34,9 МПа R _{нат} =3,04 МПа Потеря массы – 1,3 г	-	[37]

Продолжение таблицы

№ п/п	Состав бетона			Соотношение компонентов	Функциональные свойства дренажного бетона	Физико-механические свойства материала	Примечания	Ссылка на источник
	Вид вяжущего	Вид заполнителя	Функциональные добавки					
42	Портландцемент	Известняк (Хейс, штат Техас) фракция – 6,35 мм	-	V/D=0,33 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 350 Заполнитель – 1459,6 Вода – 117,2	- Пористость и водопроницаемость; - Прочность на сжатие и изгиб; - Толщина цементной пасты	П=22,89% k=0,72 см/с R _{сж} =16,4 МПа R _{изг} =2,88 МПа Толщина цементной пасты – 4,76 мм	-	[38]
43		Доломит фракция – 0–4 мм, 4–8 мм, 8–16 мм	Суперпластификатор (SP)	V/D=0,33 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 350 Вода – 115,5 SP – 3,5 Заполнитель: Доломит (0–4 мм) – 813,6 Доломит (4–8 мм) – 610,2 Доломит (8–16 мм) – 610,2		ρ=2442,4 кг/м ³ П=6,3% R _{сж} =69,5 МПа R _{изг} =9,7 МПа		
44	Портландцемент, CEM II / A-M (S-V) 42,5 N	Доломит фракция – 4–8 мм, 8–16 мм; Песок (река Драва) фракция – 0–2 мм	-	Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 300 Вода – 99 Заполнитель: Песок (0–2 мм) – 178,4 Доломит (4–8 мм) – 535,1 Доломит (8–16 мм) – 1070,2	- Пористость и плотность; - Прочность на сжатие и изгиб	ρ=2076,6 кг/м ³ П=22,2% R _{сж} =26,6 МПа R _{изг} =4 МПа	-	[40]
45		Стальной шлак фракция – 4–8 мм, 8–16 мм; Песок (река Драва) фракция – 0–2 мм	-	Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 300 Вода – 99 Заполнитель: Песок (0–2 мм) – 205,3 Шлак (4–8 мм) – 1232 Шлак (8–16 мм) – 616		ρ=2435,4 кг/м ³ П=14,24% R _{сж} =26,5 МПа R _{изг} =4 МПа		
46	Цемент	Гравий; Песок	-	V/D=0,37 3/D=4,52 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 335 Гравий – 1515 Песок – 106 Вода – 124	- Водопроницаемость, пористость и плотность; - Прочность на сжатие и изгиб; - Истираемость (G) и морозостойкость по NF EN 1338; - Сопротивление скольжению (угол трения)	ρ=1979 кг/м ³ П=19,2% k=1,1 см/с R _{сж} =28,6 МПа R _{изг} =4 МПа G=28,9 мм Угол трения – 89°	-	[41]

№ п/п	Состав бетона			Соотношение компонентов	Функциональные свойства дренажного бетона	Физико-механические свойства материала	Примечания	Ссылка на источник
	Вид вяжущего	Вид заполнителя	Функциональные добавки					
47	Портландцемент СЕМ I 42,5 R	Заполнитель фракция – 10–12,5 мм; Резиновая крошка фракция – 4 мм	–	V/C=0,27 З/Ц=4,1 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 450 Заполнитель – 1275,2 Резиновая крошка – 97,3 Вода – 121,5	– Водопроницаемость; – Прочность на сжатие и растяжение; – Истираемость; – Морозостойкость (процентная потеря массы бетона после 300 циклов замораживания-оттаивания)	k=0,46 см/с R _{сж} =13,1 МПа R _{раст} =1,5 МПа Потеря массы – 4,1% Сопротивление истиранию – 0,2%	–	[42]
48	Портландцемент типа II	Гравий фракция – 2,36–19 мм; Песок фракция – 4,75 мм	Рисовая шелуха (RNA); Суперпластификатор (SP) карбонового эфира (Glenium-110P, BASF); Стекловолокно	V/C=0,4 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 299,2 Гравий – 1395 Песок – 105 RNA – 40,8 SP – 4 Вода – 135 Стекловолокно – 0,2% от объема бетонной смеси	– Водопроницаемость; – Пористость; – Прочность на сжатие, растяжение и изгиб	П=29% k=0,47 см/с R _{сж} =23,5 МПа R _{раст} =3 МПа R _{изг} =4 МПа	Микроармирование стекловолокном	[43]
49	Портландцемент (OPC) СЕМ I 42,5 N	Заполнитель фракция – 20 мм	–	V/C=0,34 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 383 Заполнитель – 1300 Вода – 130	– Плотность; – Пористость и водопроницаемость; – Прочность на сжатие	ρ=2183 кг/м ³ П=17,6% k=0,3 см/с R _{сж} : 7 сут – 18,1 МПа 28 сут – 23,1 МПа	–	[44]
50	Портландцемент типа I	Известняк; Мелкий заполнитель	Латекс; Водоредуцирующая добавка (HRWR); Воздухововлекающая добавка (AEA); Модификатор вязкости (VMA)	Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 360 Известняк – 1440 Мелкий заполнитель – 100 Вода – 95 Латекс – 36 HRWR – 940 мл AEA – 690 мл VMA – 500 мл	– Водопроницаемость и пористость; – Прочность на сжатие и изгиб; – Морозостойкость по ASTM C666; – Истираемость по ASTM C 131	П=24% k=0,2 см/с R _{сж} =47,5 МПа R _{изг} =2,3 МПа Износ – 15%	–	[45]
51	Портландцемент типа I	Заполнитель фракция – 3–8 мм, 8–15 мм ρ=2680 кг/м ³ , Песок ρ=2540 кг/м ³	Суперпластификатор (SP)	V/C=0,44 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 335 Заполнитель: 3–8 мм – 480 8–15 мм – 720 Песок – 618 SP – 2,45 Вода – 95	– Прочность на сжатие	R _{сж} =62,1 МПа	–	[84]

Продолжение таблицы

№ п/п	Состав бетона		Соотношение компонентов	Функциональные свойства дренажного бетона	Физико-механические свойства материала	Примечания	Ссылка на источник
	Вид вяжущего	Вид заполнителя					
52	Портландцемент РО 32,5	Известняк, Диабаз фракция – 2,36–26,5 мм	V/D=0,41 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 145 FA – 36 Заполнитель – 1625 Вода – 82	– Прочность на сжатие; – Истираемость (DL / T5150-2001); – Усадка	R _{сжк} : 7 сут – 9 МПа 28 сут – 16,5 МПа Износ – 18%	–	[65]
53	Портландцемент	Заполнитель фракция – 5–13 мм	V/D=0,3 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 370 Заполнитель – 1398 Вода – 111 P – 0,96 SP – 3,7	– Водопроницаемость и пористость; – Прочность на сжатие и изгиб; – Усадка (JIS A 1150); – Кажущаяся плотность и индекс уплотнения	П=21% k=1,4 см/с R _{сжк} =20 МПа R _{изг} =4 МПа	–	[68]
54	Портландцемент типа I ЦЕМ I 42,5Н	Гранитный щебень фракция – до 10 мм	Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 220 Зола – 60 Заполнитель – 1230 Суперпластификатор (MELFLUX 5581) 29% Вода – 90	– Коэффициент водопроницаемости; – Пористость; – Прочность на сжатие	П=15,4% k=0,48 см/с R _{сжк} =11,3 МПа	–	[76]
55	Цемент	Гранитный щебень фракция – 5–20 мм	Ц/З=1/5	– Коэффициент водопроницаемости; – Прочность на сжатие	k=1,5 см/с R _{сжк} =21 МПа	–	[78]
56	Пуцолановый портландцемент класса OPC-53	Заполнитель фракция – 12,5–6 мм	Состав бетонной смеси, %: Цемент – 1 Вода – 0,36 Заполнитель – 4	– Водопроницаемость; – Прочность на сжатие и изгиб	k=0,69 см/с R _{сжк} : 7 сут – 18,7 МПа 21 сут – 24,9 МПа 28 сут – 26,9 МПа R _{изг} =3,5 МПа	–	[61]
1.2. На основе цемента с использованием полимерного связующего							
57	Портландцемент R _{сжк} = 42,5 МПа 10% эмульсия силанового полимера	Щебень, Отходы боя керамического кирпича фракция – 5–10 мм CWI=24,1% ρ _{нec} = 1230 кг/м ³ ρ _{каж} =2540 кг/м ³	V/D=0,34 З/Ц=3,0 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 464 Заполнитель – 1392 Вода – 157,76	– Плотность; – Мембранообразующая способность для измерения толщины цементной пасты, прилипшей к поверхности заполнителя (Т – отношение массы стабильной цементной пасты на поверхности RA к массе RA в сухом состоянии); МПЦТ – максимальная толщина цементной пасты); – Связанная пористость методом дренирования (СД/Т 252-2016); – Кажущаяся плотность; – Индекс дробления Бонда; – Водопоглощение методом постоянного напора по СД/Т 135-2009; – Рентгенологическая микрофотография	ρ = 1430 кг/м ³ W = 2,25% T = 0,154 МПЦТ = 0,16 мм	Погружение заполнителя в 10% раствор эмульсии силанового полимера для образования на поверхности заполнителя гидрофобных силиконовых мембран, действующих как щелочные субстраты; извлечение заполнителя и его сушка с последующим смешиванием остальных компонентов смеси	[9]

№ п/п	Состав бетона			Соотношение компонентов	Функциональные свойства дренажного бетона	Физико-механические свойства материала	Примечания	Ссылка на источник
	Вид вяжущего	Вид заполнителя	Функциональные добавки					
58	Цемент (СЕМ 132.5 R) Полимерная эмульсия	Заполнитель фракция – 4–8 мм	–	V/Ц=0,26 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 300 Вода – 78 Полимерная эмульсия – 20% от массы цемента	– Пористость; – Прочность на сжатие и изгиб	П=20% R _{сжк} =27,1 МПа R _{изг} =5,8 МПа	–	[54]
59	Портландцемент типа I (OPC) Стирол-бутадиеновый латекс	Дробленый гравий фракция – 16–19,5 мм; Песок	Водоредуцирующая добавка; Загуститель	V/Ц=0,34 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 400 Заполнитель: Мелкий – 224 Крупный – 1692 Латекс – до 7% от бетонной смеси	– Водопроницаемость и пористость; – Прочность на изгиб трехточечным методом (ASTM C 78); – Прочность на разрыв при растяжении (ASTM C 496); – Истираемость после 28 сут отверждения (IS: 2386 часть – 4)	П=33,46% k=0,876 см/с R _{сжк} : 7 сут – 11,6 МПа 28 сут – 16,5 МПа 56 сут – 23,57 МПа Износ – 4,96%	–	[20]
60	Портландцемент Редиспергируемый полимерный порошок (RPP) на основе стирол-бутадиенового каучука (SBR)	Дробленый гранит фракция – 5–20 мм; Отсев дробления бетона фракция – 5–22 мм	–	V/Ц=0,3 Полимер/Ц=0,5 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 260 Вода – 78 Заполнитель – 1542 Полимер – 130	– Пористость; – Коэффициент водопроницаемости; – Прочности на изгиб (JIS A 1106)	П=24% k=0,31 см/с R _{сжк} =14,8 МПа	–	[62]
61	Портландцемент (тип P.O. 42,5, Китай) Полимер (смесь акриловой и поликарбоневой эмульсий (Хэбэй, Китай))	Известняк фракция – 27,5 мм, 32,5 мм, 37,5 мм	Суперпластификатор на основе поликарбосилата	V/Ц=0,32 З/Ц=6 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 274 Вода – 87,69 Заполнитель – 1644 Полимер – 8,77	– Пористость; – Прочность на сжатие и изгиб	П=30,6% R _{сжк} =16,4 МПа R _{изг} =1,6 МПа	–	[34]
62	Цемент Эмульсия этилвинилацетата (EVA) на водной основе	Известняк фракция – 4,75–12,5 мм; Речной песок	Полипропиленовое (PP) моноволокно; Воздухововлекающая добавка (AEA); Суперпластификатор (SP)	V/Ц=0,25 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 350 Вода – 70 Заполнитель – 1433 Песок – 86 AEA – 0,035 EVA – 42 PP – 0,7 SP – 0,88	– Эффективная пористость методом вакуумной герметизации (ASTM D7063); – Прочность на сжатие и изгиб; – Морозостойкость по GB / T 50082-2009 (коэффициент прочности (k _R))	П=15% R _{сжк} : 7 сут – 12 МПа 14 сут – 16,8 МПа 28 сут – 19,5 МПа R _{изг} =1,9 МПа k _R =50%	–	[35]

Продолжение таблицы

№ п/п	Состав бетона			Соотношение компонентов	Функциональные свойства дренажного бетона	Физико-механические свойства материала	Примечания	Ссылка на источник
	Вид вяжущего	Вид заполнителя	Функциональные добавки					
63	Цемент	Гранит фракция – 5–20 мм;	-	V/C=0,3 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 283 Латекс – 14 Вода – 85 Заполнитель – 1620	– Пористость; – Водопроницаемость; – Прочность на сжатие и изгиб	Π=22% k=2,5 см/с R _{сж} =15,5 МПа R _{изг} =3,8 МПа	-	[64]
	Латексная эмульсия							
64	Цемент	Отходы строительного боя фракция – 5–22 мм	-	V/C=0,3 Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 260 RPP – 13 Вода – 78 Заполнитель – 1542	– Пористость; – Водопроницаемость; – Прочность на сжатие и изгиб	Π=25% k=3,1 см/с R _{сж} =14 МПа R _{изг} =3,2 МПа	-	[64]
	Редиспергируемый полимерный порошок (RPP) на основе стирол-бутадиенового каучука (SBR)							
65	Портландцемент типа I	Известняк фракция – 9,5 мм; Песок (река Теннесси)	-	Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 306,9 Латекс – 30,7 Вода – 91,3 Заполнитель – 1381,2 Песок – 96,7	– Пористость; – Водопроницаемость; – Прочность на сжатие и изгиб	Π=27% k=1,5 см/с R _{сж} =12,1 МПа R _{изг} =1,5 МПа	-	[46]
	Латекс стирол-бутадиенового каучука (SBR)							
66	Портландцемент (P.O 42,5) (Huaxin Cement Company Ltd.)	Крупный заполнитель фракция – 2,36–4,75 мм; Мелкий заполнитель фракция – 2,36–4,75 мм; Резиновый заполнитель: А – 1,18–4,75 мм; В – 0,6–2,36 мм	-	Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 300 Латекс – 96 Вода – 48 Заполнитель: крупный – 1476 мелкий – 200–140 Коэффициент замены заполнителя по объему, %: А – 18 В – 0–30	– Пористость; – Водопроницаемость; – Истираемость; – Ударопрочность; – Микроструктура резинобетона	Π=20,8% k=0,612 см/с	-	[67]
	Стирол-бутадиеновый латекс SD623 (Shanghai BASF Dispersions Co. Ltd.)							
1.3. На основе полимерного или органополимерного связующего								
67	Полиэфирная смола	Заполнитель фракция – 4,75–9,5 мм ρ=3150 кг/м ³	-	Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Полимер – 251 Заполнитель – 1570	– Водопроницаемость и пористость; – Морозостойкость (прочность на сжатие после 50 циклов замораживания-оттаивания, снижение прочности); – Прочность на сжатие	Π=20,4% k=0,89 см/с R _{сж} =79,3 МПа R _{сж} после 50 цикл. зам.-отт.=78,2 МПа Снижение прочности=1%	-	[17]
	Заполнитель							

№ п/п	Состав бетона			Соотношение компонентов	Функциональные свойства дренажного бетона	Физико-механические свойства материала	Примечания	Ссылка на источник
	Вид вяжущего	Вид заполнителя	Функциональные добавки					
68	Модифицированное стирол-бутадиен-стиролом асфальтовое вяжущее (SBS) $\rho=1320 \text{ кг/м}^3$	Базальт Фракция – < 16 мм $\rho=1284 \text{ кг/м}^3$	Известняковый минеральный порошок (LF) $\rho=2699 \text{ кг/м}^3$; Активированный уголь, размер частиц – 0,074 мм $\rho=1702 \text{ кг/м}^3$	Модифицированное асфальтовое вяжущее – 5,64% от массы заполнителя Наполнитель – 4% от массы заполнителя (минеральный порошок – 30%, активированный уголь – 70%)	<ul style="list-style-type: none"> – Качество воды стока по шести индикаторам, включая физико-химические показатели (содержание взвешенных веществ, мутность и значение pH), индекс загрязнения тяжелыми металлами (Zn и Pb); – Влияние содержания активированного угля и обменных свойств образца (содержания и толщины пустот воздуха) на характеристики фильтрации пористого асфальтобетона; – Истираемость для оценки устойчивости к потере частиц (Gi) по JTG E20 T0733; – Дренажное связующее по Шелленбергу (JTG E20 T0732); – Влажность (JTG E20 T0729); – Устойчивость по Маршаллу (SM) в соответствии с JTG F40-2004; – Пористость; – Колейность 	<ul style="list-style-type: none"> – Пористость – Истираемость; – Микротомография; – Визуализация методом нейтронной радиографии для изучения распределения и движения воды 	–	[58]
69	Битум, модифицированный стирол-бутадиен-стиролом (SBS) $\rho=1000 \text{ кг/м}^3$	Песчаник с содержанием кварца 20–30% $\rho=2700 \text{ кг/м}^3$	–	Вяжущее – 4,63% от общей массы смеси	<ul style="list-style-type: none"> – Пористость; – Истираемость; – Микротомография; – Визуализация методом нейтронной радиографии для изучения распределения и движения воды 	–	[59]	
2. БЕТОНЫ ДЛЯ СИСТЕМ ФИЛЬТРАЦИИ И ДРЕНАЖНЫХ ВОДОСТОКОВ								
2.1. На основе цемента без использования полимерного связующего								
70	Портландцемент $R_{сж}=42,5 \text{ МПа}$	Керамзит Фракция – 9–12 мм	Зола-уноса (FA); 3-тиоцианатопропилтриэтоксисилан (TCPS); Полиэтерокислитель суперпластификатор	$V/U=0,3$ Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 373 Заполнитель – 1469 Т-FA (FA+ TCPS) – 4% от массы цемента	<ul style="list-style-type: none"> – Пористость; – Т-FA и его влияние на секвестрацию кадмия (Cd (II)) в растворе; – Концентрация Cd (II) в растворе с погруженным подготовленным проницаемым бетоном 	<ul style="list-style-type: none"> – Пористость; – pH сточной воды; – Гидратация цемента и взаимодействие со сточной водой; – Минералогический анализ пропущенной через бетон воды; – Концентрация Na, Mg, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Al, Rb и Sr с использованием PerkinElmer SCIEX 	<ul style="list-style-type: none"> – Фильтрующие конструкции – Приготовление гранул из золы-уноса (FA) путем ее модификации 3-тиоцианатопропилтриэтоксисиланом (TCPS), щелочная активация гранул и их включение в бетонную смесь 	[1]
71	Портландцемент (CEM 152,5R)	Гранит Фракция – 9,5 мм	Зола-уноса класса F (FA); Суперпластификатор (SP) Chyso Fluid Premia 310	$V/U=0,27$ Состав бетонной смеси, кг/м ³ : Цемент – 330 Гранит – 1890 FA – 140 SP – 9,2 Вода – 130	–	–	[12]	

Продолжение таблицы

№ п/п	Состав бетона		Функциональные добавки	Соотношение компонентов	Функциональные свойства дренажного бетона	Физико-механические свойства материала	Примечания	Ссылка на источник
	Вид вяжущего	Вид заполнителя						
72	Шлакопортланд-цемент (содержание доменного шлака – 30%), $\rho=3020 \text{ кг/м}^3$	Щебень; Отходы строительного боя фракция – 5–13 мм	Гранулированный цеолит (Ze) ($\rho=1900 \text{ кг/м}^3$); Микрокремнезем (SF); Стекловолокно (GF) (10 мм, $\rho=2780 \text{ кг/м}^3$); Суперпластификатор (SP) серии сульфонов лигнина ($\rho=1200 \text{ кг/м}^3$, pH 7–9, содержание твердого вещества 41–45%)	Состав бетонной смеси, кг/м^3 : Цемент – 265 Щебень – 1270 Строительный бой – 368 Ze – 29 SF – 29 GF – 7,9 SP – 3,17 Вода – 73	– Пористость; – Водопроницаемость; – Прочность на сжатие; – Фильтрационная способность	$\Gamma=20\%$ $k=1,4 \text{ см/с}$ $R_{\text{сж}}=16 \text{ МПа}$	–	[57]
73	Портландцемент класса 53	Заполнитель фракция – $\leq 0,3 \text{ мм}$; 0,3–1,18 мм; 1,18–2,36 мм; 2,36–4,75 мм; 4,75–6,3 мм	Суперпластификатор на основе поликарбонового эфира (PCE)	В/Ц=0,32 З/Ц=4 Пропорции бетонной смеси, % по массе цемента: PCE – 0,5 Заполнитель: $\leq 0,3 \text{ мм} – 5$ 0,3–1,18 мм – 5 1,18–2,36 мм – 20 2,36–4,75 мм – 25 4,75–6,3 мм – 45	– Водопроницаемость путем падающей головки, коэффициент проницаемости по закону Дарси; – Пористость (трежмерная рентгеновская компьютерная томография); – Выщелачиваемость; – Удаление свища из пропускаемой воды	$\Gamma=15,53\%$ $k=2 \text{ см/с}$	–	[28]
74	Цемент СЕМ II / А-L 42,5R	Известняк фракция – 5–12 мм	Замедлитель схватывания	В/Ц=0,29 Состав бетонной смеси, кг/м^3 : Цемент – 400 Заполнитель – 1400 Замедлитель схватывания – 1% от массы цемента	– Водопроницаемость; – Прочность на сжатие	$k=1,6 \text{ см/с}$ $R_{\text{сж}}=10 \text{ МПа}$	–	[47]
3. ДЕКОРАТИВНЫЕ БЕТОНЫ С ОРГАНИЧЕСКИМ РАСТИТЕЛЬНОМ СЛОЕМ								
3.1. На основе цемента без использования полимерного связующего								
75	Цемент	Заполнитель фракция – 6–10 мм	Наполнитель из белого цемента / метакаолина / известняка; Суперпластификатор	Состав бетонной смеси, кг/м^3 : Цемент – 179,5 Заполнитель – 1570,9 Метакаолин – 82,5 Известняковый наполнитель – 41,2 Суперпластификатор – 3,9 Вода – 91	– Всхожесть семян и развитие проростков в тепличных условиях; – Химический состав оросительной воды для измерения pH, катионов и анионов (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO, MgO, K_2O , Na_2O , SO_3 , P, Si и NO_3) каждые два часа в течение первого дня; три раза в день в течение первой недели, а затем один раз в день в течение четырех недель; – Прочность сцепления (адгезия) слоя проницаемого бетона с опорной частью стены	$\rho=1700 \text{ кг/м}^3$ $\Gamma=32\%$ $R_{\text{сж}}=10 \text{ МПа}$ $A=1,9 \text{ МПа}$	«Живая» стена. Вертикальная отливка с использованием стандартной опалубки	[2]

№ п/п	Состав бетона			Соотношение компонентов	Функциональные свойства дренажного бетона	Физико-механические свойства материала	Примечания	Ссылка на источник
	Вид вяжущего	Вид заполнителя	Функциональные добавки					
76	Портландцемент (Таншан, Китай) R _{сж} = 42,5 МПа	Смесь известняка и гравия (Пекин, Китай) фракция – 10–25 мм ρ _{каж} = 2780 кг/м ³ CWI = 8,5%	Доменный шлак ρ = 2890 кг/м ³ . Цемента – 216,7 Водоредуцирующая добавка из поликарбонной кислоты; Биочар 52 (фракция – 1–10 мм)	Состав бетонной смеси, кг/м ³ . Цемент – 216,7 Заполнитель – 1599,84 Зола – 26 Шлак – 52 Биочар – 5 Водоредуцирующая добавка – 1,45 Вода – 87,78	– Коэффициент водопоглощения методом испытаний, предложенных Гонгом; – Пористость; – Прочность на сжатие; – Кажущаяся плотность; – Индекс дробления Бонда; – Проба на растительность	Π = 24,9% k = 1,66 см/с R _{сж} = 16,87 МПа Темп прорастания семян = 84%	«Живые» плиты, в состав которых входит биочар – добавка для улучшения плодородия почвы	[3]
77	Сульфатно-алюминатный цемент (SAC) ρ = 2810 кг/м ³ (Jining Zhonglian Cement Co., Ltd. Китай)	Керамзит фракция – 16–19 мм ρ _{каж} = 452 кг/м ³ CWI = 55,3%	Водоредуцирующая добавка; Замедлитель схватывания	V/Ц = 0,25 Состав бетонной смеси, кг/м ³ . SAC – 231,3 Керамзит – 410,7 Водоредуцирующая добавка – 2,5 Замедлитель схватывания – 0,9	– Коэффициент водопоглощения; – Пористость; – Прочность на сжатие; – Кажущаяся плотность; – Индекс дробления Бонда; – Щелочность растительного бетона (метод Ли) и измерение pH; – Скорость высвобождения азота и фосфора в воде (высвобождения удобрений из растительного бетона)	ρ = 705 кг/м ³ Π = 33,66% k = 3,85 см/с R _{сж} : 1 сут – 2,9 МПа 3 сут – 4,3 МПа 28 сут – 5,7 МПа	Подгорные «живые» стены	[4]
3.2. На основе цемента с использованием полимерного связующего								
78	Сульфатно-алюминатный цемент (SAC) класс 42,5 R (Special Cement Co., Ltd, Цюйфу, Китай)	Щебень ρ = 2730 кг/м ³ CWI = 9,3%; Отходы строительного боя ρ = 2590 кг/м ³ CWI = 18,3%	Мочевина (CO(NH ₂) ₂); Диаммонийфосфат (DP, (NH ₄) ₂ HPO ₄); Борная кислота (BA) (Sinopharm Chemical Reagent Co., Ltd, Китай)	V/Ц = 0,25 Состав бетонной смеси, кг/м ³ . SAC – 220 Заполнитель – 1320 BA – 0,87 PP – 2,39 Вода – 55	– Сопротивление вымыванию грунта (SRS) в соответствии с Zhou et al., 2010; – Коэффициент водопоглощения под напором воды 150 мм в течение 50 сут; – Пористость; – Прочность на сжатие	Π = 35% k = 2,95 см/с R _{сж} = 8,4 МПа	Защита склонов в долине автомагистралей и берегов рек	[5]

В одной из работ [57] исследовано влияние ускоренной карбонизации и времени гидравлического удержания на удаление свинца (Pb) в проницаемом бетонном фильтре. Технология ускоренной карбонизации подавляет повышение щелочности раствора независимо от его исходного pH, однако повышает при этом степень выщелачивания кальция, следовательно, стоимость такого фильтра увеличивается. Тем не менее затраты времени и материалов, требующихся для обработки 1000 л раствора, содержащего Pb в количестве 8 мг/л, с эффективностью 84%, были рассчитаны как 36 ч и 3127 евро, что довольно недорого в отличие от используемых на практике очистных сооружений в настоящее время. В связи с этим рекомендуется установка блоков предварительной обработки, т. е. песочных фильтров перед слоем высокопроницаемого бетона, благодаря которым можно снизить частоту обслуживания фильтра, использование бетонных отходов (переработанного заполнителя) для снижения затрат при приготовлении высокопроницаемого бетона.

Высокопроницаемые бетоны, используемые в комбинации с растительными объектами, как уже отмечалось ранее, еще не столь распространенное явление в архитектурном дизайне многих стран, в том числе России. Декоративные бетоны с органическим растительным слоем называют «живой» и «растительный бетон» (номера образцов 75–78) [2–5]. Существует несколько вариантов их исполнения:

- декоративные «живые» стены [2], вертикально отлитые с использованием стандартной опалубки;
- подпорные «живые» стены [4, 5], предназначенные для защиты склонов вдоль дорог и берегов рек;
- «живые» плиты [3], разновидность газонного покрытия.

Спецификой такой разновидности бетонов является использование в составе бетонной смеси минеральных компонентов, таких как биочар [3], улучшающий всхожесть семян растений.

Особое внимание при оценке эксплуатационных свойств таких разновидностей бетонов уделяется химическому составу прошедшей сквозь бетон оросительной воды, измерению ее pH и скорости высвобождения азота и фосфора (высвобождения удобрений из растительного бетона), а также прочности сцепления (адгезии) слоя проницаемого бетона с опорной частью конструкции.

Срок службы высокопроницаемого бетона с дренающим эффектом колеблется от 6 до 20 лет. Авторы, изучающие эффективность использования проницаемых бетонных покрытий, отмечают, что при высокой востребованности подобного рода материала и ряде его преимуществ открытым остается вопрос подверженности его засорению, приводящей к проблемам с эксплуатационной пригодностью и преждевременной деградацией.

Физическое засорение может быть вызвано накоплением мусора на поверхности и в структуре пор, вероятно, это самый распространенный механизм.

Подобно обычному бетону, деградация проницаемого бетона при замерзании–оттаивании увеличивается при более высокой степени насыщения порового пространства водой. Однако пустоты могут оказывать некоторое сопротивление разрушению при условии, что они будут опорожнены перед замерзанием, поэтому рекомендуется размещать высокопроницаемое покрытие над дренируемым основанием для минимизации накопления свободной воды в толще бетона.

Биологическое засорение происходит вследствие проникновения корней растений, прорастания водорослей и бактерий. Задачи, связанные с повышением биостойкости бетонов, могут быть решены путем использования комплекса мер, в которых помимо традиционных материаловедческих решений должны быть учтены перспективы применения компонентов активного действия [87, 88], а также возможности бактериальной биоминерализации [89].

Таким образом, анализ результатов экспериментальных исследований, выполненных как отечественными, так и зарубежными авторами, позволил структурировать высокопроницаемые бетоны по функциональному назначению, где выделены бетоны для дорожных и тротуарных покрытий, систем фильтрации и дренажных водостоков, а также декоративные бетоны с органическим растительным слоем, которые, в свою очередь, применяются как для горизонтальных, так и для вертикальных инженерных решений, характеризующихся высокой архитектурной выразительностью. Еще одним критерием ранжирования являлся вид вяжущего – бетоны на цементной основе, полимерной или органополимерной, а также на композиционном органоминеральном вяжущем. По виду минерального сырья, которое используется в качестве крупного заполнителя, выделяются карбонатные осадочные (известняк) и алюмосиликатные интрузивные (гранит) горные породы. К основным контролируемым параметрам при оценке эффективности высокопроницаемых бетонов относятся пористость изделий, прочность на сжатие и коэффициент водопроницаемости.

Заключение

В данной обзорной статье представлен анализ результатов исследований многочисленных авторов, работающих в направлении оптимизации составов и поиска технологических решений по повышению эффективности высокопроницаемых бетонов, а также расширения областей их использования. Накопленный эмпирический материал позволил провести обобщение и структурирование имеющихся данных по таким критериям, как вид применяемого вяжущего, генетический тип горных пород, используемых для получения крупного заполнителя, вид функциональных добавок. Проанализированные физико-механические свойства бетонов, разработанных различными научными группами, позволили вывести граничные значения пористости, прочности

и коэффициента водопроницаемости для бетонов различного функционального назначения — дорожных и тротуарных покрытий, систем фильтрации и дренажных водостоков, декоративных бетонов с органическим растительным слоем.

В связи с расширением областей использования дренажных бетонов, а также учитывая тот факт, что все функциональные области использования высокопроницаемых бетонов в той или иной степени связаны с перколяцией жидкости, что при оценке свойств таких разновидностей бетонов влечет за собой изменение химического состава прошедшей сквозь бетон оросительной воды и pH-среды, актуальными и до сих пор открытыми остаются следующие задачи, призванные обеспечить повышение долговечности материалов:

- повышение стойкости к агрессивным воздействиям среды эксплуатации, а также разработка высокопроницаемых композиционных (многокомпонентных) материалов с пролонгированной коррозионной стойкостью;

- оптимизация структуры порового пространства с целью минимизации засорения пор и увеличение сроков выполнения дренирующей функции материалов;

- оптимизация состава бетона с целью повышения механической и химической фильтрационной способности.

Анализ существующих проблем позволил выделить следующие пути достижения эффективности высокопроницаемых бетонов: первый направлен на увеличение площади контакта между частицами заполнителя без снижения общей пористости бетона; второй — на повышение прочности цементной матрицы и ее сцепления с заполнителем; третий — на уменьшение количества растворимых компонентов в бетоне.

Данные задачи могут быть решены за счет использования комплекса достаточно традиционных для

строительного материаловедения методов и подходов, применение которых, однако, должно учитывать специфику целевых функций, стоящих перед изделиями из высокопроницаемых бетонов:

- выбор рациональных генетических типов горных пород и отходов промышленности, которые будут удовлетворять требованиям в качестве сырья для получения крупного заполнителя по водостойкости; возможности обеспечения заданной формы и морфологии поверхности зерен заполнителя при дроблении либо в своем естественном виде (например, осадочные обломочные горные породы); активности поверхности по отношению к вяжущему для обеспечения его максимально возможной адгезии; в случае необходимости усиления фильтрационной функции — по сорбционной емкости;

- оптимизация зернового состава заполнителя, которая включает: подбор минимально возможной плотности упаковки частиц крупного заполнителя; определение рациональной формы и морфологии поверхности частиц заполнителя для соблюдения требования по плотности упаковки;

- оптимизация минерального состава матрицы композиционного вяжущего — вида вяжущего и активных минеральных компонентов;

- применение различного вида добавок: водоредуцирующих — для повышения водонепроницаемости цементного камня, слагающего тонкие прослойки в межзерновом пространстве крупного заполнителя; добавок активного действия, обеспечивающих резистивность по отношению к процессам химической и биокоррозии; компонентов, обеспечивающих повышение адгезии.

Безусловно, все вышеуказанные методы и подходы должны соответствовать технико-экономическим критериям эффективности использования тех или иных материалов с учетом региональной специфики минерально-сырьевой базы.

Список литературы / References

1. Zhen Dai, Hui Lia, Wenzhong Zhao, Xiangping Wang, Hanbing Wang, Haonan Zhou, Bing Yang. Multi-modified effects of varying admixtures on the mechanical properties of pervious concrete based on optimum design of gradation and cement-aggregate ratio. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 233, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117178.
2. Benjamin Riley, François de Larrard, Valéry Malécot, Isabelle Dubois-Brugger, Hervé Lequay, Gilles Lecomte. Living concrete: Democratizing living walls. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 673, pp. 281–295. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.065.
3. Min Zhao, Yinghui Jia, Linjuan Yuan, Jing Qiu, Chao Xie. Experimental study on the vegetation characteristics of biochar-modified vegetation concrete. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 206, pp. 321–328. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.238.
4. Jingping Zhou, Lei Ji, Chenchen Gong, Lingchao Lu, Xin Cheng. Ceramsite vegetated concrete with water and fertilizer conservation and light weight: Effect of w/c and fertilizer on basic physical performances of concrete and physiological characteristics of festuca arundinacea. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 236, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117785.
5. Laibo Li, Mingxu Chen, Xiangming Zhou, Lingchao Lu, Yi Wang, Xin Cheng. Evaluation of the preparation and fertilizer release performance of planting concrete made with recycled-concrete aggregates from demolition. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 200, pp. 54–64. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.264.
6. Alalea Kia, Hong S. Wong, Christopher R. Cheeseman. Clogging in permeable concrete: A review. *Journal of Environmental Management*. 2017. Vol. 193, pp. 221–233. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.02.018.


7. Jiusu Li, Yi Zhang, Guanlan Liu, Xinghai Peng. Preparation and performance evaluation of an innovative pervious concrete pavement. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 138, pp. 479–485. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.137.
8. Shigemitsu Hatanaka, Zilola Kamalova, Morihiro Harada. Construction of a nonlinear permeability model of pervious concrete and drainage simulation of heavy rain in a residential area. *Results in Materials*. 2019. Vol. 3, pp. 1–6. DOI: 10.1016/j.rinma.2019.100033.
9. Tiejun Liu, Zhongzhen Wang, Dujian Zou, Ao Zhou, Junze Du. Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 122, pp. 72–82. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.05.004.
10. Junbo Sun, Junfei Zhang, Yunfan Gu, Yimiao Huang, Yuantian Sun, Guowei Ma. Prediction of permeability and unconfined compressive strength of pervious concrete using evolved support vector regression. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 207, pp. 440–449. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.117.
11. Peng Liu, Yining Gao, Fazhou Wang, Lu Yang. Preparation of pervious concrete with 3-thiocyanat opropyltriethoxysilane modified fly ash and its use in Cd (II) sequestration. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 212, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.242.
12. Ayanda N. Shabalala, Stephen O. Ekolu, Souleymane Diop, Fitsum Solomon. Pervious concrete reactive barrier for removal of heavy metals from acid mine drainage – column study. *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 323, pp. 641–653. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.10.027.
13. Xiaogeng Xie, Tongsheng Zhanga, Yongmin Yang, Ziyu Lin, Jiangxiong Wei, Qijun Yu. Maximum paste coating thickness without voids clogging of pervious concrete and its relationship to the rheological properties of cement paste. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 168, pp. 732–746. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.128.
14. Ali Rezaei Lori, Abolfazl Hassani, Reza Sedghi. Investigating the mechanical and hydraulic characteristics of pervious concrete containing copper slag as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 197, pp. 130–142. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.230.
15. Hanbing Wang, Hui Li, Xiao Liang, Haonan Zhou, Ning Xie, Zhen Dai. Investigation on the mechanical properties and environmental impacts of pervious concrete containing fly ash based on the cement-aggregate ratio. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 202, pp. 387–395. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.044.
16. Lei Lang, Haijuan Duan, Bing Chen. Properties of pervious concrete made from steel slag and magnesium phosphate cement. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 209, pp. 95–104. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.123.
17. Mojtaba Tabatabaeian, Alireza Khaloo, Hooman Khaloo. An innovative high performance pervious concrete with polyester and epoxy resins. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 228, pp. 1–22. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116820.
18. Zhen Dai, Hui Li, Wenzhong Zhao, Xiangping Wang, Hanbing Wang, Haonan Zhou, Bing Yang. Multi-modified effects of varying admixtures on the mechanical properties of pervious concrete based on optimum design of gradation and cement-aggregate ratio. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 233, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117178.
19. Jian-Xin Lu, Xin Yan, Pingping He, Chi Sun Poon. Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 234, pp. 1102–1112. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.260.
20. M. Uma Maguesvari, V.L. Narasimha. Studies on characterization of pervious concrete for pavement applications. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2013. Vol. 104, pp. 198–207. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.112.
21. Bashar S. Mohammed, Mohd Shahir Liew, Wesam S. Alaloul, Veerendrakumar C. Khed, Cheah Yit Hoong, Musa Adamu. Properties of nano-silica modified pervious concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2018. Vol. 8, pp. 409–422. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.03.009.
22. Mohsen Sartipi, Farid Sartipi. Stormwater retention using pervious concrete pavement: Great Western Sydney case study. *Case Studies in Construction Materials*. 2019. Vol. 11, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00274.
23. Shengnan Dai, Xianghao Wu, Haoran Zhou, Wei Li, Xingquan Jiang, Binghan Liang. Experimental study on mechanical properties of permeable concrete. *Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 233, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/233/3/032037.
24. Ramkrishnan R., Abilash B., Mansi Trivedi, Varsha P., Varun P., Vishanth S. Effect of mineral admixtures on pervious concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5, pp. 24014–24023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.194>
25. Gersson F.B. Sandoval, Isaac Galobardes, Raquel S. Teixeira, Berenice M. Toralles. Comparison between the falling head and the constant head permeability tests to assess the permeability coefficient of sustainable Pervious Concretes. *Case Studies in Construction Materials*. 2017. Vol. 7, pp. 317–328. DOI: 10.1016/j.cscm.2017.09.001.
26. Jian-Xin Lu, Xin Yan, Pingping He, Chi Sun Poon. Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 234, pp. 1102–1112. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.260.
27. Soon Poh Yap, Paul Zhao Chiat Chen, Yingxin Goh, Hussein Adebayo Ibrahim, Kim Hung Mo, Choon Wah Yuen. Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete

- aggregates. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 181, pp. 155–165. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.205.
28. Murugan Muthu, Manu Santhanam, Mathava Kumar. Pb removal in pervious concrete filter: Effects of accelerated carbonation and hydraulic retention time. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 174, pp. 224–232. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.116.
29. Ivanka Netinger Grubeša, Ivana Barišić, Vilma Ducman, Lidija Korat. Draining capability of single-sized pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 169, pp. 252–260. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.037.
30. Hatice Öznur Öz. Properties of pervious concretes partially incorporating acidic pumice as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 166, pp. 601–609. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.010.
31. Valerie López-Carrasquillo, Sangchul Hwang. Comparative assessment of pervious concrete mixtures containing fly ash and nanomaterials for compressive strength, physical durability, permeability, water quality performance and production cost. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 139, pp. 148–158. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.052.
32. Dang Hanh Nguyena, Mohamed Boutouil, Nassim Sebaibi, Fabienne Baraud, Lydia Leleyter. Durability of pervious concrete using crushed seashells. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 135, pp. 137–150. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.219.
33. Elnaz Khankhaje, Mohd Razman Salim, Jahangir Mirza, Mohd Warid Hussin, Mahdi Rafieizonooz. Properties of sustainable lightweight pervious concrete containing oil palm kernel shell as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 126, pp. 1054–1065. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.010.
34. Juanlan Zhou, Mulian Zheng, Qi Wang, Jiangang Yang, Tianfa Lin. Flexural fatigue behavior of polymer-modified pervious concrete with single sized aggregates. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 124, pp. 897–905. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.136.
35. Hao Wu, Zhuo Liu, Beibei Sun, Jian Yin. Experimental investigation on freeze–thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC). *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 117, pp. 63–71. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.130.
36. Hussein Adebayo Ibrahim, Hashim Abdul Razak. Effect of palm oil clinker incorporation on properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 115, pp. 70–77. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.181.
37. Nicholas A. Brake, Hamid Allahdadi, Fatih Adam. Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 113, pp. 536–543. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.045.
38. Anthony Torres, Jiong Hu, Amy Ramos. The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 95, pp. 850–859. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.187.
39. Alessandra Bonicelli, Filippo Giustozzi, Maurizio Crispino. Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 91, pp. 102–110. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.012.
40. K. Ćosić, L. Korat, V. Ducman, I. Netinger. Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 78, pp. 69–76. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.073.
41. Dang Hanh Nguyen, Nassim Sebaibi, Mohamed Boutouil, Lydia Leleyter, Fabienne Baraud. A modified method for the design of pervious concrete mix. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 73, pp. 271–282. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088.
42. Mehmet Gesoglu, Erhan Güneyisi, Ganjeena Khoshnaw, Süleyman Ipek. Abrasion and freezing–thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 73, pp. 19–24. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.047.
43. Saeid Hesami, Saeed Ahmadi, Mahdi Nematzadeh. Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 53, pp. 680–691. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.070.
44. Sonebi M., Bassuoni M.T. Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 38, pp. 147–154. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.044.
45. Xiang Shu, Baoshan Huang, Hao Wu, Qiao Dong, Edwin G. Burdette. Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures. *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25, pp. 3187–3192. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.002.
46. Baoshan Huang, Hao Wu, Xiang Shu, Edwin G. Burdette. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24, pp. 818–823. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.025.
47. Pieralisi R., Cavalaro S.H.P., Aguado A. Discrete element modelling of the fresh state behavior of pervious concrete. *Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 90, pp. 6–18. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.09.010.
48. Liana C., Zhuge Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24, pp. 2664–2671. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057.
49. Holmes Ryan R., Hart Megan L., Kevern John T. Heavy metal removal capacity of individual components of permeable reactive concrete. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2017. Vol. 196, pp. 52–61. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2016.12.005.

50. Solpuker U., Sheets J., Kim Y., Schwartz F.W. Leaching potential of pervious concrete and immobilization of Cu, Pb and Zn using pervious concrete. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2014. Vol. 196, pp. 35–48. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2014.03.002.
51. Xiaogeng Xie, Tongsheng Zhang, Yongmin Yang, Ziyu Lin, Jiangxiong Wei, Qijun Yu. Maximum paste coating thickness without voids clogging of pervious concrete and its relationship to the rheological properties of cement paste. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 168, pp. 732–746. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.128.
52. Mo L.T., Huurman M., Wu S.P., Molenaar A.A.A. Bitumen–stone adhesive zone damage model for the meso-mechanical mixture design of ravelling resistant porous asphalt concrete. *International Journal of Fatigue*. 2011. Vol. 33, pp. 1490–1503. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2011.06.003.
53. Brake Nicholas A., Allahdadi Hamid, Adam Fatih. Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 113, pp. 536–543. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.045.
54. Gerharz B. Pavements on the base of polymer-modified drainage concrete. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 1999. Vol. 152, pp. 205–209. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(98\)00831-0](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(98)00831-0)
55. Toplicic-Curcic Gordana, Grdic Dusan, Ristic Nenad, Grdić Zoran. Environmental importance, composition and properties of pervious concrete. *Gradjevinski materijali i konstrukcije*. 2016. Vol. 59, pp. 15–27. 10.5937/grmk1602015T.
56. Cheng Yee Ng, Anaqi Ratna Narong, Aifaa Balqis Kamarul Zaman, Zahiraniza Mustafa, Bashar S. Mohammed, Lee Woen Ean. Properties of modified high permeable concrete with a crumb rubber. *The Open Civil Engineering Journal*. 2019. Vol. 13, pp. 82–91. DOI: 10.2174/1874149501913010082.
57. Seung Bum Park, Byung Jae Lee, Jun Lee, Young Il Jang. A study on the seawater purification characteristics of water-permeable concrete using recycled aggregate. *Resources, Conservation and Recycling*. 2010. Vol. 54, pp. 658–665. DOI: 10.1016/j.resconrec.2009.11.006.
58. Xiaodi Hu, Kang Dai, Pan Pan. Investigation of engineering properties and filtration characteristics of porous asphalt concrete containing activated carbon. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 209, pp. 1484–1493. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.115.
59. Poulikakos L.D., Sedighi Gilani M., Derome D., Jerjen I., Vontobel P. Time resolved analysis of water drainage in porous asphalt concrete using neutron radiography. *Applied Radiation and Isotopes*. 2013. Vol. 77, pp. 5–13. DOI: 10.1016/j.apradiso.2013.01.040.
60. Eduardo-Javier Elizondo-Martínez, Valerio-Carlos Andres-Valeri, Daniel Jato-Espino, Jorge Rodriguez-Hernandez. Review of porous concrete as multifunctional and sustainable pavement. *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 27, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.jobee.2019.100967.
61. Sourabh Rahangdale, Shobhit Maran, Sumit Lakhmanil, Mayuresh Gidde. Study of pervious concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017. Vol. 6, pp. 2563–2566. <https://www.irjet.net/archives/V4/i6/IRJET-V4I6648.pdf>
62. Muhammad Aamer Rafique Bhutta, Nor Hasanah, Nur Farhayu, Mohd Warid Hussin, Mahmood bin Md Tahir, J. Mirza. Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 47, pp. 1243–1248. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.022.
63. Lian C., Zhuge Y., Beecham S. The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25, pp. 4294–4298. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.05.005.
64. Muhammad Aamer Rafique Bhutta, Nor Hasanah, Nur Farhayu, Mohd Warid Hussin, Mahmood bin Md Tahir, J. Mirza. Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 47, pp. 1243–1248. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.022.
65. Gelong Xu, Weiguo Shen, Xujia Huo, Zhifeng Yang, Jing Wang, Wensheng Zhang, Xiaoli Ji. Investigation on the properties of porous concrete as road base material. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 158, pp. 141–148. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.151.
66. Wuguang Lin, Dae-Geun Park, Sung Woo Ryu, Byeong-Tae Lee, Yoon-Ho Cho. Development of permeability test method for porous concrete block pavement materials considering clogging. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 118, pp. 20–26. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.107.
67. Weiguo Shena, Lai Shan, Tao Zhang, Hongkun Ma, Zhi Cai, Hua Shi. Investigation on polymer–rubber aggregate modified porous concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 38, pp. 667–674. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.006.
68. Aamer Rafique Bhutta M., Tsuruta K., Mirza J. Evaluation of high-performance porous concrete properties. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 31, pp. 67–73. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.024.
69. Chao Xie, Linjuan Yuan, Min Zhao, Yinghui Jia. Study on failure mechanism of porous concrete based on acoustic emission and discrete element method. *Construction and Building Materials*. 2020, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117409.
70. СП 28.13330.2017. Свод правил. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11–85. Введен 28.08.2017.
70. SP 28.13330.2017. Svod pravil. Zashhita stroitel'nyh konstrukcij ot korrozii. Aktualizirovannaja redakcija

- SNiP 2.03.11–85 [SP 28.13330.2017. Set of rules. Protection of building structures against corrosion. Updated edition of SNiP 2.03.11–85]. Introduced 28.08.2017. (In Russian).
71. Harada S., Yanbe M. Adsorption by and artificial release of zinc and lead from porous concrete for recycling of adsorbed zinc and lead and of porous concrete to reduce urban non-point heavy metal runoff. *Chemosphere*. 2018. Vol. 197, pp. 451–456. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.01.044.
72. Elnaz Khankhaje, Mohd Razman Salim, Jahangir Mirza, Salmiati, Mohd Warid Hussin, Rawid Khan, Mahdi Rafieizonooz. Properties of quiet pervious concrete containing oil palm kernel shell and cockleshell. *Applied Acoustics*. 2017. Vol. 122, pp. 113–120. DOI: 10.1016/j.apacoust.2017.02.014.
73. Дергунова А.В., Пиксайкина А.А. Применение пористых тротуаров в создании инфраструктуры городской среды // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 12 (123). С. 1440–1447.
73. Dergunova A.V., Piksajkina A.A. The use of porous sidewalks in creating the infrastructure of the urban environment. *Vestnik MGSU*. 2018. Vol. 13. No. 12 (123), pp. 1440–1447. (In Russian).
74. Kebede Keterew Kefeni, Bhekile Brilliance Mamba. Evaluation of charcoal ash nanoparticles pollutant removal capacity from acid mine drainage rich in iron and sulfate. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 251, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119720.
75. Jinman Wang, Qian Qin, Sijia Hu, Kening Wu. A concrete material with waste coal gangue and fly ash used for farmland drainage in high groundwater level areas. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 112, pp. 631–638. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.138.
76. Романенко И.И., Петровнина И.Н., Романенко М.И. Пористый бетон в дорожном строительстве // *Инженерный вестник Дона*. 2019. № 2 (53). С. 50.
76. Romanenko I.I., Petrovnina I.N., Romanenko M.I. Porous concrete in road construction. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2019. No. 2 (53), pp. 50. (In Russian).
77. Лесовик Р.В., Сопин Д.М., Митрохин А.А. Крупнопористый бетон для малоэтажного строительства на композиционных вяжущих // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. № 10. С. 45–50.
77. Lesovik R.V., Sopin D.M., Mitrohin A.A. Krupnoporistyj beton dlja malojetazhnogo stroitel'stva na kompozicionnyh vjazhushhijh. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2016. No. 10, pp. 45–50. (In Russian).
78. Арын Б.А. Обоснование применения пористого бетона в качестве основания и дренажа сооружений // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева*. 2016. Т. 281. С. 101–108.
78. Aryn B.A. Justification for the use of porous concrete as a base and drainage of structures. *Izvestija Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotehniki named after B.E. Vedeneeva*. 2016. Vol. 281, pp. 101–108. (In Russian).
79. Mohammed Seddik Meddah, Salim Zitouni Saïd Belâabes. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24, pp. 505–512. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.009.
80. Лесовик В.С., Агеева М.С., Иванов А.В. Гранулированные шлаки в производстве композиционных вяжущих // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2011. № 3. С. 29–32.
80. Lesovik V.S., Ageeva M.S., Ivanov A.V. Granular slag in the production of composite binders. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2011. No. 3, pp. 29–32. (In Russian).
81. Беленцов Ю.А., Лесовик В.С., Ильинская Г.Г. Повышение надежности конструкций управлением параметрами композиционного материала // *Строительные материалы*. 2011. № 3. С. 90–92.
81. Belentsov Yu.A., Lesovik V.S., Il'inskaya G.G. Enhancement of reliability of structures by controlling parameters of a composition material. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials] 2011. No. 3, pp. 90–92. (In Russian).
82. Косухин М.М., Косухин А.М., Шарапова Ю.А., Шарапов О.Н. Обеспечение долговечности, эксплуатационной надежности, комфортности и экологической безопасности улично-дорожной сети путем использования цементобетонных дорожных покрытий на модифицированном вяжущем // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. № 3. С. 31–37.
82. Kosuhin M.M., Kosuhin A.M., Sharapova Ju.A., Sharapov O.N. Ensuring the durability, operational reliability, comfort and environmental safety of the road network by using cement concrete pavements on a modified binder. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2016. No. 3, pp. 31–37. (In Russian).
83. Королев Е.В. Принцип реализации нанотехнологии в строительном материаловедении // *Строительные материалы*. 2013. № 6. С. 60–64.
83. Korolev E.V. Principle of realization of nanotechnology in building materials science. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 6, pp. 60–64. (In Russian).
84. Sonebi M., Bassuoni M.T. Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling. 2013. Vol. 38, pp. 147–154. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.044.
85. Строкова В.В., Бабаев В.Б., Марков А.Ю., Соболев К.Г., Нелюбова В.В. Сравнительная оценка конструкций дорожной одежды с использованием цементобетона // *Строительные материалы и изделия*. 2019. Т. 2. № 4. С. 56–63.

85. Strokova V.V., Babaev V.B., Markov A.Ju., Sobolev K.G., Neljubova V.V. Comparative assessment of pavement structures using cement concrete. *Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2019. Vol. 2. No. 4, pp. 56–63. (In Russian).
86. Автомобильные дороги. Строительные нормы и правила. СНИП 2.05.02–85 (утв. Постановлением Госстроя СССР от 17.12.85 № 233) (ред. от 08.06.95).
86. Avtomobil'nye dorogi. Stroitel'nye normy i pravila. SNIP 2.05.02–85 (utv. Postanovleniem GOSSTROJa SSSR ot 17.12.85 No. 233) (red. ot 08.06.95). [Highways. Building regulations. SNIP 2.05.02–85 (approved by the Decree of the GOSSTROY of the USSR dated 17.12.85 No. 233) (As amended on 08.06.95)]. (In Russian).
87. Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов В.А. Биокоррозия цементных бетонов, особенности ее развития, оценки и прогнозирования // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 12–4. С. 708–716.
87. Erofeev V.T., Fedorcov A.P., Bogatov A.D., Fedorcov V.A. Biocorrosion of cement concrete, features of its development, assessment and forecasting. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014. No. 12–4, pp. 708–716. (In Russian).
88. Ерофеев В.Т., Богатов А.Д., Федорцов А.П., Пронькин С.П. Исследование механизмов повреждения битумных композитов в условиях воздействия биологических агрессивных сред // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 2–13. С. 2787–2800.
88. Erofeev V.T., Bogatov A.D., Fedorcov A.P., Pron'kin S.P. Investigation of damage mechanisms of bitumen composites under conditions of exposure to biological aggressive environment. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2015. No. 2–13, pp. 2787–2800. (In Russian).
89. Строкова В.В., Власов Д.Ю., Франк-Каменецкая О.В., Духанина У.Н., Балицкий Д.А. Применение микробной карбонатной биоминерализации в биотехнологиях создания и восстановления строительных материалов: анализ состояния и перспективы развития // *Строительные материалы*. 2019. № 9. С. 83–103. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103>.
89. Strokova V.V., Vlasov D.Yu., Frank-Kamenetskaya O.V., Dukhanina U.N., Balitsky D.A. Application of microbial carbonate biomineralization in biotechnologies of building materials creation and restoration: analysis of the state and prospects of development. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 9, pp. 83–103. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103>

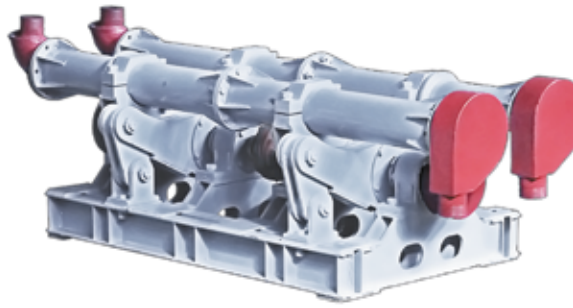


Активатор
измельчение активация синтез

Российские промышленные и лабораторные шаровые мельницы интенсивного помола.

Реклама

Центробежные эллиптические мельницы




Высокая производительность при низком энергопотреблении

- *смешение компонентов
- *активация цемента
- *получение сухих смесей
- *подготовка шихты
- *помол наполнителей
- *помол пигментов

Мельницы, другое оборудование и результаты помола материалов на
www.activator.ru

Лабораторные планетарные мельницы



Мельницы для пробоподготовки
Высокоинтенсивная обработка

Новосибирск,
Софийская 14, оф 17
630056, Новосибирск 56, а/я 141
Тел: +7 (3845) 71 0 61
+7 960 780 77 06
e-mail: zhm.activator@gmail.com

С.Ю. АНДРОНОВ¹, канд. техн. наук (atomic08@yandex.ru),
А.Ф. ИВАНОВ¹, канд. техн. наук (alexandr.ivanov.sgtu@rambler.ru);
А.В. КОЧЕТКОВ², д-р техн. наук (soni.81@mail.ru)

¹ Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А. (410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)

Ремонт автомобильной дороги с применением фибросодержащих асфальтобетонных смесей с диспергированным вяжущим

В современной науке и практике основной принцип взаимодействия битума и зерен минерального материала заключается в том, что пленка битума покрывает зерно минерального материала. Представленная работа открывает цикл исследований обратного характера этого взаимодействия – когда микродиспергированную каплю битума покрывает опудренный слой минерального материала (нано- или микропорошка). По сути, речь идет о производстве наноматериала в виде битумной суспензии на прямых твердых эмульгаторах и материалах на ее основе. В настоящей статье приведены результаты ремонта автомобильной дороги в селе Усть-Курдюм Саратовской области с применением фибросодержащих асфальтобетонных смесей с диспергированным вяжущим. Технология рекомендуется для расширенного применения для дорог и улиц населенных пунктов, автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения. Достигнутый технический результат – предотвращение сегрегирования (расслоения) и слеживаемости асфальтобетонной или битумно-минеральной композиции при ее хранении и транспортировке, и повышение сцепления вяжущего с минеральными материалами асфальтобетонной или битумно-минеральной композиции при ее использовании за счет обеспечения пластических свойств битумного вяжущего и дорожного материала в целом.

Ключевые слова: диспергированный битум, холодные асфальтобетонные смеси, фибра, асфальтобетон, битумная суспензия, базальтовое волокно.

Для цитирования: Андронов С.Ю., Иванов А.Ф., Кочетков А.В. Ремонт автомобильной дороги с применением фибросодержащих асфальтобетонных смесей с диспергированным вяжущим // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 62–67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-62-67>

S.Yu. ANDRONOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (atomic08@yandex.ru),

A.F. IVANOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (alexandr.ivanov.sgtu@rambler.ru);

A.V. KOCHETKOV², Doctor of Sciences (Engineering) (soni.81@mail.ru)

¹ Saratov State Technical University named after Y.A. Gagarin (77, Politechnicheskaya Street, Saratov, 410054, Russian Federation)

² Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Prospect, Perm, 614990, Russian Federation)

Highway Repair Using Fiber-Containing Asphalt Concrete Mixes with Dispersed Binder

In modern science and practice, the main principle of interaction between bitumen and mineral material grains is that the bitumen film covers the grain of the mineral material. The presented work opens a cycle of studies of the reverse nature of this interaction – when a micro-dispersed drop of bitumen is covered with a powdered layer of a mineral material (nano- or micro-powder). In fact we are talking about the production of nano-material in the form of a bituminous suspension on direct solid emulsifiers and materials based on it. This article presents the results of road repair in the village of Ust-Kurdyum, Saratov Region, with the use of fiber-containing asphalt concrete mixes with dispersed binder. The technology is recommended for extended use for roads and streets of settlements, and for highways with low traffic intensity. The achieved technical result is the prevention of segregation (stratification) and caking of asphalt concrete or bituminous-mineral composition during its storage and transportation, and increasing the adhesion of the binder to the mineral materials of asphalt concrete or bituminous-mineral composition, when using it, due to ensuring the plastic properties of the bituminous binder and road material as a whole.

Keywords: dispersed bitumen, cold asphalt-concrete mixes, fiber, asphalt concrete, bituminous suspension, basalt fiber.

For citation: Andronov S.Yu., Ivanov A.F., Kochetkov A.V. Highway repair using fiber-containing asphalt concrete mixes with dispersed binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 62–67. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-62-67>

Основной доминирующей идеей взаимодействия битума и зерен минерального материала в современной науке и практике битумного производства является пленочное состояние, когда пленка битума покрывает зерно минерального материала. Исследования, приведенные в данной работе, показывают обратный характер этого взаимодействия – когда микродиспергированную каплю битума покрывает опудренный слой минерального материала, нано- или микропорошка.

Применяются следующие определения:
– *диспергированный битум*: битумные частицы в однородном мелкодисперсном состоянии, не взаимодействующие друг с другом, опудренные микро- или нанопорошком;
– *холодная битумная суспензия на основе диспергированного битума*: суспензия в виде композиции однородного фракционированного минерального порошка и битумных частиц в мелкодисперсном состоянии, окруженных тонкой пленкой воды, получаемая

путем введения и перемешивания горячего битума с увлажненным твердым эмульгатором (минеральный порошок и/или его смеси с другими минеральными компонентами);

– *битумо-минеральные смеси с диспергированным битумом*: рационально подобранная смесь минеральных материалов (воды, щебня, песка, отсева дробления и минерального порошка, диспергированного битума на основе битума нефтяного дорожного, модифицирующих добавок, перемешанных в определенных пропорциях;

– *асфальтобетон на основе диспергированного битума*: уплотненные и сформировавшиеся под воздействием тепла окружающего воздуха (высыхания и образования битумной пленки на поверхности частиц минеральных компонентов) битумо-минеральные смеси с диспергированным битумом.

Краткий анализ имеющейся информации

Разработаны ОДМ 218.3.054–2015 «Устройство поверхностной обработки и тонких слоев износа с применением различных видов фиброволокон» и стандарт организации ПУИЦ «Волгодортранс» СГТУ им. Гагарина Ю.А. «Рекомендации по технологии производства и применения дисперсно-армированных асфальтобетонных смесей с базальтовой фиброй». Информационный обзор по теме достаточно широко представлен в [1–15].

В настоящей статье представлены результаты работ по ремонту автомобильной дороги в селе Усть-Курдюм (Саратовская обл.) с применением фибросодержащих асфальтобетонных смесей с диспергированным вяжущим.

К ранее не решенным вопросам общей проблемы относятся предотвращение сегрегирования (расслоения) и слеживаемости асфальтобетонной или битумно-минеральной композиции при ее хранении и транспортировке и повышение сцепления вяжущего с минеральными материалами асфальтобетонной или битумно-минеральной композиции при ее использовании за счет обеспечения пластических свойств битумного вяжущего и дорожного материала в целом. Этому и посвящена данная статья.

Основные цели исследования:

– разработка технических условий конструкции слоя щебня, связанного вяжущим на основе диспергированного битума;

– разработка новой смеси асфальтобетона для проведения ямочного ремонта по СТО 20651461-02–2018 «Суспензии и холодные битумо-минеральные смеси с дисперсным битумом. Технические условия».

Изложение основного материала исследования с обоснованием полученных результатов

Асфальтобетон на основе диспергированного битума используется в конструктивных слоях дорожной одежды автомобильных дорог, в том числе в качестве защитных слоев и тонких слоев износа.

Применение асфальтобетона на основе диспергированного битума наиболее целесообразно в пределах особо охраняемых природных территорий, например на побережье и островах озера Байкал, в парке «Зарядье» г. Москвы и др.

Покрытия, устроенные с применением смесей с диспергированным битумом, являются ремонтнопригодными.

Диспергированный битум после испарения из смесей воды имеет хорошую адгезию к бетону, асфальтобетону и другим материалам. Образующий в результате отверждения асфальтобетон из смесей с диспергированным битумом является высокопрочным, химически стойким, гидрофобным и экологически чистым, соответствующим существующим нормативным требованиям на асфальтобетон.

Устройство слоев дорожной одежды с применением смесей с диспергированным битумом проводят в соответствии с требованиями настоящего стандарта.

Дорожные основания и покрытия, устроенные с применением смесей с диспергированным битумом, должны быть устойчивыми к воздействию климатических факторов внешней среды во всех дорожно-климатических зонах [12].

Конструктивные слои дорожной одежды автомобильных дорог, устроенные с применением смесей с диспергированным битумом, обладают следующими характеристиками:

- высокой прочностью и сцеплением с нижележащим слоем;
- требуемой износостойкостью;

Технические условия конструкции Design Specifications

Характеристика	Показатель
Размер фракции щебня, мм	Согласно требованиям проектной документации или заказчика
Коэффициент сцепления, не менее	0,4
Сдвиг, когезионный разрыв по асфальтобетону/цементобетону, %, не менее	80
Процент потери массы при испытании конструкции на истирание, %, не более	5
Разброс активных высот выступов для всех образцов при испытании на полигоне «Карусель-2», 1000 оборотов, мм, не менее	1
Средняя глубина впадин макрошероховатости методом «песчаного пятна», мм, не менее	1
Разница глубины погружения твердомера в образцы при испытании твердомером, мм, не более	0,6

- простотой изготовления, презентабельным внешним видом (вид мокрого камня и др.);
- стабильностью прочностных характеристик при периодических замерзаниях и оттаиваниях;
- стойкостью к агрессивным средам;
- отсутствием токсичности;
- пожаробезопасностью с классом горючести В1 (трудновоспламеняемые).

Технические условия конструкции слоя щебня, связанного вяжущим на основе диспергированного битума, должны соответствовать техническим характеристикам, представленным в таблице.

В поселке Усть-Курдюм Саратовского района Саратовской области сотрудники Поволжского учебно-исследовательского центра «Волгодортранс» СГТУ внедряли новую смесь асфальтобетона для проведения ямочного ремонта по СТО 20651461-02–2018 «Суспензии и холодные битумоминеральные смеси с дисперсным битумом. Технические условия».

Новый фибросодержащий асфальтобетон содержит в своем составе диспергированный битум, готовится по «холодной» технологии – без необходимости нагрева минеральной части асфальта до высокой температуры.

Новые асфальтовые смеси гораздо более просты в изготовлении, затраты энергии на их производство значительно ниже, при этом значительно снижены – в сравнении с традиционными технологиями – объемы вредных выбросов в атмосферу.

Суть инновационного метода в том, что составляющие асфальтобетона – щебень, песок и минеральный порошок – подаются в смеситель асфальтобетонного завода не в нагретом до 160–185°C состоянии, а при температуре окружающей среды. Благодаря этому удается достичь 50% экономии в сравнении с традиционной «горячей» технологией асфальта.

Нагреванию подвергается только битум (до температуры 140–150°C), который необходимо добавить в смесь в количестве 5–6%. На выходе получается продукт, который может использоваться для ремонта и строительства дорожных покрытий, так же как и обычные асфальтовые смеси, и применяться для экстренных работ в холодные периоды года, когда асфальтобетонные заводы не работают.

При этом качество остается на том же уровне, как при использовании обычной горячей асфальтобетонной смеси. Разработанную смесь легко транспортировать: данная технология холодная, она не требует разогревания, и смесь может перевозиться в мешках или пластиковых емкостях. Главное условие – она должна быть защищена от прямых солнечных лучей, чтобы избежать высыхания.

Смесь готовится двумя способами – в одном случае перемешиваются в определенном процентном соотношении щебень, песок, минеральный порошок, горячий битум и немного воды. Во втором – вместо щебня может применяться асфальтовая крошка, что также удешевляет технологию и ее итоговую стоимость.



Рис. 1. Асфальтобетонный завод
Fig. 1. Asphalt concrete plant

Как только смесь выкладывается в ямы, вода начинает испаряться, участок приобретает темный оттенок и твердеет. Автомобили могут ездить по нему уже сразу после укладки, примерно через два часа отремонтированный участок полностью готов к эксплуатации.

В результате получается диспергированная асфальтобетонная смесь, которая в течение ограниченного времени (нескольких часов или суток в зависимости от климатических условий) превращается в новое фазовое состояние, характеризующееся пленочным состоянием вязкого битума, который начинает покрывать частицы минерального материала, растекаясь и прилипая к нему.

Для производства асфальтовых смесей пригодно серийно выпускаемое оборудование с использованием обычно применяемых в горячем асфальтовом бетоне материалов: щебень, песок, минеральный порошок и битум. Асфальтобетонные смеси с диспергированным битумом могут приготавливаться в смесителях принудительного (Д-508, ДС-117-2Е) и свободного перемешивания (Г-1) после оснащения их системой подачи воды в мешалку.

Для повышения эффективности новой технологии из технологической линии следует исключить сушильный барабан и связанное с ним топочное хозяйство, пылеуловительную установку. Из технологического процесса исключаются операции по высушиванию и нагреву щебня и песка.

Подтверждена возможность в производственных условиях применять невыпаренный битум для приготовления асфальтобетонных смесей с диспергированным битумом.

Образцы из смесей, приготовленных на производстве, обладают лучшими свойствами, чем образцы из смесей, приготовленных в лаборатории. Об этом свидетельствуют меньшие показатели водонасыщения, повышенные коэффициенты водоустойчивости. Объяснить это можно тем, что в смесителе АБЗ смеси приготавливаются с меньшим содержанием воды при горизонтальном перемешивании и при



Рис. 2. Технология выполнения работ: *a* – состояние дорожного покрытия с вырубленными картами; *b* – увлажнение водой карты ремонта; *c* – отбор ремонтной смеси из емкости; *d* – распределение ремонтной смеси в карте; *e* – уплотнение ремонтной смеси; *f* – результат ремонта
Fig. 2. Technology of work: *a* – the state of the road surface with holes; *b* – water moistening of holes; *c* – selection of repair mixture from the tank; *d* – is the distribution of the repair mixture in holes; *e* – compaction of repair mixture; *f* – repair result

этом достигается более качественное диспергирование битума и более равномерное распределение его в смеси (рис. 1).

Экспериментальную смесь использовали при заделывании нескольких ям на въезде в Усть-Курдюм. Теперь эти участки находятся под наблюдением (рис. 2).

Участок дороги длиной 2485 м отремонтирован с применением ремонтной асфальтобетонной смеси на основе диспергированного битума. Интенсивность движения транспортных средств средняя. Дорога была отремонтирована в 2017 г. На начало 2019 г. находилась в хорошем состоянии, разрушений дорожного покрытия не было, за исключением температурных трещин; поврежденности отсутствовали.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

1. Технология рекомендуется для расширенного применения для дорог и улиц населенных пунктов, автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения.

2. Достигнутый технический результат – предотвращение сегрегирования (расслоения) и слеживаемости асфальтобетонной или битумно-минеральной композиции при ее хранении и транспортировке и повышение сцепления вяжущего с минеральными материалами асфальтобетонной или битумно-минеральной композиции при ее использовании за счет обеспечения пластических свойств битумного вяжущего и дорожного материала в целом.

3. Результаты испытания асфальтобетона с диспергированным битумом промышленного производства, сформированного в естественных условиях, показали:

– крупнозернистый асфальтобетон по всем показателям удовлетворяет требованиям ГОСТ 9128–84 к пористым асфальтовым бетонам;

– мелкозернистый асфальтобетон по показателям прочности, набухания, водостойкости удовлетворяет требованиям ГОСТ на асфальтобетон II–III марок. Водонасыщение менее чем на 0,5% выше допустимого для III дорожно-климатической зоны;

– мелкозернистый асфальтобетон удовлетворяет всем требованиям ГОСТ 9128–84 на асфальтобетон II марки для IV–V дорожно-климатических зон;

– асфальтобетонные смеси и битумно-минеральные композиции в соответствии с заявленными признаками могут быть также модифицированы путем введения в их состав фиброволокон, например базальтовых, углепластиковых и др., что дает эффект дисперсного однородно распределенного армирования.

4. Авторы заявляют эту технологию как научно-технологический прорыв в битумном хозяйстве и в сегменте автомобильных дорог общего пользования с низкой интенсивностью движения.

5. Выпуск и применение асфальтобетонных смесей по данной технологии позволит улучшить показатели физико-механических свойств асфальтобетонных, снизить колеобразование и скорость образования дефектов асфальтобетонных покрытий, а также значительно увеличить межремонтный период дорожных покрытий.

6. По отношению к классической технологии горячего асфальтобетона новая технология имеет следующие преимущества:

– энергосберегающая: позволяет экономить до 25 кг топочного мазута (до 20 м³ природного газа), 4 кВт/ч электроэнергии на 1 т асфальтовой смеси;

– экологически чистая: благодаря холодному и влажному режиму приготовления асфальтовой смеси практически полностью исключается выброс в атмосферу вредных веществ, снижается уровень шума, выделение тепла;

– трудосберегающая: исключается необходимость обслуживать сушильный барабан, форсунку, пылеуловительную установку, топочное хозяйство;

– материалосберегающая: снижается металлоемкость АБЗ, расход минерального порошка, расширяется диапазон использования в асфальте порошкообразных побочных продуктов промышленности и др.

Технология способствует решению важных социальных проблем. Народнохозяйственный эф-

фект от ее внедрения с учетом других достоинств (снижение себестоимости, холодный способ производства работ, возможность складирования и длительного хранения смесей и др.) составляет до 50% по сравнению с технологией горячего асфальтового бетона.

Технология рекомендуется для расширенного применения для дорог и улиц населенных пунктов, автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения.

Список литературы

1. Патент РФ №2285707. *Способ изготовления битумосодержащих смесей с минеральным компонентом* / Светенко А.В., Строчков К.М., Горнаев Н.А. 2005.
2. Андронов С.Ю. Технология дисперсно-армированного композиционного холодного щебеночно-мастичного асфальта // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. №. 4. С. 67–71.
3. Горнаев Н.А. Технология асфальта с дисперсным битумом. Саратов, 1997. 61 с.
4. Горнаев Н.А., Калашников В.П. Эмульгирующая способность минеральных порошков // *Проблемы транспорта и транспортного строительства: Межвузовский научный сборник*. Саратов: СГТУ, 2004. С. 156–158.
5. Горнаев Н.А., Строчков К.М. Стабилизация битумных эмульсий на твердых эмульгаторах // *Проблемы транспорта и транспортного строительства: Межвузовский научный сборник*. Саратов: СГТУ, 2004. С. 164–167.
6. А. с. 883221 СССР. *Способ приготовления битумо-минеральной смеси*. Горнаев Н.А., Калашников В.П., Иванов А.Ф. 1981.
7. Патент РФ № 2351703. *Способ приготовления холодной органоминеральной смеси для дорожных покрытий* / Горнаев Н.А., Никишин В.Е., Евтеева С.М., Андронов С.Ю., Пыжов А.С. 2009.
8. Патент РФ № 2662493. *Способ получения битумной эмульсии и битумная эмульсия* / Кочетков А.В. 2018.
9. Кочетков А.В. Битумная суспензия на твердом эмульгаторе // *Транспортные сооружения*. 2018. № 4. DOI: 10.15862/15SATS418.
10. Di Yu, Wensheng Wang, Yongchun Cheng, Yafeng Gong, Laboratory investigation on the properties of asphalt mixtures modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2016. Vol. 3. Iss. 5, pp. 412–426. DOI: 10.1016/j.jtte.2016.09.002.
11. Yongchun Cheng, Di Yu, Guojin Tan, Chunfeng Zhu. Low-temperature performance and damage constitutive model of eco-friendly basalt fiber-

References

1. Patent RF No. 2285707. *Sposob izgotovleniya bitumosoderzhashchikh smesei s mineral'nyim komponentom* [A method of manufacturing bitumen mixtures with a mineral component. Svetenko A.V., Strachkov K.M., Gornaev N.A. 2005. (In Russian).
2. Andronov S.Yu. The technology of dispersed-reinforced composite cold gravel-mastic asphalt. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 4, pp. 67–71. (In Russian).
3. Gornaev N.A. Tekhnologiya asfal'ta s dispersnym bitumom [Asphalt technology with dispersed bitumen]. Saratov. 1997. 61 p.
4. Gornaev N.A., Kalashnikov V.P. Emulsifying ability of mineral powders. *Problems of transport and transport construction: interuniversity scientific collection*. Saratov: SSTU. 2004, pp. 156–158. (In Russian).
5. Gornaev N.A., Strachkov K.M. Stabilization of bitumen emulsions on solid emulsifiers. *Problems of transport and transport construction: interuniversity scientific collection*. Saratov: SSTU. 2004, pp. 164–167. (In Russian).
6. Copyright certificate 883221 of the USSR. *Sposob prigotovleniya bitumomineral'noi smesi* [A method of preparing a bitumen-mineral mixture]. Gornaev N.A., Kalashnikov V.P., Ivanov A.F. 1981. (In Russian).
7. Patent RF No. 2351703 *Sposob prigotovleniya kholodnoi organomineral'noi smesi dlya dorozhnykh pokrytii* [A method of preparing a cold organic-mineral mixture for road surfaces]. Gornaev N.A., Nikishin V.E., Evteeva S.M., Andronov S.Yu., Pyzhov A.S. 2009. (In Russian).
8. Patent RF No. 2662493 *Sposob polucheniya bitumnoi emul'sii i bitumnaya emul'siya* [A method of obtaining a bitumen emulsion and bitumen emulsion]. Kochetkov A.V. 2018. (In Russian).
9. Kochetkov A.V. Bituminous suspension on a solid emulsifier. *Transportnye sooruzheniya*. 2018. No. 4. DOI: 10.15862/15SATS418.
10. Di Yu, Wensheng Wang, Yongchun Cheng, Yafeng Gong, Laboratory investigation on the properties of asphalt mixtures modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2016. Vol. 3. Iss. 5, pp. 412–426. DOI: 10.1016/j.jtte.2016.09.002.

- diatomite-modified asphalt mixture under freeze–thaw cycles // *Materials*. 2018. Vol. 11 (11), 2148. DOI: 10.3390/ma11112148.
12. Clara Celauro, Filippo Praticò. Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 170, pp. 245–253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058
 13. Yafeng Gong, Haipeng Bi, Chunyu Liang, Shurong Wang. Microstructure analysis of modified asphalt mixtures under freeze–thaw cycles based on ct scanning technology // *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8 (11):2191. DOI: 10.3390/app8112191
 14. Xiao Qin, Aiqin Shen, Yinchuan Guo, Zhennan Li. Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 159, pp. 508–516. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012.
 15. Yafeng Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan. Pavement performance investigation of nano-TiO₂/CaCO₃ and basalt fiber composite modified asphalt mixture under freeze–thaw cycles // *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8 (12):2581. DOI: 10.3390/app8122581.
 11. Yongchun Cheng, Di Yu, Guojin Tan, Chunfeng Zhu. Low-temperature performance and damage constitutive model of eco-friendly basalt fiber–diatomite-modified asphalt mixture under freeze–thaw cycles. *Materials*. 2018. Vol. 11 (11), 2148. DOI: 10.3390/ma11112148.
 12. Clara Celauro, Filippo Praticò. Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 170, pp. 245–253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058
 13. Yafeng Gong, Haipeng Bi, Chunyu Liang, Shurong Wang. Microstructure analysis of modified asphalt mixtures under freeze–thaw cycles based on ct scanning technology. *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8 (11):2191. DOI: 10.3390/app8112191
 14. Xiao Qin, Aiqin Shen, Yinchuan Guo, Zhennan Li. Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 159, pp. 508–516. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012.
 15. Yafeng Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan. Pavement performance investigation of nano-TiO₂/CaCO₃ and basalt fiber composite modified asphalt mixture under freeze–thaw cycles. *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8 (12):2581. DOI: 10.3390/app8122581.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

В издательстве «Стройматериалы» вы можете приобрести специальную литературу

Книга «Химическая технология керамики»

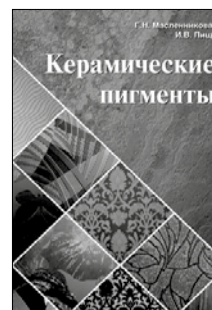
Авторы – коллектив ученых РХТУ им. Д.И. Менделеева, под редакцией И.Я. Гузмана.

В пособии освещены вопросы современного состояния технологии основных видов керамических изделий строительного, хозяйственно-бытового и технического назначения, а также различных видов огнеупоров. Книга соответствует программе общего курса химической технологии керамики и огнеупоров при наличии также курсов соответствующих специализаций. Подробно изложены характеристика сырья, проблемы подготовки керамических масс и их формование, особенности механизмов спекания, а также дополнительные виды обработки керамики: металлизация, глазурование, декорирование, механическая обработка. Описаны механические, деформационные, теплофизические, электрофизические свойства керамических изделий, в том числе при высокой температуре.

**Книга «Керамические пигменты»**

Авторы – Масленникова Г.Н., Пищ И.В.

В монографии рассмотрены физико-химические основы синтеза пигментов, в том числе термодинамическое обоснование реакций, теория цветности, современные методы синтеза пигментов и их классификация, методы оценки качества. Приведены сведения по технологии пигментов и красок различных цветов и кристаллических структур. Описаны современные методы декорирования керамическими красками изделий из сортового стекла, фарфора, фаянса и майолики. Книга предназначена для научных сотрудников, студентов, специализирующихся в области технологии керамики и стекла, а также для инженерно-технических работников, занятых в производстве керамических изделий и красок.



Заказать литературу можно через редакцию, направив заявку произвольной формы по e-mail: mail@rifsm.ru или оформить заявку на сайте www.rifsm.ru

А.В. КОРОЧКИН, канд. техн. наук (andrey_korochkin@mail.ru)

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) (125319, г. Москва, Ленинградский пр., 64)

Дорожные одежды из композитных материалов

Представлен обзор видов дорожного покрытия из композитных материалов, появившихся в последнее время. В основе их производства лежит сырье, полученное от переработки отслуживших свое изделий из пластика (пластиковые бутылки, стаканы, упаковка и т. д.). Приведены примеры улучшения свойств асфальтобетонных смесей модификаторами, основными составляющими которых является переработанный пластик. Показан опыт зарубежных стран по строительству и эксплуатации автомобильных дорог с покрытием из модифицированного пластиком асфальтобетона. Дан анализ применения модифицированного асфальтобетона в Российской Федерации и причин, которые ограничивают использование новых технологий при строительстве автомобильных дорог в нашей стране. Рассматривается вопрос о возможности строительства автомобильных дорог, улиц, тротуаров и велодорожек из готовых полых пластиковых плит, которые позволяют не только организовать движение автомобилей и пешеходов, но и без дополнительных затрат прокладывать под тротуарами и дорогами коммуникации, устраивать водоотвод, устанавливать датчики и т. д. Также представлена информация о мобильных пластиковых покрытиях, выпускаемых российскими производителями. Сформулированы выводы о необходимости организации сбора пластиковых отходов и создания предприятий для переработки их в сырье, пригодное для применения в строительной отрасли, а также о необходимости проведения исследований для оценки использования нетрадиционных видов покрытий в дорожном строительстве.

Ключевые слова: дорожная одежда, полимерные строительные материалы, альтернативные виды покрытий, основание, транспортно-эксплуатационные качества, экологичность.

Для цитирования: Корочкин А.В. Дорожные одежды из композитных материалов // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 68–74. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-68-74>

A.V. KOROCHKIN, Candidate of Sciences (Engineering) (andrey_korochkin@mail.ru)

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (64, Leningradsky Avenue, Moscow, 125319, Russian Federation)

Road Pavements Made of Composite Materials

An overview of the types of road pavements made of composite materials that have appeared recently is presented. Their production is based on raw materials obtained from the processing of used plastic products (plastic bottles, glasses, packaging, etc.). Examples of improving the properties of asphalt concrete mixtures with modifiers, the main components of which are recycled plastic are given. The experience of foreign countries in the construction and operation of roads with a pavement of plastic-modified asphalt concrete is shown. An analysis of the use of modified asphalt concrete in the Russian Federation and the reasons that limit the use of new technologies in the construction of roads in our country is given. The possibility of building roads, streets, foot walks and bike paths from ready-made hollow plastic plates that make it possible not only to organize the movement of cars and pedestrians, but also to lay communications under foot walks and roads, organize drainage, install sensors, and so on without additional costs, is considered. Information about mobile plastic coatings produced by Russian manufacturers is also provided. Conclusions are formulated about the need to organize the collection of plastic waste and create enterprises for their processing into raw materials suitable for use in the construction industry, as well as the need to conduct research to assess the use of non-traditional types of pavements in road construction.

Keywords: road pavement, polymer construction materials, alternative types of pavements, base, transport and operational qualities, environmental friendliness.

For citation: Korochkin A.V. Road pavements made of composite materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 68–74. (In Russian).

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-68-74>

С тех пор как в 1832–1835 гг. в Париже впервые для мощения улиц был применен асфальтобетон и примерно в те же годы появился цементобетон в том виде, что известен нам сейчас, два этих строительных материала остаются основными составляющими конструкций дорожных одежд [1]. И вот уже на протяжении почти двух веков практически все автомобильные дороги с твердым покрытием, построенные за этот период, имеют асфальтобетонное или цементобетонное покрытие [2–9 и др.].

Тем не менее поиск альтернативных видов покрытий никогда не прекращался. Получить более дешевый и в то же время прочный и долговечный строительный материал стремятся все специалисты в области дорожного строительства. Как правило, исследования идут по двум направлениям: во-первых, модернизация уже известного строительного

материала с улучшением его основных свойств [10–12 и др.] и, во-вторых, замена традиционных материалов на новые альтернативные, ранее не применяющиеся [13–15]. Причем и в первом и во втором случаях внимание многих исследователей в последнее время все чаще обращается к возможности вторичного использования материалов, традиционно отправляемых на утилизацию. В первую очередь это касается изделий из пластика (пластиковые бутылки и другие емкости, одноразовая посуда, упаковочные материалы и т. д.). Современные технологии без особых проблем позволяют перерабатывать пластиковый мусор в качественные термопластичные материалы (вторично переработанная пластмасса) [16], которые являются основой композитов. И эти композитные материалы находят широкое применение в разных отраслях хозяйства как за

рубежом, так и в нашей стране [17], в том числе и в дорожном строительстве.

Модификация асфальтобетона переработанным пластиком

В 2002 г. компания из Индии KK Plastic Waste Management Ltd получила патент на использование технологии асфальтирования дорог материалами, содержащими переработанные отходы из пластика. На сегодняшний день специальный завод в г. Бенгалуру, на юге Индии, выпускает до 30 т переработанной пластмассы в сутки. Разработанная за пять лет инженерами технология позволяет создавать полимерную смесь, получившую название KK Poly Blend, способную заменить до 8% битума при приготовлении асфальтобетонов, а также улучшить характеристики самого дорожного покрытия. Исходным сырьем для приготовления модифицирующей смеси являются полиэтиленовые продукты. Как правило, это использованные пластмассовые бутылки, стаканы, пакеты и др. Согласно исследованиям, срок службы модифицированных покрытий был увеличен вдвое, что позволило компании построить почти 2000 км дорог на базе нового материала, переработав при этом около 8 тыс. т вторичных пластиковых отходов.

Разработанная в Индии технология также нашла применение и за ее пределами. Шотландская компания McRebur запатентовала новую технологию высокоэффективных модифицированных добавок, получаемых из той же переработанной пластмассы, которые используются при приготовлении асфальтобетонных смесей путем добавления в битум в виде гранул или хлопьев [18]. Компания GreenMantra из Канады, работающая на дорожно-строительном рынке в Северной Америке, представила свой инновационный способ использования переработанного пластика, позволяющий получать материалы с содержанием пластмассы до 20% в составе.

Создание модифицированного материала с применением переработанного пластика включает в себя следующие этапы:

1. Сбор, распределение и очистка исходного (пластикового) сырья.
2. Измельчение и помол полимерных материалов.
3. Смешивание битума с подготовленной ранее пластиковой добавкой.
4. Нагрев модифицированной смеси с последующим нанесением ее на заполнитель (при соответствующей температуре 160°C).

Полученная модифицированная асфальтобетонная смесь укладывается на подготовленное основание стандартным способом, при использовании асфальтоукладчиков и катков для создания идеально ровного покрытия (рис. 1).

Среди преимуществ использования модифицированных покрытий с использованием пластика стоит отметить такие, как:

- повышенная прочность покрытия;
- высокая водостойкость;



Рис. 1. Автомобильная дорога в Шотландии, построенная с применением переработанного пластика
Fig. 1. The road in Scotland, built with the use of recycled plastic

- увеличение сроков необходимых межремонтных работ;
- существенное снижение затрат на ремонт и эксплуатацию;
- повышенная прочность на растяжение;
- возможность эксплуатации модифицированных покрытий при температуре в диапазоне от -40 до 80°C;
- хорошее сцепление колес автомобиля с дорожным покрытием;
- повышенная устойчивость к пагубному воздействию пролившегося машинного масла и топлива;
- высокое сопротивление деформации и отсутствие возможности возникновения колеи;
- уменьшение количества возникающих разрушений;
- увеличенный общий срок эксплуатации дорожного покрытия.

Среди преимуществ применения данных модифицированных покрытий в городской среде следует подчеркнуть следующее:

- существенное снижение затрат на ремонт и эксплуатацию покрытий;
- минимальное количество финансовых затрат на модернизацию и переустройство существующих АБЗ;
- более низкая стоимость инновационных покрытий с применением переработанных пластиковых материалов по сравнению с применением модифицированных видов битумной эмульсии;
- вторичное использование пластмассовых отходов позволит снизить нагрузку на существующие мусорные полигоны и свалки, что в свою очередь снизит расходы на утилизацию мусора.

Важно отметить, что применение данных технологий при строительстве дорог в крупных городах повысит их социальный и экономический статус [18].

Использование продуктов переработки пластмассы в составе асфальтобетонных смесей также имеет и ряд недостатков по сравнению с обычными покрытиями:

1. Стоимость приготовления смеси с помощью новых технологий дорожке обычного рядового асфальтобетона примерно на 3–5%.

2. Воздействие постоянно высокой температуры способно ухудшить эксплуатационные характеристики покрытия.

3. В настоящее время отсутствует какая-либо нормативная база для внедрения данных технологий, поэтому их применение на практике связано с различными пилотными и экспериментальными проектами.

4. Для повсеместного и общего использования данных инновационных технологий необходимо получение больших объемов исходного сырья для переработки, что подразумевает наличие спланированной системы разделения мусорных отходов в обществе, создание предприятий по их переработке.

В России технологии применения переработанных полимерных материалов в дорожном строительстве разрабатывала компания «Роснано». Была создана программа «Инновационная дорога», в рамках которой новые покрытия должны были быть использованы при строительстве магистралей в Татарстане, Москве, Рязанской области. Проект остался на стадии разработки, столкнувшись с необходимостью корректировки ГОСТов, СНИПов, технических регламентов.

В РФ существуют полимерные добавки, улучшающие качество покрытия автомобильных дорог, которые, в частности, выпускаются компанией «СИБУР Холдинг». И даже существуют нормативные документы, определяющие порядок использования полимерных модификаторов при производстве асфальтобетона: ГОСТ 9128–2013 «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов». Причем применяются асфальтобетонные смеси на основе полимерных вяжущих и в нежестких дорожных одеждах [20], и в дорожных одеждах жесткого типа в качестве слоев износа [21]. Вот только эти полимербитумные вяжущие производятся из товарных нефтепродуктов. Рециклинг пластика в компании не внедряется, объясняется это высокими затратами и отсутствием в стране реализованных технологий по массовому сбору полимерных отходов.

Покрытия из пластика

Данная технология позволяет полностью заменить традиционную дорожную одежду покрытием, изготовленным из пластика.

Применение пластмассосодержащих покрытий в дорожном строительстве представляет собой новейшие инновационные идеи, которые призваны не только улучшить состояние дорожного полотна, но и повысить уровень экологии. Не исключено, что в будущем при строительстве автомобильных дорог и тротуаров данные новейшие модифицированные материалы смогут полностью заменить собой привычно используемые асфальтобетонные покрытия. Уже в наши дни можно встретить примеры повсеместного внедрения рассматриваемых технологий. Так, на-



Рис. 2. Открытие движения по «пластиковой» велодорожке в г. Зволле (Нидерланды)
Fig. 2. The opening of the movement along a plastic-coated bicycle path in Zwoll (Netherlands)

пример, в некоторых городах Исландии местные администрации позволили компаниям ReSource International и Jamie McQuilkin провести исследования, которые должны ответить на вопрос, возможно ли существующие асфальтобетонные покрытия полностью заменить на покрытия из переработанного пластика.

А в октябре 2018 г. в Нидерландах появилась первая в мире велосипедная пластиковая дорожка (рис. 2). Причем вся она сделана из переработанного пластика (<https://humanstory.ru/ecology/dorogi-plasik-360>). На дорожку с двумя полосами длиной 30 м ушло полмиллиона пластиковых крышечек от бутылок. Как говорят специалисты, дорожка из пластика будет в два-три раза долговечнее, чем обычный асфальт.

Велодорожка состоит из полых модульных панелей. Партию легких сборных секций привозят на место для установки и там соединяют вместе, поэтому на создание такого покрытия тратится на 70% меньше времени, чем при прокладке традиционной дороги из асфальта.

Модульные сегменты выполняют несколько функций: внутри их может собираться и временно храниться дождевая вода при большом количестве осадков (например, во время наводнений). Кроме того, в них достаточно места для размещения кабелей и труб.

По мнению специалистов, пластиковое покрытие долговечно, устойчиво к появлению выбоин и трещин и практически нечувствительно к таким естественным явлениям, как погодные условия и сорняки. Дорожка не требует особого обслуживания, а если сильно повредится или придет в негодность, ее можно снять и повторно переработать.

Поскольку проект в Зволле является пробным, перед установкой модули были оснащены набором датчиков. С их помощью эксперты смогут наблюдать различные показатели: температуру, производительность и долговечность, а также количество велосипедистов, которые проезжают по дорожке в течение суток. PlasticRoad отмечают, что по причине наличия датчиков это не только первая в мире велосипедная



Рис. 3. «Пластиковые» дороги будущего
Fig. 3. «Plastic» roads of the future

дорожка, построенная из пластмассовых отходов, но и первая в мире «интеллектуальная велодорожка». Основываясь на показаниях датчиков, строительная компания сможет совершенствовать технологию.

Среди преимуществ таких покрытий следует особо отметить следующие:

1. Производство дорожных полимерных плит не требует особых технологий, а транспортировка и укладка таких плит значительно проще транспортировки и укладки их железобетонных аналогов.

2. Использование в строительстве подобных покрытий, имеющих в своем составе продукты вторичной переработки мусорных отходов, благоприятно влияет на экологию и состояние окружающей среды, так как производство материала в каком-то смысле представляет собой утилизацию пластмассовых отходов, их переработку и повторное использование.

3. В сравнении с асфальтобетонными покрытиями «пластиковые дороги» имеют ряд преимуществ в транспортно-эксплуатационных и физических свойствах. Среди них высокая плотность и износостойкость материала, стойкость к погодным явлениям и температурным перепадам, большой уровень службы и легкость в монтаже и последующей эксплуатации.

4. Среди преимуществ использования пластиковых полимерных плит в городской среде является то, что прокладка и демонтаж инженерных коммуникаций могут производиться без полного разбора дорожной одежды, так как конструкция полимерных плит включает в себя специальные полости для размещения в них инженерных сетей.

5. Использование вторичных материалов в производстве значительно снижает стоимость строительства.

Стоит отметить, что строительство «пластиковых дорог» будет занимать не месяцы работы, а все лишь недели. Монтаж и транспортировка панелей не требуют особых усилий и затрат. Легкость материала позволяет его устройство на любом виде почв, а плотность и толщина без проблем выдерживают нагрузку от движения грузового транспорта или любого другого интенсивного транспортного потока, при этом не вызывая просадку грунта.

К предполагаемым минусам, которые останавливают производство дорог пластикового типа, можно отнести: скольжение во время дождя и дру-



Рис. 4. Площадка из мобильных дорожных пластиковых плит
Fig. 4. Playground from mobile road plastic plates

гих осадков (из-за уменьшения силы трения пластика), попадание воды в полость плиты и возможность заморозки и разрыва плиты, малую огнестойкость покрытия, горизонтальные сдвиги при эксплуатации.

На сегодняшний момент к таким дорогам вопросов больше, чем ответов. Но сама идея интересна и требует дальнейших исследований (рис. 3).

Мобильные пластиковые покрытия

В отличие от гипотетических «пластмассовых дорог» Нидерландов пластиковые дорожные покрытия в виде полимерных дорожных плит достаточно широко применяются в России. Плиты мобильные, неполюе и крепятся между собой замковой системой штырь—отверстие (рис. 4). Уже существует пять видов плиты с тремя типами замковых систем, но, по сути, все они универсальны; монтаж не предполагает специальных знаний. Для монтажа одной плиты достаточно двух—четырех человек. После проезда транспорта плиты демонтируются и используются повторно. Такие дороги часто используются при необходимой временной или полноценной замене дорог с твердым покрытием при строительстве газо- или нефтепроводов в зоне вечной мерзлоты, на заболоченных местностях, в тайге, лесотундре или тундре [22], для защиты грунта, почвы и газона, для покрытия размытых дорог или в качестве пешеходных дорожек, для организации временных площадок.

Основные преимущества мобильных дорожных покрытий:

- повышенная прочность — композитные плиты выдерживают автомобильную и гусеничную технику весом до 80 т;
- высокая скорость строительства (1 км дороги шириной 6 м за 48 раб. ч);
- многократное повторное использование;
- положительная плавучесть позволяет строить временные дороги в условиях болот 1-го —2-го типов;

**Технические характеристики
Specifications**

Показатель	Значение
Погонная изгибная жесткость, кНм	> 200
Нормативная нагрузка:	
локальная опорная, т	ЛО-40
нагрузка осевая, т	НО-40
нагрузка гусеничная, т	НГ-120
Нагрузка колесная (соответствие класса нагрузки от тяжеловесных транспортных средств по ГОСТ 52748-07), т	НК-80
Автомобильная нагрузка (соответствие класса нагрузки от тяжеловесных транспортных средств по ГОСТ 52748-07), т	АК-11,5
Нагрузка пешеходная велосипедная (соответствие нагрузки по ГОСТ 52748-07), т/м ²	НПВ-0,4
Габариты	
	Вес
4000×2000×100 мм	400 кг
1200×1200×100 мм	110 кг

- малый вес плиты (650 кг) делает возможным монтаж любыми погрузо-разгрузочными механизмами и экономит денежные средства на транспортировку;

- модульная конструкция позволяет осуществлять свободный выбор конфигурации поверхности с учетом особенностей местности;

- морозо- и жаростойкость обеспечивают возможность применения в любых климатических условиях;

- повышенная прочность и гибкость плит позволяют монтировать МДП при минимальной подготовке поверхности грунта;

- низкое удельное давление плит на грунт гарантирует целостность растительного покрова после демонтажа.

Долговечность и эффективность использования мобильных полимерных дорожных покрытий гарантируются при соблюдении технологии монтажа и дальнейшего обслуживания.

В настоящее время пластиковые дорожные плиты выпускаются несколькими промышленными предприятиями. Так, компания «Техполимер» (г. Красноярск) предлагает мобильные дорожные покрытия «МДП-Техполимер-1», «МДП-Техполимер-2» и «МДП-Техполимер-3» с техническими характеристиками, представленными в таблице.

Также в России имеются и другие производители, например выпускаются плиты КДМ-Изолайт, КДМ-Изотрак, КДМ-ЭКС, плиты СРДП и др.

К сожалению, государственного стандарта на производство пластиковых плит не существует, и данный вид продукции выпускается в соответствии с техническими условиями (ТУ), разработанными самими производителями.

Выводы

Идея использования твердых отходов для производства строительных материалов не нова. Однако в последние годы в связи с остро вставшими во всем мире вопросами сохранения окружающей среды они имеют особое значение. В первую очередь это касается утилизации мусора, имеющего длительный цикл разложения, в том числе пластика. В статье приведены примеры удачного использования переработанных пластиковых отходов в дорожном строительстве, на основании чего можно сделать следующие выводы, касающиеся развития данных направлений в Российской Федерации:

1. Использование пластиковых (полимерных) материалов в дорожной одежде является одним из направлений, рассматриваемых для решения глобальных задач – повышения прочности, долговечности и транспортно-эксплуатационных параметров автомобильных дорог. Насколько перспективным и эффективным окажется данное направление, покажет время и дальнейшие исследования.

2. Применение переработанного пластика для модификации асфальтобетонных смесей и частичной замены им битума является весьма ценной идеей. К сожалению, этим вопросам практически не уделяется внимание. И это при том, что модифицированный асфальтобетон в Российской Федерации применяется давно и успешно. Но проблема заключается в том, что в настоящее время не отлажен отдельный сбор мусора, который позволил бы отделять пластиковые отходы, а также отсутствуют предприятия, способные перерабатывать пластик в нужное сырье. Тем не менее комплексные исследования в этой области экологов совместно со строителями могли бы аргументированно доказать экономическую и социальную выгоду данного направления.

3. Идея устройства дорожного покрытия из полых пластиковых плит достаточно интересна. Об использовании их в качестве замены асфальтобетона на проезжей части говорить пока рано. Но в отношении велодорожек и тротуаров данная конструкция может оказаться достаточно перспективной. Тем более что технологически это не должно представлять больших трудностей, принимая во внимание выпуск в нашей стране пластиковых плит для устройства временных дорог и площадок. Поэтому исследования в этом направлении могут дать интересные результаты и позволят оценить экономическую целесообразность данных решений.

4. Следует также отметить важную роль во всех представленных начинаниях экологической составляющей. По данным статистики, в год каждый житель России производит 400 кг отходов. Это – 40 млн т мусора со всей страны, 93% которого вывозится на полигоны и свалки. Поэтому возможность переработки хотя бы части собираемого мусора в сырье для производства дорожно-строительных материалов и изделий весьма актуален.

Список литературы

1. Коршак А.А., Шаммазов А.М. Основы нефтегазового дела. 2-е изд., доп., испр. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2002. 528 с.
2. Корочкин А.В. Сдвигоустойчивость асфальтобетонных слоев жесткой дорожной одежды // *Строительные материалы*. 2014. № 1–2. С. 65–67.
3. Ушаков В.В., Макаров Е.Н. Подготовка цементобетонных покрытий автомобильных дорог к перекрытию слоями асфальтобетона // *Транспортное строительство*. 2011. № 3. С. 14–15.
4. Носов В.П. Основные тенденции в строительстве цементобетонных покрытий на автомобильных дорогах // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2011. № 4 (59). С. 1–3.
5. Янковский Л.В., Кочетков А.В. Эксплуатационная надежность цементобетонных автомобильных дорог с позиции теории рисков // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности*. 2012. № 2. С. 63–69.
6. Ушаков В.В. О расширении строительства автомобильных дорог с цементобетонными покрытиями // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2003. № 3 (26). С. 7–8.
7. Меренцова Г.С. О целесообразности использования пропиточных составов для защиты и восстановления свойств асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // *Ползуновский вестник*. 2014. № 1. С. 100–103.
8. Щепетева Л.С., Семенов С.С. Об эффективности применения полимерно-битумных вяжущих в асфальтобетонных смесях для строительства покрытий автомобильных дорог // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2014. № 4. С. 138–152.
9. Якушев Н.М., Романов Е.Ю. Цементобетонные дороги в России. Сравнение с асфальтобетонным покрытием // *Фотинские чтения*. 2017. № 1 (7). С. 161–165.
10. Тюрюханов К.Ю., Пугин К.Г. Исследование взаимодействия битума с минеральными частицами в асфальтобетоне // *Транспортные сооружения*. 2018. Т. 5. № 1. С. 19.
11. Траутвайн А.И., Акимов А.Е., Денисов В.П., Лашин М.В. Особенности метода объемного проектирования асфальтобетона по технологии Superpave // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2019. № 3. С. 8–14.
12. Старков Г.Б., Воронин А.Н. Эффективные полимерные материалы // *Мир дорог*. 2018. № 106. С. 64–65.
13. Головкин С.В., Павленко В.А. «Солнечная дорога» – дорога будущего // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2019. № 1 (67). С. 37–43.
14. Кудряшова Г.Н., Смирновская А.М., Еремеев А.В. Солнечная дорога. путь к водо- и ресурсосбереже-

References

1. Korshak A.A., Shammazov A.M. *Osnovy neftegazovogo dela. Izdaniye vtoroye, dopolnennoye i ispravlennoye* [Basics of oil and gas business. Second edition, amended and amended]. Ufa: DesignPolygraphService. 2002. 528 p.
2. Korochkin A.V. Steadiness of asphalt concrete layers of rigid road pavement against displacement. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 1–2, pp. 65–67. (In Russian).
3. Ushakov V.V., Makarov E.N. Preparation of cement concrete coatings of roads for overlapping layers of asphalt concrete. *Transportnoye stroitel'stvo*. 2011. No. 3, pp. 14–15. (In Russian).
4. Nosov V.P. The main trends in the construction of cement concrete coatings on highways. Science and technology in the road industry. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli*. 2011. No. 4 (59), pp. 1–3. (In Russian).
5. Yankovsky L.V., Kochetkov A.V. The operational reliability of cement concrete roads from the perspective of risk theory. *Vestnik of the Perm National Research Polytechnic University. Environmental protection, transport, life safety*. 2012. No. 2, pp. 63–69. (In Russian).
6. Ushakov V.V. On the expansion of the construction of roads with cement concrete coatings. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli*. 2003. No. 3 (26), pp. 7–8. (In Russian).
7. Merentsova G.S. On the feasibility of using impregnating compositions for the protection and restoration of the properties of asphalt concrete coatings of roads. *Polzunovskiy vestnik*. 2014. No. 1, pp. 100–103. (In Russian).
8. Schepetova L.S., Semenov S.S. On the effectiveness of the use of polymer-bitumen binders in asphalt mixtures for the construction of road coatings. *Transport. Transportnyye sooruzheniya. Ekologiya*. 2014. No. 4, pp. 138–152. (In Russian).
9. Yakushev N.M., Romanov E.Yu. Cement concrete roads in Russia. Comparison with asphalt concrete coating. *Fotinskiye chteniya*. 2017. No. 1 (7), pp. 161–165. (In Russian).
10. Tyuryukhanov K.Yu., Pugin K.G. The study of the interaction of bitumen with mineral particles in asphalt. *Transportnyye sooruzheniya*. 2018. Vol. 5. No. 1. p. 19. (In Russian).
11. Trautvain A.I., Akimov A.E., Denisov V.P., Lashin M.V. Features of the method of volumetric design of asphalt concrete using Superpave technology. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2019. No 3, pp. 8–14. (In Russian).
12. Starkov G.B., Voronin A.N. Effective polymer material. *Mir dorog*. 2018. No. 106, pp. 64–65. (In Russian).
13. Golovko S.V., Pavlenko V.A. “Sunny road” is the road of the future. *Vestnik of the Astrakhan State Technical University*. 2019. No. 1 (67), pp. 37–43. (In Russian).
14. Kudryashova G.N., Smirnovskaya A.M., Eremeev A.V. Sunny road. way to water and resource con-

- нию // *Техника и технологии мира*. 2015. № 8–9. С. 45–51.
15. Поезжаева Е.В., Иванов Н.К., Шаякбаров И.Э. Диагностирование дороги из пластика // *Строительные и дорожные машины*. 2017. № 1. С. 47–49.
 16. Михайлова К.В. Современные технологии по переработке пластмассовых отходов // *Молодой ученый*. 2016. № 9.1. С. 49–50.
 17. Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Современные полимерные композиционные материалы и их применение // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2018. № 5–1. С. 245–256.
 18. Yue Huang, Oliver Heidrich, Roger Bird. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements // *Resources Conservation and Recycling*. 2007. Vol. 52 (1), pp. 78–73. DOI: 10.1016/j.resconrec.2007.02.002
 19. Flintsch G.W., Diefenderfer B.K., Nunez O. Composite pavement systems: synthesis of design and construction practices. Final contract report VTRC 09-CR2. Virginia Tech Transportation Institute. 2008. http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/09-cr2.pdf
 20. Корочкин А.В. Анализ силового воздействия транспортных средств на дорожную одежду // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2015. № 6. С. 40–46.
 21. Корочкин А.В. Износ жестких дорожных одежд с асфальтобетонным покрытием // *Строительные материалы*. 2012. № 3. С. 66–67.
 22. Баранник А.Ю., Федорков В.И., Архипенко А.А. Технологии и результаты опытной эксплуатации в системе МЧС России мобильных дорожных покрытий на переувлажненных грунтах и болотах I, II типа. Технологии гражданской безопасности // *Технологии гражданской обороны*. 2015. № 4 (46). С. 50–53.
 23. Poeszhaeva E.V., Ivanov N.K., Shayakbarov I.E. Diagnosis of plastic roads. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny*. 2017. No. 1, pp. 47–49. (In Russian).
 24. Mikhailova K.V. Modern technologies for the processing of plastic waste. *Molodoy ucheniy*. 2016. No. 9.1, pp. 49–50. (In Russian).
 25. Kolosova A.S., Sokolskaya M.K., Vitkalova I.A., Torlova A.S., Pikalov E.S. Modern polymer composite materials and their application. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2018. No. 5–1, pp. 245–256. (In Russian).
 26. Yue Huang, Oliver Heidrich, Roger Bird. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources Conservation and Recycling*. 2007. Vol. 52 (1), pp. 78–73. DOI: 10.1016/j.resconrec.2007.02.002
 27. Flintsch G.W., Diefenderfer B.K., Nunez O. Composite pavement systems: synthesis of design and construction practices. Final contract report VTRC 09-CR2. Virginia Tech Transportation Institute. 2008. http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/09-cr2.pdf
 28. Korochkin A.V. Analysis of the power effect of vehicles on pavement. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*. 2015. No. 6, pp. 40–46. (In Russian).
 29. Korochkin A.V. Wear of hard pavement with asphalt concrete coating. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 3, pp. 66–67. (In Russian).
 30. Barannik A.Yu., Fedorkov V.I., Arkhipenko A.A. Technologies and results of trial operation of mobile pavements on waterlogged soils and swamps of type I and II in the system of the Ministry of Emergencies of Russia. Civil Security Technologies. *Tekhnologii grazhdanskoj oborony*. 2015. No. 4 (46), pp. 50–53. (In Russian).

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА



Книга «Технология производства стеновых цементно-песчаных изделий»

Балакшин Ю.З., Терехов В.А. М.: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ», 2012. 276 с.

В книге описано производство и применение стеновых материалов методом вибропрессования из цементно-песчаных бетонов. Рассмотрена существующая и перспективная номенклатура изделий и их свойства. Описаны сырьевые материалы для производства цементно-песчаных изделий: песок, щебень, вяжущие и химические добавки.

Сформулированы специфические требования к сырьевым материалам, а также рекомендации по подбору состава бетонной смеси. Подробно представлена технология производства цементно-песчаных вибропрессованных стеновых изделий. Особое внимание уделено технологическому контролю на производстве и техническому контролю и обслуживанию оборудования. Чертежи и табличная информация облегчают восприятие материала. Книга предназначена для организации производственно-технического обучения на предприятии, будет полезна инженерно-техническому персоналу и широкому кругу специалистов.



Книга «Теоретические основы белизны и окрашивания керамики и портландцемента»

Зубехин А.П., Яценко Н.Д., Голованова С.П. М.: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ», 2014. 152 с.

В книге представлены теоретические основы белизны и окрашивания керамических строительных материалов и белого портландцемента (БПЦ) с позиции теории цветности силикатных материалов в зависимости от их фазово-минерального состава, структуры, содержания хромофоров Fe, Mn и Ti, условий обжига и охлаждения (окислительных или восстановительных).

Установлены закономерности зависимости белизны, цвета и особенности окрашивания как пигментов, так и твердых растворов бесцветных фаз ионами-хромофорами от структуры, изовалентного или гетеровалентного изоморфизма, образования окрашивающих кластеров. Разработаны эффективные способы управления белизной и декоративными свойствами строительных керамических материалов (фарфора, фаянса, облицовочной плитки, кирпича) и белого портландцемента.

Тел.: (499) 976-22-08, 976-20-36 E-mail: mail@rifsm.ru

УДК 625.855.3

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-75-79>

М.Г. САЛИХОВ¹, д-р техн. наук (SalihovMG@volgatech.net);
Л.И. МАЛЯНОВА^{2,3}, канд. техн. наук (malyanova.00@mail.ru);
Е.В. ВЕЮКОВ¹, канд. техн. наук, В.М. ВАЙНШТЕЙН¹, канд. техн. наук

¹ Поволжский государственный технологический университет (424000, Россия, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3)

² Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова (428015, Россия, Чувашская Республика, г. Чебоксары, Московский пр., 15)

³ Чебоксарский институт (филиал) Московского политехнического университета (428000, Россия, Чувашская Республика, г. Чебоксары, пр. Карла Маркса, 54)

Оценка сравнительной долговечности модифицированных асфальтобетонов с отходами дробления известняка методом искусственного старения при высокой температуре

Приведены результаты экспериментального исследования изменения физико-механических свойств модифицированных асфальтобетонов после длительного выдерживания при высокой температуре. При изучении процессов старения модифицированных путем добавления кубовых остатков химического производства асфальтобетонов с отходами дробления местных низкопрочных известняков предложена новая методика, которая позволяет проследить процессы старения экспериментальных образцов при помощи безразмерного показателя – коэффициентов старения и интенсивности. Характер изменения во времени значений показателей свойств в процессе прогревания при высокой температуре (150°C) в течение 0–7 ч, выражаемый через показатель интенсивности старения, показывает сравнительную устойчивость материалов во времени, т. е. их устойчивость в экстремальных условиях. Под воздействием высокой температуры быстро меняется групповой состав нефтяных битумов, что приводит к уменьшению его клеящей способности и соответственно асфальтобетонов с их использованием. Возникает необходимость прогнозирования этих процессов. В связи с тем, что до последнего времени единой методики оценки процессов старения асфальтобетонов нет, сотрудниками Поволжского государственного университета предложено оценивать сравнительную долговечность исследуемых материалов по скорости изменения отдельных показателей при помощи коэффициента старения и интенсивности старения.

Ключевые слова: модифицированный асфальтовый бетон, модифицированный щебеночно-мастичный бетон, старение при высокой температуре, наиболее чувствительный показатель, коэффициент старения, интенсивность старения, сравнительная долговечность.

Для цитирования: Салихов М.Г., Мальянова Л.И., Веюков Е.В., Вайнштейн В.М. Оценка сравнительной долговечности модифицированных асфальтобетонов с отходами дробления известняка методом искусственного старения при высокой температуре // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 75–79. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-75-79>

M.G. SALIHOV¹, Doctor of Sciences (Engineering) (SalihovMG@volgatech.net);

L.I. MALYANOVA^{2,3}, Candidate of Sciences (Engineering) (malyanova.00@mail.ru);

E.V. VEYUKOV¹, Candidate of Sciences (Engineering), V.M. VAINSHTEIN¹, Candidate of Sciences (Engineering)

¹ Volga State University of Technology (3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, the Republic of Mari El, 424000, Russian Federation)

² I.N. Lenin Chuvash State University (15, Moskovsky Prospect, Cheboksary, Chuvash Republic, 428015, Russian Federation)

³ Cheboksary Institute (branch) of Moscow Polytechnic University (54, Karl Marx Prospect, Cheboksary, Chuvash Republic, 428000, Russian Federation)

Evaluation of the Comparative Durability of Modified Asphalt Concretes with Limestone Crushing Waste by Artificial Aging at High Temperature

The results of an experimental study of changes in the physical and mechanical properties of modified asphalt concrete after long-term exposure to high temperature are presented. When studying of aging processes modified by adding still residues of chemical production of asphalt concretes with the waste of crushing local low-strength limestones, a new technique is proposed that makes it possible to track the aging processes of experimental samples using a dimensionless indicator – coefficients of aging and intensity. The nature of the change in values of property indicators over time during heating at a high temperature (150°C) for 0–7 hours, expressed as an indicator of the intensity of aging, shows the comparative stability of materials over time, i.e. their stability in extreme conditions. Under the influence of high temperature, the group composition of petroleum bitumen changes rapidly, which leads to a decrease in its adhesive ability and, accordingly, asphalt concretes with their use. There is a need to predict these processes. Due to the fact that until recently there is no unified methodology for evaluating the aging processes of asphalt concrete, the staff of Volga State University proposed to evaluate the comparative durability of the materials under study by the rate of change of individual indicators using the aging coefficient and the intensity of aging.

Keywords: modified asphalt concrete, modified crushed stone-mastic concrete, aging at high temperature, most sensitive indicator, aging coefficient, aging intensity, comparative durability.

For citation: Salihov M.G., Malyanova L.I., Veyukov E.V., Vainshtein V.M. Evaluation of the comparative durability of modified asphalt concretes with limestone crushing waste by artificial aging at high temperature. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 75–79. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-75-79>

Для снижения себестоимости щебеночных и щебеночно-мастичных асфальтобетонов для покрытий автодорог были предложены новые материалы [1], в которых минеральный порошок, дробленый песок и стабилизирующая добавка заменены отходами дробления местных малопрочных известняков (ОДИ). При этом наблюдается возрастание требуемого расхода вяжущего. Этот недостаток удалось преодолеть путем добавления кубовых остатков химического производства – 8ПФДА и АсД [2, 3].

Целью работы является установление динамики процессов старения и объяснение механизмов изменения основных свойств асфальтобетона с отходами дробления известняков (асфальтобетон с ОДИ) и добавками кубовых остатков анилина под действием высокой температуры (150°C) во времени [4–6].

Из патентных и экспериментальных исследований установлено, что, во-первых, при высокой температуре физико-механические свойства битума и асфальтобетонной смеси с ОДИ в основном ухудшаются: чем больше время выдержки, тем в большей степени это происходит [7–16]; во-вторых, несомненно количество добавок кубовых остатков местной химической промышленности Чувашской Республики – 8ПФДА и анилина (АсД), повышают их сопротивляемость процессам старения. При этом можно заметить неравномерность процессов старения в различные промежутки времени выдерживания образцов при высоких температурах [4–6]. Это говорит о том, что в условиях воздействия высокой температуры в органических материалах происходят глубокие термоокислительные процессы.

Для изучения процессов старения модифицированных асфальтобетонов (АБ) с ОДИ предложена новая методика, которая позволяет проследить процессы старения экспериментальных образцов при помощи безразмерного показателя – коэффициентов старения и интенсивности. При этом важно знать о характере изменения во времени значений показателей свойств в процессе прогревания при высокой температуре, выражаемом через показатель интенсивности старения. Он показывает сравнительную устойчивость материалов во времени, т. е. их устойчивость в экстремальных условиях. Под воздействием высокой температуры быстро меняется групповой состав нефтяных битумов, что приводит к уменьшению его клеящей способности и соответственно асфальтобетонов с их использованием. Возникает необходимость прогнозирования этих процессов.

В связи с тем, что для изучения процессов старения органических бетонов до последнего времени единой методики оценки процессов старения асфальтобетонов не было, сотрудниками ПГТУ предложена методика [6], позволяющая выполнить это путем проведения общеизвестных испытаний по стандартным методикам при помощи безразмерных величин – коэффициентов старения и интенсивности старения.

Методика исследований. Подготавливают отдельные партии пробы смесей запроектированных составов. Отдельные партии смесей нагревают и выдерживают при температуре $150 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 0, 3, 5, 7 ч. Затем они остывают до комнатной температуры и далее из них формуют по стандартной методике ГОСТ 12801–98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний» стандартные цилиндрические образцы диаметром и высотой 71,4 мм. Затем их подвергают стандартным испытаниям: устанавливают значения физико-механических свойств, таких как предел прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии при ± 0 ; 20; 50°C; трещиностойкость; сцепление и другие показатели по ГОСТ 9128–2013 «Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия».

Далее рассчитывают значения коэффициентов старения ($K_{ст}$) и интенсивности старения ($I_{ст}$) по всем показателям стандартной методики ГОСТ 12801–98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний».

При этом для выполнения анализа сопротивляемости старению новых материалов по сравнению с базовым материалом – асфальтобетоном классического состава (т. е. сравнительной долговечности), их значения устанавливают по формулам:

$$K_{стар}^{Pi} = \frac{\Pi_{ni}^{t_{пр}}}{\Pi_{баз\ ni}^{t_{пр}=0}}, \quad (1)$$

где $\Pi_{ni}^{t_{пр}}$ – значение n -го физико-механического свойства образца асфальтобетона нового (рассматриваемого) состава после прогревания при высокой температуре в течение времени $t_{пр}$; $\Pi_{баз\ ni}^{t_{пр}=0}$ – то же у образца асфальтобетона базового (классического) состава, не прогретого при высокой температуре ($t_{пр}=0$).

В данной формуле за базовый вариант принимается асфальтобетон классического состава. Это позволяет провести оценку сопротивляемости старению при высоких температурах асфальтобетона нового (изучаемого) состава по сравнению с классическим.

$$I_{стар\ i} = \frac{\Delta K_{стар\ i}}{\Delta t_{пр\ i}}, \text{ ч}^{-1}, \quad (2)$$

где $\Delta K_{стар\ i}$ – приращение значения коэффициента старения асфальтобетона по каждому показателю за отрезок времени $\Delta t_{пр\ i}$:

$$\Delta K_{стар}^{Pi} = K_{стар\ i}^{Pi} - K_{стар\ (i-1)}^{Pi}, \quad (3)$$

где $K_{стар\ i}^{Pi}$, $K_{стар\ (i-1)}^{Pi}$ соответственно значения коэффициента старения за предыдущий и рассматриваемый этапы прогревания смеси; $\Delta t_{пр\ i}$ – отрезок времени между этапами прогревания асфальтобетонной смеси.

Таблица 1
Table 1

Предел прочности при сжатии
при температуре образцов 50°C
Compressive strength at 50°C of samples

Время прогрева смеси, ч	Предел прочности при сжатии при 50°C		
	Немодифицированного АБ с ОДИ	Модифицированного АБ с ОДИ (с добавкой 0,5%)	АБ классического состава
0	2,3	2,6	2,1
1	1,8	2	1,4
3	1,5	1,8	1,5
5	1,3	1,5	1,4
7	1,2	1,3	1,4

Таблица 2
Table 2

Коэффициент интенсивности старения асфальтобетона при прогревании при температуре 150°C
Coefficient of aging intensity of asphalt concrete when warming up at a temperature of 150°C

$\Delta t_{пр}$	Время прогрева смеси, ч	$K_{ст}$			$I_{ст}$		
		Немодифицированного АБ с ОДИ	Модифицированного АБ с ОДИ (с добавкой 0,5 %)	АБ классического состава	Немодифицированного АБ с ОДИ	Модифицированного АБ с ОДИ (с добавкой 0,5 %)	АБ классического состава
1	0	1,1	1,24	1			
2	1	0,86	0,95	0,67	0,24	0,29	0,32
2	3	0,71	0,86	0,71	0,08	0,05	0,02
2	5	0,62	0,71	0,67	0,05	0,08	0,02
	7	0,57	0,67	0,67	0,03	0,02	0

Результаты экспериментов, обработка и интерпретация. Экспериментальные исследования проведены с асфальтобетонами следующих составов:

1) асфальтобетоны классического состава, % по массе: щебень гранитный М1200 фр. 5–20 – 47%; отсеvy дробления прочных пород (дробленый песок) – 43%; известняковый минеральный порошок – 10%; битум нефтяной вязкий БНД 90/130 – 6,5% (сверх 100%);

2) немодифицированный асфальтобетон с ОДИ: щебень гранитный М1200 фр. 5–20 мм – 47%; отсеvy дробления прочных пород (дробленый песок) – 43%; отходы дробления низкопрочных известняков – 10%; битум нефтяной вязкий БНД 90/130 – 7,5% (сверх 100%);

3) модифицированный асфальтобетон с ОДИ: щебень гранитный М1200 фр. 5–20 мм – 47%; отсеvy дробления прочных пород (дробленый песок) – 43%; отходы дробления известняков – 10%; битум нефтяной вязкий БНД 90/130 – 4,8% (сверх 100%); кубовые остатки при производстве анилина (АсД) – 0,5–1% (от массы битума).

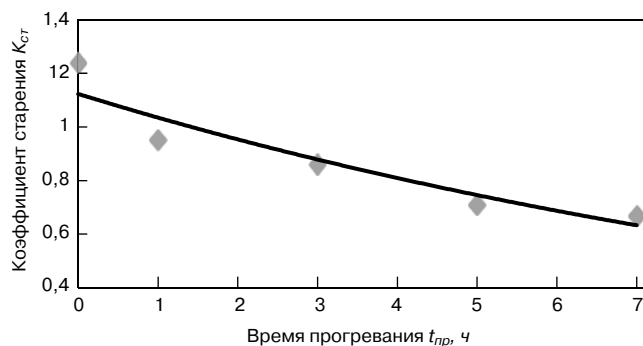


Рис. 1. Зависимость коэффициента старения по показателю предела прочности при сжатии при 50°C модифицированного асфальтобетона с ОДИ типа Б с добавкой АсД в количестве 0,5% от продолжительности прогрева смеси при 150°C

Fig. 1. Dependence of values of aging coefficient by indicator of compressive strength limit at 50°C modified asphalt on the length of warm-up CME-C at 150°C

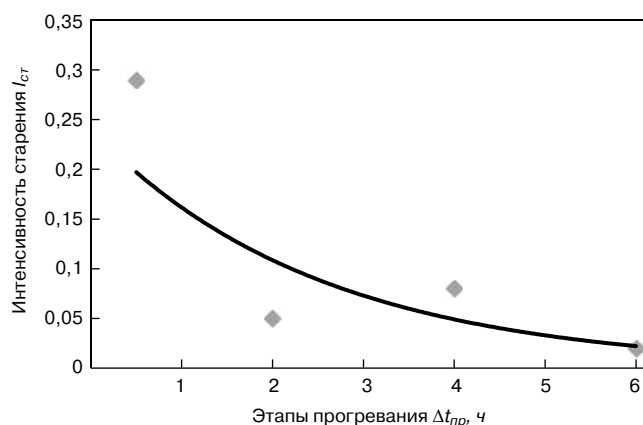


Рис. 2. Зависимость интенсивности старения асфальтобетона по пределу прочности при сжатии при 50°C от времени прогрева при 150°C

Fig. 2. Dependence of the intensity of asphalt concrete aging when compressing at 50°C on the heating time at 150°C

Кубовые остатки при производстве анилина (АсД) образуются в Новочебоксарском химическом заводе Чувашской Республики и состоят из: анилина – 40%; циклогексиламина – 0–10%; дефиламины – 0,45%.

Кубовые остатки образуются в процессе выделения целевого продукта – анилина и при 20°C с высоким содержанием анилина представляют собой жидкость черного цвета, а при низком содержании анилина могут быть пастообразными или густой консистенции. Условная вязкость при 20°C – 20–30 сантистоксов; аминное число – 150–300; рН – 8–12 и температура вспышки 90–120°C.

Результаты выполненных лабораторных экспериментов показаны в табл. 1, а расчеты $K_{ст}$ и $I_{ст}$ – в табл. 2 и на рис. 1. При этом в таблицах даны результаты и расчеты только для наиболее чувствительного показателя – предела прочности на сжатие при 50°C для образцов немодифицированного АБ с ОДИ с содержанием битума 5%, модифицированного асфальтобетона с ОДИ (с добавкой 0,5% АсД от массы битума) и асфальтобетонов классического состава.

Как показано на рис. 1, старение асфальтобетона с ОДИ при прогревании соответствует экспоненциальной зависимости вида:

$$K_{ст} = \exp(-0,1900t_{пр}^{0,61085}), \quad (4)$$

где $t_{пр}$ – время прогревания смеси при температуре 150°C, ч.

Анализ результатов лабораторных экспериментов и расчетов, приведенных в табл. 2 и рис. 1, показывает: 1) модифицированный асфальтобетон с ОДИ в течение первого часа стареет медленнее по сравнению с немодифицированным асфальтобетоном с ОДИ, и в дальнейшем интенсивность их старения становится одинаковой; 2) у всех испытанных образцов асфальтобетонов после 1 ч прогревания интенсивность старения резко снижается.

Как видно из табл. 1 и рис. 1 и 2, до начала прогревания значение предела прочности при сжатии при 50°C у модифицированного асфальтобетона с ОДИ ниже, чем у немодифицированного и у АБ классического состава, а после длительного прогревания (5–7 ч) их значения выше, чем у модифицированного асфальтобетона с ОДИ и асфальтобетона классического состава. Это говорит о том, что модифицированный асфальтобетон с ОДИ в начальный период лучше сопротивляется старению, чем немодифицированный асфальтобетон с ОДИ.

Такое поведение асфальтобетонов может быть объяснено тем, что в начальный период прогревания

в условиях легкого доступа воздуха и высокой температуры битум во внешних слоях интенсивно полимеризуется и после образования вокруг их поверхностей устойчивых полимеризованных корочек доступ воздуха к внутренним поверхностям резко затрудняется. Это, видимо, приводит после первого часа прогревания к соответствующему резкому замедлению процессов окисления битума и дальнейшего старения асфальтобетона.

Выводы

Показана возможность использования предложенной методики оценки процессов старения модифицированных асфальтобетонов с ОДИ путем применения параметров коэффициента старения и интенсивности старения для сравнительной оценки долговечности изучаемых материалов и применяемых битумов по сравнению с асфальтобетонами классических составов. Это расширяет возможность комплексной оценки работоспособности новых изучаемых материалов в стадии разработки рекомендаций по их внедрению в практическое использование.

Экспериментально установлено, что небольшая добавка в количестве 0,5% (от массы битума) позволяет повысить значение первоначальной прочности на сжатие при 50°C модифицированного асфальтобетона с отходами дробления известняков и его сопротивляемость старению при прогревании при 150°C в течение 5 ч.

Список литературы

1. Патент РФ 2426704. *Способ получения щебеночно-мастичных асфальтобетонов с добавками отсевов дробления известняков М 400* / Салихов М.Г., Вайнштейн Е.В., Вайнштейн В.М. Заявл. 02.04.2009.
2. Патент РФ 2494988. *Способ получения щебеночно-мастичного асфальтобетона* / Иливанов В.Ю., Салихов М.Г., Малянова Л.И., Криворучко С.В., Эндюскин В.П., Филиппов В.М. Заявл. 28.12.2011.
3. Патент РФ 2503633. *Способ получения горячей щебеночной асфальтобетонной смеси с добавкой отсевов дробления известняков марки 400* / Салихов М.Г., Малянова Л.И., Иливанов В.Ю. Заявл. 18.11.2011.
4. Салихов М.Г., Малянова Л.И. Влияние добавок кубовых остатков при производстве анилина на температурную устойчивость вязких дорожных битумов и асфальтобетонов с отходами дробления известняков // *Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование*. 2016. № 2. С. 74–81.
5. Салихов М.Г., Иливанов В.Ю., Малянова Л.И. Предложение к изучению процессов старения органических бетонов при воздействии высоких

References

1. Patent RF 2426704. *Sposob polucheniya shchebenochno-mastichnykh asfal'tobetonov s dobavkami otsefov drobleniya izvestnyakov M 400* [Method for obtaining crushed-mastic asphalt concrete with additives of limestone crushing screenings M 400]. Salikhov M.G., Vaynstein E.V., Vaynstein V.M. Declared 02.04.2009. (In Russian).
2. Patent RF 2494988. *Sposob polucheniya shchebenochno-mastichnogo asfal'tobetona* [Method for obtaining crushed-mastic asphalt concrete]. Iivanov V.Yu., Salikhov M.G., Malyanova L.I., Krivoruchko S.V., Endyuskin V.P., Filippov V.M. Declared 28.12.2011. (In Russian).
3. Patent RF 2503633. *Sposob polucheniya goryachei shchebenochnoi asfal'tobetonnoi smesi s dobavkoi otsevoiv drobleniya izvestnyakov marki 400* [A method for obtaining hot crushed asphalt concrete mix with the addition of crushing screenings of 400-grade limestones]. Salikhov M.G., Malyanova L.I., Iivanov V.Yu. Application 18.11.2011. (In Russian).
4. Salikhov M.G., Malyanova L.I. Influence of additives of cubic residues in the production of aniline on the temperature stability of viscous road bitumen and asphaltic concrete with limestone crushing waste. *Vestnik PGTU. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*. 2016. No. 2, pp. 74–81. (In Russian).

- температур // *Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование*. 2015. № 1. С. 59–65.
6. Патент РФ 2654954. *Способ определения скорости и интенсивности старения асфальтобетонов / Салихов М.Г., Веюков Е.В., Сабиров Л.Р., Малянова Л.И.* Заявл. 13.02.2017.
 7. Малянова Л.И. Изучение возможности использования модифицирования дорожных битумов отходами местной химической промышленности Чувашии. *Материалы международной научно-практической конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ) и Российской академии транспорта (РАТ) 2013 г.* Пермь: ПНИПУ, 2013. С. 267–272.
 8. Малянова Л.И., Салихов М.Г. Модифицированные битумы и экспериментальные исследования их физико-механических свойств. В кн.: *Дорожно-транспортный комплекс: состояние, проблемы и перспективы развития*. Чебоксары: ВФ МАДИ, 2016. С. 155–161.
 9. Малянова Л.И. Модифицированный асфальтобетон с отходами дробления известняков в дорожных одеждах // *Строительные материалы*. 2018. № 7. С. 24–27. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-761-7-24-27
 10. Малянова Л.И. Модифицированный битум с кубовыми остатками при производстве анилина (АСД) // *Строительные материалы*. 2018. № 10. С. 49–52. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-764-10-49-52>
 11. Салихов М.Г., Веюков Е.В., Малянова Л.И. Модифицированные асфальтобетоны с отходами дробления известняков. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2019. 160 с.
 12. Малянова Л.И. *Строительные материалы*. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. 248 с.
 13. Yang Peng. A study on aging kinetics of Anshan paving asphalt // *Petroleum science and technology*. 2002. Vol. 20. No. 9–10, pp. 951–960.
 14. Yutiu Q. Study of serial reaction kinetics and changes of group compositions of petroleum asphalts in continuous heat and air aging // *Petroleum science and technology*. 2000. Vol. 18. No. 7–8, pp. 929–944.
 15. Скрипкин А.Д., Старков Г.Б., Колесник Д.А. Старение битума в технологическом процессе и его подготовки для производства асфальтобетонных смесей. *Сб. статей и докладов ежегодной научной сессии Ассоциации исследователей асфальтобетона*. М.: МадГТУ (МАДИ), 2010. С. 46–53.
 16. Friedbacher E., Schindibauer H. Quantitative Auswertung von TLC/FID – Bitumenanalysen // *Bitumen*. 1994. № 3, pp. 105–108.
 5. Salikhov M.G., Ilivanov V.Yu., Malyanova L.I. Proposal for the study of aging processes of organic concretes under the influence of high temperatures. *Vestnik PGTU. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*. 2015. No. 1, pp. 59–65. (In Russian).
 6. Patent RF 2654954. *Predlozhenie k izucheniyu protsessov stareniya organicheskikh betonov pri vozdeistvii vysokikh temperatur* [Method for determining the speed and intensity of aging of asphalt concrete]. Salikhov M.G., Veyukov E.V., Sabirov L.R., Malyanova L.I. Declared 13.02.2017. (In Russian).
 7. Malyanova L.I. Study of the possibility of using the modification of expensive bitumens by waste from the local chemical industry of Chuvashia. *Materials of the international scientific and practical conference “Modernization and scientific research research in the transport complex “ of the Perm national research Polytechnic University (PNRPU) and the Russian Academy of transport (RAT) 2013*. Perm: PNIPU, 2013. Pp. 267–272.
 8. Malyanova L.I., Salikhov M.G. Modifitsirovannye bitumy i eksperimental'nye issledovaniya ikh fiziko-mekhanicheskikh svoystv [Modified bitumens and experimental studies of their physical and mechanical properties]. In book: *Road transport complex: state, problems and prospects of development*. Cheboksary: VF MADI. 2016, pp. 155–161.
 9. Malyanova L.I. Modified asphalt concrete with limestone crushing waste in road pavement. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 7, pp. 24–27. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-761-7-24-27 (In Russian).
 10. Malyanova L.I. Modified bitumen with stillage bottoms when producing aniline (ASD). *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 10, pp. 49–52. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-764-10-49-52> (In Russian).
 11. Salikhov M.G., Veyukov E.V., Malyanova L.I. Modifitsirovannye asfal'tobetonny s otkhodami drobleniya izvestnyakov. Yoshkar-Ola: Volga state technological University, 2019. 160 p.
 12. Malyanova L.I. *Stroitel'nye materialy* [Construction materials]. Cheboksary: Publishing House of Chuvash University, 2019. 248 p.
 13. Yang Peng. A study on aging kinetics of Anshan paving asphalt. *Petroleum science and technology*. 2002. Vol. 20. No. 9–10, pp. 951–960.
 14. Yutiu Q. Study of serial reaction kinetics and changes of group compositions of petroleum asphalts in continuous heat and air aging. *Petroleum science and technology*. 2000. Vol. 18. No. 7–8, pp. 929–944.
 15. Skripkin A.D., Starkov G. B., Kolesnik D. A. Starenie bituma v tekhnologicheskom protsesse i ego podgotovki dlya proizvodstva asfal'tobetonnykh smesei [Aging of bitumen in the technological process and its preparation for production]. Moscow: MadGTU (MADI), 2010, pp. 46–53.
 16. Friedbacher E., Schindibauer H. Quantitative Auswertung von TLC/FID – Bitumenanalysen. *Bitumen*. 1994. No. 3, pp. 105–108.

Ю.В. ШТЕФАН¹, канд. техн. наук (shtephan_y_v@mail.ru);
Б.А. БОНДАРЕВ^{2,3}, д-р техн. наук (Insp-48@mail.ru); Л.В. ЯНКОВСКИЙ³, канд. техн. наук

¹ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), (125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, 64)

² Липецкий государственный технический университет (398000, г. Липецк, ул. Московская, 30)

³ ООО «ЛипецкНИЦстройпроект» (398006, г. Липецк, ул. Балмочных, 11)

Укрепление глинистых грунтов временных лесовозных дорог отходами промышленности и металлургическими шлаками

Рассматривается применение отходов металлургической промышленности и отходов ТЭЦ при строительстве временных лесовозных дорог, имеющих повышенные нагрузки от лесовозного транспорта. Использование этих отходов при изготовлении асфальтобетонов в составах комплексного вяжущего позволяет не только увеличить износостойкость, удлинить межремонтные сроки, расширить сырьевую базу дорожно-строительных материалов, снизить стоимость строительства лесовозной дороги, но и повысить прочность и водостойкость капитальных покрытий и оснований лесовозных дорог. Для временных дорог на глинистых грунтах предлагается методика замены традиционно применяемых лежневок и сланей, работающих по принципу понтонного моста, на эквивалентную по несущей способности конструкцию на основе нежестких дорожных одежд. В них за счет взаимодействия глины со смесью сталеплавильных шлаков и отходов, образующихся при умягчении воды известью ТЭЦ, происходит увеличение несущей способности лесовозных дорог. Проработаны вопросы механизации технологического процесса устройства временных лесовозных дорог за счет применения современной отечественной дорожно-строительной техники, традиционно используемой для строительства лесовозных дорог. Особенностью предлагаемой технологии является возможность последующего использования конструктивных слоев с применением указанных отходов при повышении категории лесовозной автодороги до капитальной, а затем до местных автодорог общего пользования без демонтажа конструкций временной лесовозной дороги. Риски увеличения затрат на транспортировку компенсируются возможностью утилизации отходов и низкой себестоимостью технологии.

Ключевые слова: лесовозные автомобильные дороги, металлургические шлаки, укрепление глинистых грунтов.

Для цитирования: Штефан Ю.В., Бондарев Б.А., Янковский Л.В. Об укреплении глинистых грунтов временных лесовозных дорог отходами промышленности и металлургическими шлаками // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 80–89.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-80-89>

Y.V. SHTEFAN¹, Candidate of Sciences (Engineering) (shtephan_y_v@mail.ru); B.A. BONDAREV^{2,3}, Doctor of Sciences (Engineering) (Insp-48@mail.ru); L.V. YANKOVSKII³, Candidate of Sciences (Engineering)

¹ Moscow Automobile and road construction state technical university (MADI), (64, Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation)

² Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya Street, Lipetsk, 398000, Russian Federation)

³ LLC LipetskNITSstroyproekt (11, Balmochnyh S.F. Street, Lipetsk, 398006, Russian Federation)

On Strengthening Temporary Logging Road Clay Soil by Industrial Waste and Metallurgical Slags

The application of this waste in asphalt concrete compositions as part of the complex binder makes it possible to increase wear resistance and inter-repair life, expand the raw material base of road-building materials and to reduce the logging road construction cost, as well as to increase the strength and water resistance of the permanent surfaces and bases of logging roads. For temporary roads on clay soils, a method is proposed of replacing the traditionally used plank-roads and plank beds working on the pontoon bridge principle by a structure based on flexible road pavements which is equivalent in its bearing capacity. The mixes of steel slag and the given CHP plant waste in them due to the interaction of clay components and the mix provide an increasing bearing capacity for logging roads characterized by increased loads from the logging trucks. The issues are considered of mechanizing the temporary logging road construction process via the application of modern domestic road-building machinery which is traditionally used for logging road construction.

Keywords: logging roads, metallurgical slags, strengthening clay soil.

For citation: Shtefan Y.V., Bondarev B.A., Yankovskii L.V. On strengthening temporary logging road clay soil by industrial waste and metallurgical slags. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 80–89. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-80-89>

На Новолипецком металлургическом комбинате (НЛМК в городе Липецке, Россия) имеются значительные запасы отходов промышленности в виде доменных, сталеплавильных шлаков и ковшовых остатков. При этом сталеплавильные шлаки и ковшовые остатки из-за значительного содержания свободной извести являются самораспадающимися в результате увеличения объема при модификационных превращениях в шлаках и гашении извести. Эти отходы могут применяться для укрепления грунтов под лесовозные

Novolipetsk Steel (NLMK in the city of Lipetsk (Russia)) has stored considerable stocks of industrial waste in the form of blast furnace, steel and ladle slags. Due to a considerable free lime (CaO) and two-calcium silicate content, steel and ladle slags are self-disintegrating because their volume increases in modification transformations. This waste can be used to strengthen soils for logging roads because over time, under the influence of weather and pressure, self-disintegration processes fade and its products bind soils thus increasing their bearing

дороги, так как со временем под влиянием атмосферных воздействий и давления процессы самораспада затухают и его продукты скрепляют грунты, повышая их несущую способность. Это происходит при взаимодействии извести с глинистыми минералами грунтов. Скопились также большие запасы отходов на ТЭЦ в виде шлама, получаемого от умягчения воды известью, которые плохо отделяют влагу и не могут быть применены в дорожном строительстве, а только в малом количестве для раскисления почвы в сельском хозяйстве [1]. Исследованиями авторов установлено, что при взаимодействии извести при самораспаде шлаков и глинистых минералов образуются силикаты кальция, обладающие вяжущими свойствами.

Актуальность. Для временных лесовозных дорог, испытывающих повышенные нагрузки от тяжелого автотранспорта, использование указанных отходов способствует увеличению износостойкости и удлинению межремонтных сроков дорожных покрытий, расширению сырьевой базы и снижению стоимости дорожного строительства и капитальных ремонтов. Часто временные лесовозные дороги превращаются в местные дороги регионального уровня, которые в период паводков становятся непроходимыми ни для человека, ни для вездеходной техники жизненно-важными артериями. Применение отходов промышленности значительно дешевле природных дефицитных материалов, добыча которых ведет к эрозии почв.

Актуальность исследований обеспечена и развитием лесовозных дорог, и использованием их для военных и противопожарных целей, а затем переустройством их под автодороги общего пользования.

Нерешенными остаются вопросы применения отходов промышленности на значительном удалении от мест их складирования и утилизации. Известно, что максимальная дальность доставки материалов для строительства лесовозных дорог ограничивается 90 км [2]. Применение отходов промышленности должно осуществляться на основании Лесного кодекса с учетом оценки рисков комплексного воздействия на окружающую среду со стороны отходов, нарушения технологии строительства лесовозных автодорог, вероятности появления на дорогах военной, вездеходной и другой тяжелой техники, нарушающей их целостность, снижения скорости возки и выбросов отработанных газов лесовозов, потери сцепления колеса с покрытием и т. д.

Следует учесть риски всех видов самораспада шлаков и сложности их переработки, а также риски повышения сопротивления качению колеса лесовоза на увлажненном глинистом грунте.

Для капитальных лесовозных дорог с покрытием из асфальтобетонов, как показали эксперименты их применения в Липецком регионе [3, 4], наиболее эффективными заполнителями являются доменные шлаки с модулем основности <1 , не подверженные самораспаду. Это – литой шлаковый щебень, получаемый медленным охлаждением до практически полной кристаллизации шлакового расплава в шлаковых траншеях. Доменный шлаковый щебень применяется

capacity. At the Central Hot Plant (CHP) there are also large stocks of waste in the form of slime obtained from water softening by lime; they hardly separate moisture and cannot be used in road construction unless in agriculture where their small quantities deoxidize soils [1]. In our research it was established that when lime from self-disintegration interacts with aluminosilicates from clay, calcium silicates are formed having binding properties.

Relevance. For temporary logging roads with increased loads from heavy road vehicles, the use of the above waste leads to higher wear resistance and longer inter-repair life, to a wider raw material base and a lower cost of road construction and capital repairs. Temporary logging roads frequently turn into roads of local relevance connecting settlements often become impassable both for people and for cross-country vehicles in the period of floods. The application of industrial waste is much cheaper than natural scarce materials whose extraction leads to soil erosion.

The relevance of the research is based on both the development of logging roads and on their use by the military and by fire brigades, and then on their refurbishing to be used as public roads.

The problems of industrial waste application at a considerable distance from the places of their storage and utilization remain unsolved. It is known that the maximum material haul range for the construction of logging roads is limited to 90 km [2]. The application of industrial waste must be based on the Forest Code with the risk assessment of the following: the complex impact of waste on the environment, violations of the logging road construction technology, the probability of military, cross-country, etc. heavy trucks appearing on roads thus breaking their integrity, the reduction of logging truck haul speed and exhaust emissions, the loss of grip, etc.

It is necessary to consider the risks of all types of slag self-disintegration and difficulties of their processing, as well as the risks of increasing the logging truck road resistance on a moistened clay soil.

As experiments of using asphalt concrete in the Lipetsk region show [3, 4], for permanent asphalt-concrete-covered logging roads the most effective aggregates are blast furnace slags with a basicity module <1 , not subject to self-disintegration. It is the cast crushed slag obtained by slow cooling until practically complete crystallization of molten slag in slag pits. Blast furnace crushed slag has long been used in road construction and civil engineering in compositions of cement-concrete products and structures, while converter slag reserves have not yet found wide application in road construction because of its tendency to self-disintegration and the instability of properties. It is used, however, for slope protection and in slag fills protecting against flood hazard. The converter slag prime cost is quite low, but it has to be cured for 1–2 years in open dumps before mixing up with soil and special additives, which completely excludes the impact of self-disintegration processes on the final operational properties of road foundations.

After crushing and sizing, it is successfully used as asphalt concrete coarse aggregate. Due to the presence of surface pores in it, it possesses increased adhesion to

в дорожном и гражданском строительстве в составах цементобетонных изделий и конструкций, а запасы конверторного шлака до сих пор не нашли широкого применения в дорожном строительстве из-за склонности к самораспаду и нестабильности свойств. Но для укрепления откосов, строительства насыпей в обводненных условиях он используется. Себестоимость конверторного шлака невысокая, но требуется его выдержка в течение 1–2 лет в открытых отвалах, после чего он перемешивается с грунтом в присутствии специальных добавок, что ведет к полному исключению влияния процессов самораспада на конечные эксплуатационные свойства оснований дорог.

После дробления и отсева по фракциям шлак используется в качестве крупного заполнителя асфальтобетона. За счет наличия в нем поверхностных пор он обладает повышенным сцеплением с органическими вяжущими веществами, обеспечивая повышенную плотность, прочность и износостойкость, а за счет обволакивания битумом – и водостойкость.

Наибольшая эффективность применения шлакового щебня для укрепления грунтов временных лесовозных дорог будет наблюдаться в районах повышенного обводнения грунтов, в низинах и заболоченных местностях, где имеет место длительное воздействие стоячей воды. В СП 288.1325800.2016 «Дороги лесные. Правила проектирования и строительства» предусмотрено применение шлакового щебня и смесей на его основе, как для строительства оснований лесовозных дорог, так и для покрытий капитальных дорог. Следует учитывать риск появления лещадных и игловатых частиц шлакового щебня из-за нарушения технологии дробления шлака. Так, ГОСТ 30491–2012 «Смеси органоминеральные и грунты, укрепленные органическими вяжущими, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия» ограничивает долю таких частиц не более 35%. Практика показала, что при применении импортных дробилок этот щебень приобретает оптимальную кубовидную форму (рис. 1) и может быть применен даже для щебеночно-мастичных асфальтобетонов, применяющихся в последнее время для верхних слоев асфальтобетонов с повышенной износостойкостью. Его можно использовать для строительства временных лесовозных дорог по СП 288.1325800.2016 с учетом описанных выше рисков при производстве работ, которые будут суммироваться с обычно идентифицируемыми рисками при эксплуатации автомобильных дорог общего пользования, описанными в работе [5] для Китая.

Цель исследований. Разработка технологии возведения временных лесовозных и капитальных покрытий лесных дорог современными видами дорожно-строительной и лесной техники для развития их сети и снижения воздействия на окружающую среду со стороны отходов промышленности, скопившихся в промышленных зонах на значительном удалении от лесовозных автодорог.

В данных исследованиях поставлена задача разработки технологии строительства лесовозных дорог

organic binders providing increased density, durability and wear resistance, as well as water resistance due to bitumen coating.

The greatest efficiency of crushed slag application to strengthen the soil of temporary logging roads will be typical for areas of an increased flood hazard, for lowlands and swamp areas affected by still water for a long time. According to Construction Regulations 288.1325800.2016 «Roads logging. Rules of design and construction», crushed slag and mixes on its basis are used both for the construction of logging road foundations and for permanent road surfaces. Risk should be considered of flaky and needle-shaped crushed slag particles caused by slag crushing technology violation. Thus, GOST 30491–2012 «Organomineral mixtures and soils stabilized by organic binders for road and airfield construction. Specifications» limits a share of such particles of not >35%. Experience shows that crushers of foreign manufacturers form this crushed stone into an optimum cubical shape (Fig. 1) and the slag can be used even for crushed-stone and stone mastic asphalt which has been applied recently in asphalt concrete top layers of increased wear resistance.

It can be used to build temporary logging roads according to the Construction Regulations 288.1325800.2016 with account of the risks described above. This risks, as usually, will be summarized with commonly identified risks in the operation of public roads, described in [5] for China.

Purpose of the research. The development of a technology of building temporary logging roads and permanent surfaces of forest roads by modern types of road-building machinery and forest machinery to develop their network and to lower their impact on the environment from the industrial waste which is stored in industrial zones at a considerable distance from logging roads.

The given research sets the task of developing a technology of building logging roads with the use of crushed slag and CHP plant waste obtained from water softening by lime in soil strengthening and in the construction of the top layer for permanent surfaces of spar roads of an upper category. For this, it is necessary for weak and heaving



Рис. 1. Кубовидная форма литого шлакового щебня: 1 – открытые поверхностные поры шлакового заполнителя

Fig. 1. Cubical shape of cast crushed slag: 1 – open surface pores of slag aggregate

с использованием шлакового щебня и отходов ТЭЦ от умягчения воды известью в укреплении грунтов и строительства верхнего слоя капитальных покрытий для сети лесовозных дорог повышенной категории. Для этого необходимо для слабых и пучинистых глинистых грунтов получить недорогой по себестоимости, но эффективный способ их укрепления, который позволит уйти от традиционных технологий устройства лежневых конструкций.

Результаты исследований. В качестве мелкого заполнителя в составах асфальтобетонов для капитальных лесовозных дорог I-LV и II-LV по СП 288.1325800.2016 вместо дефицитного кварцевого песка целесообразно использование гранулированного доменного шлака. Опыт использования его в сочетании с литым шлаковым щебнем при капитальном ремонте городских дорог в Липецке показал высокую износостойкость такого асфальтобетона. Этот эффект зависит от химико-минералогического состава шлаков. Шлаки и отходы могут применяться в составах асфальтобетонов и в качестве наполнителей для повышения плотности упаковки их минеральной части. В их составе после самораспада присутствуют карбонаты кальция, которые, как и известняк, в тонкодисперсном виде взаимодействуют с битумными связующими и обеспечивают высокие показатели адгезии. Авторами ранее исследованы и известняковые отходы от умягчения воды известью ТЭЦ [3–4] для требуемых физико-механических свойств асфальтобетонов.

Эксперименты по смешиванию известнякового наполнителя из отходов ТЭЦ с битумом показали достижение полной однородности смеси и их совместимость. Предусмотренное п. 6.5.21 СП 288.1325800–2016 требование по технологии строительства лесовозных дорог на глинистых грунтах с устройством прослойки толщиной не менее 10 см из песка может быть выполнено при увеличении риска временного снижения модуля упругости этого слоя.

Подбор оптимальных составов асфальтобетонов на шлаковых заполнителях с этим наполнителем по математической модели позволил получить асфальтобетоны с высокими показателями плотности, прочности и износостойкости. Водостойкость этих асфальтобетонов, несмотря на наличие пористых заполнителей, соответствовала требованиям ГОСТ 9128–2013 «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия» и ГОСТ 30491–2012 «Смеси органоминеральные и грунты, укрепленные органическими вяжущими, для дорожного и аэродромного строительства» (см. таблицу).

Авторами выполнено сопоставление требований шлаковых асфальтобетонов из полученного шлакового щебня по водонасыщению и набуханию асфальтобетонных образцов в лаборатории. Для этого по ГОСТу на традиционные асфальтобетоны образцы стандартного размера взвешивают на воздухе и в воде и помещают на 1 ч в сосуд под вакуум с давлением не выше 2 кПа.

clay soils to obtain not expensive at cost, but an effective way to strengthen them, which will allow you to get away from the traditional technologies of laying structures.

Results. It is expedient to use granulated blast furnace slag instead of scarce quartz sand as fine aggregate in asphalt concrete compositions for permanent logging roads I-LV and II-LV according to the Construction Regulations 288.1325800.2016. The experience of its application in combination with cast crushed slag at capital repairs of roads in the city of Lipetsk demonstrated high wear resistance of such asphalt concrete. This effect depends on the slag chemical and mineralogical composition. Slags and waste can be used in asphalt concrete compositions and as aggregates to increase their packing density. Their composition after self-disintegration includes calcium carbonates which, like ground limestone, interact with bituminous binders and guarantee high adhesion rates. Earlier, we also investigated calcareous CHP plant waste obtained from water softening by lime [3–4] for required physico-mechanical asphalt concrete properties.

Experiments on mixing the calcareous aggregate from CHP plant waste with bitumen demonstrated a total homogeneity of the mix and their compatibility. According to item 6.5.21 of the Construction Regulations 288.1325800–2016, the technological requirement for building logging roads on clay soil with an intermediate sand layer not thicker than 10 cm can be met by increasing the risk of a temporary decrease in this layer's modulus of elasticity.

The simulated selection of optimum compositions of asphalt concrete on slag aggregates with this aggregate made it possible to obtain surfaces with high indicators of density, durability and wear resistance. Despite the presence of porous aggregates, the water resistance of this asphalt concrete conforms to the requirements of standards GOST 9128–2013 «Asphaltic concrete and polymer asphaltic concrete mixtures, asphaltic concrete and polymer asphaltic concrete for roads and aerodromes. Specifications» and GOST 30491–2012 «Organic-mineral mixtures and soils, fortified organically binders for road and airfield construction. Specifications» (Table).

We performed a comparison of the requirements of slag asphalt concrete from the resulting slag crushed stone for water saturation and swelling of asphalt concrete samples in the laboratory. To do this, according to GOST, on standard asphalt concrete samples of standard size are weighed in air and in water and placed for 1 hour in a vessel under vacuum with a pressure of no higher than 2 kPa. After that, the samples were again weighed in water and in air. For water saturation, expressed as a percentage, take the ratio of the mass of water absorbed into the sample to the total volume of voids of the sample according to the formula (12) GOST 12801–98 «Materials on the basis of organic binders for road and airfield construction. Test methods (With change N1)». The research also showed that initial slag materials can also be used in cold asphalt concrete compositions for routine repairs of permanent logging road surfaces in winter. At the same time, aggregates from CHP plant slime can be part of the asphalt concrete composition as pulp because it is quickly ab-

**Водостойкость асфальтобетона на шлаковых заполнителях
Water resistance of asphalt concrete on slag aggregates**

Наименование показателей Name of indicators	Фактические показатели Actual indicators	Требования ГОСТ 9128 GOST 9128 requirements	Требования ГОСТ 30491 GOST 30491 requirements	
			Для оснований For bases	Для покрытий For pavements
Водонасыщение, % по объему Water saturation, volume %	3,13	1–4	<10	4–9
Набухание, % Swelling, %	0,015	–	<2	<2,5
Коэффициент водостойкости Water resistance coefficient	1,03	–	>0,6	>0,55

После этого образцы снова взвешивали в воде и на воздухе. За водонасыщение, выраженное в процентах, принимают отношение массы, впитавшейся в образец воды, к общему объему пустот образца по формуле (12) ГОСТ 12801–98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний (с Изменением № 1)». Исследования также показали, что исходные материалы из шлаков могут быть использованы и в составах холодных асфальтобетонных, применяемых для текущего ремонта дорожных покрытий капитальных лесовозных дорог в зимнее время. При этом наполнители из шлама ТЭЦ можно вводить в состав асфальтобетона в виде пульпы, так как она быстро впитывается пористым крупным заполнителем, смешивается с ним и с битумом. На зернах пористых шлаковых заполнителей образуется плотная корка из шлама, исключая пыление при введении сухого наполнителя. А битум, имеющий пониженную вязкость, легко впитывается в эту корку, создавая наполненное битумо-минеральное связующее, заполняющее поверхностные поры шлакового заполнителя. Этим обеспечивается сцепление заполнителя и битума в асфальтобетоне и плотное заполнение межзернового пространства. Повышается связность смеси, снижается пористость асфальтобетона на пористых шлаковых заполнителях. Этим достигается и сцепление колеса лесовоза с покрытием капитальной дороги или укрепленного шлаковым щебнем грунта и, что особенно важно, снижается себестоимость за счет оптимизации объема земляных работ [6].

В [7] предложено проектирование шероховатых поверхностных слоев покрытий, увеличивающее срок службы плотным заполнением зерен (выступов) на поверхности и обеспечением сцепления подбором и регулированием диапазонов высоты выступов. Эта методика пригодна для нормирования параметров шероховатости лесовозных автодорог, где нормирование коэффициента сцепления колеса с покрытием влияет на увеличение расхода топлива лесовоза. Методика создания таких покрытий предполагает сужение фракций применяемого для вытапливания при укатке щебня и применение смеси фракций более узких диапазонов: гипотеза в том, что коэффициент упрочнения связки вяжущее–щебень пропорционален логарифму линейного износа поверхности автодороги. Экспериментами [8, 9] установлено, что прикатка катком дает снижение износа поверхности до-

sorbed by a porous coarse aggregate and mixes up with it and with bitumen. A dense slime crust forms on grains of porous slag aggregates thus excluding dusting at the introduction of dry aggregate, while bitumen with its reduced viscosity is easily absorbed in this crust, which results in a filled bitumen-mineral binder filling the surface pores of slag aggregate. This guarantees the adhesion of aggregate and bitumen in asphalt concrete, dense packing of the inter-grain space, an increased mix cohesion, a lower porosity of asphalt concrete on porous slag aggregates. It also guarantees a grip between a logging truck wheel and a permanent road surface or soil strengthened by crushed slag and, most importantly, the cost is reduced by optimizing the volume of earthwork [6].

In [7] researchers proposed to design rough road surfaces which increase service life through dense filling of grains (ledges) on the surface and through ensuring adhesion via selection and regulation of ledge height ranges. This technique is applicable for standardizing the roughness parameters of logging roads where standardizing the grip coefficient influences an increase in logging truck fuel consumption. The method of creating such pavements means narrowing the fractions of crushed stone used for sweating at rolling and the application of a mix of fractions of narrower ranges: the hypothesis that the coefficient of hardening of the binder-crushed stone bond is proportional to the road surface linear wear logarithm. Experiments [8, 9] established that crushed stone seating provides a road surface wear decrease by 20–25% and guarantees its greater profile uniformity. The adhesion, however, decreases. In order to regulate crushed stone grain sizes, fractions with a lesser range are mixed. For instance, for crushed stone of a 20–40 mm fraction in accordance with GOST 3344–83 «Slag crushed stone and slag sand for road construction. Specifications» it can be mixed in the ratio of 3:2 with the 31.5–45 mm fraction in accordance with GOST 32826–2014 «Automobile roads of general use. Slag rubble and sand. Technical requirements».

Our laboratory experiment on strengthening clay soils with slag aggregates both on the basis of steelmaking and cast slag crushed stone showed that when the slag is mixed with clay in the soil, the reactions of clay aluminosilicates with self-decay products of slag, free lime, occur. This leads to an increase in the hydraulic activity of a mixture of moist clay soil with slags stabilized in open dumps.

The creation of rough surface coatings consists in that at first the initial surface is prepared for applying the

роги на 20–25% и делает ее более равномерной по профилю. Но снижается сцепление. Для регулирования размеров зерен щебня смешивают фракции с меньшим разбросом. Так, для щебня фракции 20–40 мм по ГОСТ 3344–83 «Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства. Технические условия» можно смешивать его в пропорции 3:2 с фракцией 31,5–45 мм по ГОСТ 32826–2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и песок шлаковые. Технические требования».

Проведенный в лабораторных условиях авторами эксперимент по укреплению глинистых грунтов шлаковыми заполнителями как на основе сталеплавильных шлаков, так и на основе литого шлакового щебня показал, что при смешивании шлака с глиной в грунтах протекают реакции взаимодействия алюмосиликатов глины с продуктом самораспада шлаков – свободной известью. Это приводит к увеличению гидравлической активности смеси увлажненного глинистого грунта со стабилизированными в открытых отвалах шлаками.

Создание шероховатых поверхностных слоев заключается в том, что вначале подготавливают исходную поверхность к нанесению указанного слоя и распределяют его на заданную высоту, обеспечивая требуемую плотность прилегания выступов друг к другу. Уход за состоянием поверхностного слоя отличается тем, что регулирование сцепления с колесом автомобиля осуществляют по дисперсии разброса высот выступов в диапазоне фракции выступов, а разброс выступов выбирают в соответствии с требуемыми параметрами шероховатости по заданному закону распределения. Для практической оценки шероховатости достаточно определить четыре основные ее характеристики: среднюю глубину впадин (высоту выступов); средний шаг шероховатости; плотность контактов; дисперсию высот выступов. Для этого авторы предлагают использовать забытую методику определения шероховатости профилометром (рис. 2).

Определение параметров шероховатости при этом осуществляется по профилограмме. Такие приборы не столь дорогие, как бесконтактные, и их можно использовать для щебеночных покрытий. Главное требование к ним, чтобы диаметр иглы был больше ширины впадин шероховатости. Фактически определяется среднеквадратическое отклонение разброса выступов шероховатой поверхности. Такой способ обеспечивает корреляцию с параметрами сцепления. Этот параметр обладает инвариантностью к выбранному уровню отсчета.

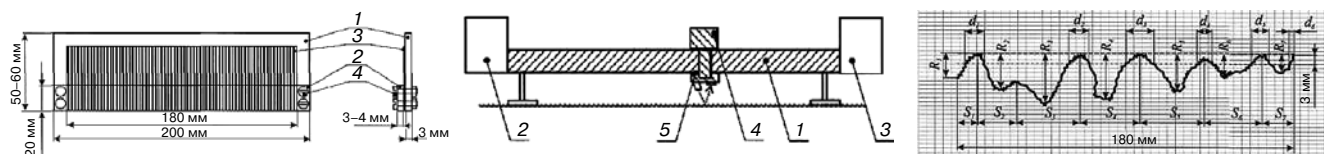


Рис. 2. Прибор профилометр: 1 – балка с приводом от реверсивного двигателя и ходовым винтом; 2 – блок с приборами управления (электронное хранилище информации, инклинометр, АЦП); 3 – мотор-редуктор; 4 – подвес; 5 – датчик, передвигающийся вдоль балки 1 с помощью пары винт-гайка

Fig. 2. Profilometer: 1 – beam driven by a gear from a reversing engine and with a driving screw; 2 – control unit including (electronic data warehouse, inclinometer, AD converter); 3 – gear motor; 4 – suspension; 5 – sensor, moving along beam 1 by means of the screw nut set

specified coating and distributing it at a set height thus providing the required integrity of ledges. The maintenance of the surface coating condition differs in that the grip is regulated according to the dispersion of ledge height range in the ledge fraction range, and the ledge range is selected according to the required roughness parameters and is based on the set law of distribution. In order to practically assess the roughness, it is sufficient to determine its four main characteristics: average valley depth (ledge height); average increment of roughness; ledge integrity; height range dispersion. For this purpose we suggest using the forgotten technique of determining roughness with profilometer (Fig. 2).

The roughness parameters are determined according to the profilogram. Such devices are not so expensive as contactless ones, whereas they can be used for crushed-stone pavements. The main requirement for them is that the needle diameter must exceed the width of roughness valleys. The mean square deviation of the rough surface ledge range is actually determined. Such a method provides correlation with grip parameters. This parameter is invariant to the selected reference level.

When output parameters of the required roughness and strength of covering of the forest road are determined, it is possible to pass to development of technology of construction of constructive layers of the forest highway with use of the road-building machinery and forest machinery.

Development of a technology of building a logging road with the use of milling cutters for soil stabilization

In order to build logging roads at considerable distances from public roads, it is convenient to use LD-30 universal trucks (bullgrader) to perform a wide variety of works: top-soil stripping and excavation, heavy-soil puddling, low fill construction, road levelling, etc. It is necessary to pay attention for the novelty of Tikhvin's plant – universal road machine UDM-T with dump VEPS for such works.

In order to build logging roads via soil strengthening, distributors of cement and other powdery binders on the basis of the T-158 tractor are used. It is suitable also for transporting CHP plant powdery waste which is proposed to be used in the clay soil strengthening technology with the use of crushed slag and sand together with the binder distribution (sodium fluosilicate) in the amount of 8–10% of the liquid glass weight. The structure of the complex binder includes the main component and the hardening activator: soda and alkali alloy with Na_2CO_3 content not less than 95% and that of NaOH

Когда определены выходные параметры требуемой шероховатости и прочности покрытия лесовозной дороги, можно переходить к разработке технологии возведения конструктивных слоев лесовозной автомобильной дороги с использованием лесодорожной техники.

Разработка технологии строительства лесовозной автомобильной дороги с использованием дисковых фрез для укрепления грунтов

Для строительства лесовозных автодорог, удаленных на значительные расстояния от автодорог общего пользования, удобно использовать универсальные лесодорожные машины типа грейдеров ЛД-30 для выполнения широкого спектра работ: снятие и разработка растительного грунта, разрыхление тяжелых грунтов, возведение невысоких насыпей, планировка земляного полотна и т. д. Следует для таких работ обратить внимание на новинку Тихвинского завода — универсальную дорожную машину УДМ-Т с отвалом ВЕПС.

Для устройства лесовозных дорог способом укрепления грунтов применяют распределители цемента и других порошкообразных вяжущих материалов на базе тягача Т-158. Он подходит и для перевозки порошкообразных отходов ТЭЦ, которую предлагается использовать в технологии укрепления глинистых грунтов с использованием шлакового щебня и песка при распределении вяжущего (кремнефтористый натрий) в количестве 8–10% от массы жидкого стекла. Комплексное вяжущее состоит из основного компонента и активатора твердения в составе: содощелочной сплав с содержанием Na_2CO_3 не менее 95% и NaOH не менее 2 мас. %, жидкое стекло с модулем 1,7–1,8 и плотностью 1,15–1,25 г/см³. Основной компонент — молотые слабоактивные шлаки черной металлургии.

Для завершения самораспада укрепленного стале-плавивильным конверторным шлаком глинистого грунта после стабилизации в течение года несущего слоя лесовозной дороги необходимо повторное выравнивание, уплотнение и укатка верхнего слоя дорожной одежды [8–11]. Для строительства покрытий лесовозных дорог по способу укрепления грунта вяжущими применимы фрезы ДС-73 и ДС-74 на базе пневмоколесного трактора Т-158К [12]. Его глубины обработки 250 мм [13] достаточно для устранения образовавшихся дефектов из-за остаточных процессов самораспада в шлаке. Для переувлажненных почв, в поймах рек и ручьев с избыточным проточной ключевой воды лежневки возводятся по типу «колодцев» (рис. 3–4).

Технология их сооружения отличается тем, что сначала строится обычная лежневка и «давливается» во влагонасыщенный грунт трелевочником, нагруженным подвижным составом, и поверх нее прокладывается следующая лежневка. Этим способом выполняют и ремонт дороги на болотах III типа, удалив ножом бульдозера покрытие из местного водонасыщенного грунта. Для укрепления глинистых, труднопроходимых даже после дождя участков лес-

not less than 2% by weight, liquid glass with a modulus of 1.7–1.8 and with a density of 1.15–1.25 г/см³. The main component is ground mild ferrous slags.

In order to complete the self-disintegration of the clay soil strengthened by converter slag after a year-long stabilization of the logging road bearing layer, another leveling, tamping and rolling of the top layer of road pavement is required [8–11]. In order to build logging road coatings depending on the way of soil strengthening by binders, DS-73 and DS-74 milling cutters on the basis of the T-158K [12] pneumatic-tire tractor are used. Its operating depth of 250 mm [13] is enough to eliminate the defects forming because of residual self-disintegration processes in slag.

For water-logged soils in flood plains with great amounts of flow spring water, well-type plank-roads are built (as shown in Fig. 3, 4).

The technology of their construction differs in that at first the usual plank-road is built, then it is pressed into waterlogged soil by the skidder loaded with rolling stock, and after that another plank-road is laid over it. This technique is also used to repair the III type swamp roads previously removing the coating from local waterlogged soil with a bulldozer knife. In order to strengthen clay sections of logging roads almost impassable even after rain, a coating similar to a plank-road must be applied to I and II type swamps (Fig. 4). But instead of a continuous transverse subfloor of balance 3, sleepers must be laid at a distance of 1–1.5 m. Dry sections of the road with sufficient soil moisture permeability are built by roadbed filling for a band from logging residue with a thickness not <15–20 cm with account of its 3–4-fold sealing.

The design features of plank-roads are as follows. All plank-roads are built on 2 longitudinal plank beds from tree-lengths. They are used to fasten the transverse subfloor of logs 3. The design strength is provided by wire binding the plank beds, the transverse logs and longitudinal tree-lengths laid over the logs. At this stage of construction it is essential to dip the plank beds deeper to secure full contact between the transverse subfloor and soil.



Рис. 3. Устройство лежневки на лесовозной дороге на подходе к водопропускному сооружению

Fig. 3. Arrangement of a forest road on the approach to a water passage facility

ных дорог должно применяться покрытие, аналогичное лежневке для болот I и II типов (рис. 4).

Но вместо сплошного поперечного наката баланса 3 на расстоянии 1–1,5 м должны укладываться шпалы. Поперечный накат 3 состоит из бревен и баланса. Балансы — отрезки хлыстов или бревен, имеющие круглую форму и предназначенные для дальнейшей переработки. Сухие участки трассы с достаточной влагопроницаемостью грунта обустривают отсыпкой полотна на прослойку из порубочных остатков древесины толщиной не менее 15–20 см с учетом ее уплотнения в 3–4 раза.

Конструктивные особенности лежневых дорог следующие. Все лежневки сооружаются на сланях: двух продольных лежаках из хлыстов. Они служат для крепления поперечного наката бревен 3. Прочность конструкции обеспечивается проволоочной увязкой сланей, поперечных бревен и продольных хлыстов, уложенных поверх бревен. На этом этапе строительства обязательно углубление слани для полного прилегания поперечного наката к грунту. Это позволяет равномерно распределить нагрузки от подвижного состава по ширине дороги. Небрежное выполнение этой операции ведет к поломке поперечного провисающего бревна, что характерно для зимнего периода строительства, когда слань опирается на замерзший грунт. Двухопорный поперечный настил не выдерживает нагрузки от транспорта. А весной, когда важно успеть вывезти заготовленный лес с зимней делянки, увеличивается опасность попадания нагруженного лесом автомобиля в вытаявшую, фактически заранее подготовленную строителями ловушку (рис. 5).

Важным элементом лежневой дороги являются также колесопроводы 4. Название это произошло от внешнего восприятия их функционального назначения, так как на них приходится основная нагрузка от колеса. Для них надо равномерно распределить нагрузки вдоль дороги. Поэтому при их сооружении особенно важна монолитность. Колесопроводы изготавливаются из хлыстов. Для монолитности соединение хлыстов не обязательно должно быть физическим. Их комлевые части достаточно расположить встык как можно ближе друг к другу. Но параллельные хлысты на этом участке должны быть непрерывными. Для монолитности колесопровода комлевые части стыков должны плотно прикручиваться двумя скрученными проволоками.

Конструкция, рассчитанная на основе МОН 2-2001 «Проектирование нежестких дорожных одежд», представлена на рис. 6.

В отличие от жесткой конструкции сланей, работающей по принципу понтонного моста с заданной скоростью осадки, обусловленной скоростью фильтрации воды через торфяную подушку, эта конструкция может применяться совместно с геосетками, которые хорошо зарекомендовали себя с нежесткими дорожными одеждами при строительстве лесовозных дорог [11]. Благодаря использованию геосеток значительно повышаются сроки службы лесовозной дороги, особенно в осенний и весенний периоды паводков.

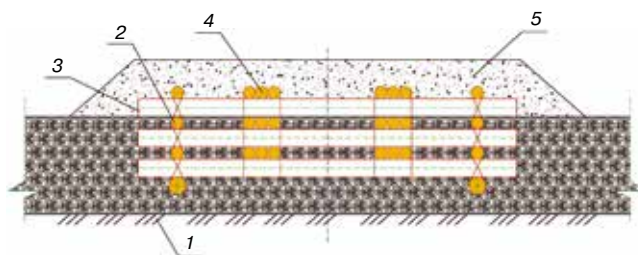


Рис. 4. Лежневка для переувлажненных почв: 1 – плотный нижний слой грунта; 2 – слани продольные; 3 – поперечный баланс из шпал или бревен; 4 – продольный колесопровод из хлыстов; 5 – верхний грунтовый слой дорожной одежды

Fig. 4. Plank-road for water-logged soils: 1 – dense lower soil layer; 2 – longitudinal slumps; 3 – transverse balance from sleepers or logs; 4 – longitudinal log-tread road from tree-lengths; 5 – top soil layer of road pavement

It makes it possible to uniformly distribute loads from the rolling stock across the width of the road. Carelessness in performing this operation causes breakage of the transverse sagging log, which is typical of construction in winter when plank beds lean on the frozen soil. A two-point transverse subfloor does not bear the loads from transport. And in the spring, when it is important to timely haul the cut wood from the winter timber site, the danger increases of the truck loaded with the wood falling in this trap which appeared after snow has melted, as it seen on the Fig. 5.

An important element of the plank-road is also a log-tread road 4. For them it is necessary to distribute uniformly loads along the road. Therefore, integrity is especially important in their construction. Log-tread roads are made from tree-lengths. To provide integrity, tree-lengths do not have to be connected physically. It is enough to arrange their bottom parts end-to-end as close as possible. But parallel tree-lengths on this section must be continuous. To provide the log-tread road integrity, bottom parts of joints must be tightly fastened by two strand wires.

The structure calculated on the basis of International Industry-specific Road Standards 2-2001 «Design of flexible road pavements» as shown in Fig. 6.

Unlike a rigid plank bed structure working on the pontoon bridge principle with a given settlement speed de-



Рис. 5. Просадка сланей в глинистых грунтах старой лесовозной дороги
Fig. 5. Shale sump in clay soils of the old logging road

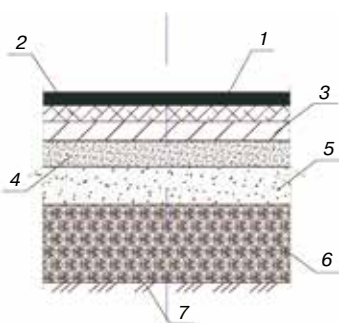


Рис. 6. Схема конструкции дорожной одежды при использовании конструктивных слоев временной лесовозной дороги: 1, 2 – плотный и щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА) для автодорог общего пользования повышенных категорий при расширении без демонтажа автодороги; 3 – крупно-зернистый слой асфальтобетона; 4 – дренарующий слой асфальтобетона; 5 – фракционированный шлаковый щебень, уложенный способом заклинки из литого шлака; 6 – укрепленный шлаковым щебнем грунт временной лесовозной дороги; 7 – уплотненный нижний слой основания грунта

Fig. 6. A road pavement design scheme in using temporary logging road constructive layers: 1, 2 – dense and stone mastic asphalt (SMA) for public roads of upper categories at the extension of roads; 3 – the coarse-grained asphalt concrete layers; 4 – the draining asphalt concrete layers; 5 – choke fractionated crushed slag from cast slag; 6 – the temporary logging road soil strengthened by crushed slag; 7 – the tamped soil base low layer

Сравнение строительства с использованием сланей и традиционных технологий укрепления грунтов из отходов промышленности показывает упрощение технологии, снижение рисков ее нарушения, сокращение строительной техники, и использование его для переустройства для военных, а затем дорог общего пользования с капитальным покрытием. Это невозможно в случае использования сланей, их надо удалять во избежание гниения в увлажненных слоях глинистого грунта.

Таким образом, предложенная на рис. 6 конструкция дорожной одежды лесовозной дороги, в зависимости от требуемой интенсивности движения, может быть реализована следующим составом лесодорожных машин: мульчер, ротаватор, грейдозер, распределитель порошкообразных материалов и фрез ДС-73 и ДС-74 на базе пневмоколесного трактора со сменным навесным оборудованием Т-158К. Для уплотнения и укатки рекомендуем применять решетчатые и кулачковые виброкатки с регулируемой амплитудой колебаний для окончательного формирования шероховатого слоя покрытия лесовозной дороги на основе комплексного вяжущего.

Вывод. Установлена возможность закрепления глинистых грунтов саморассыпающимися шлаками. Разработанная с учетом рисков технология возведения временных лесовозных и капитальных покрытий этих дорог современными видами дорожно-строительных и специализированных машин для строительства и содержания лесовозных дорог позволит развивать сеть лесовозных автодорог и параллельно уменьшать воздействие на окружающую среду со стороны отходов промышленности, скопившихся в промышленных зонах на значительном удалении от лесовозных автомобильных дорог.

Список литературы

1. Баран С., Войциковска-Капуста А. Луковска Г., Бик-Малодзиньска М., Весоловская-Добрук С. Влияние илового компоста на некоторые свойства мелиорированных земель // *Архивы охраны окружающей среды*. 2015. № 2. Т. 41. С. 82–88. DOI: <https://doi.org/10.1515/aep-2015-0022>.
2. Кондрашова Е.В., Скрыпников А.В., Скворцова Т.В. Модель определения экономических границ зон действия поставщиков материалов в условиях вероятностного характера дорожного

pending on the water filtration rate through peat mattress, this structure can be applied together with geogrids which proved effective with flexible road pavements in logging road construction of [11]. Thanks to geogrids, the logging road service life, especially in autumn and spring during flood periods, considerably increases.

The comparison of construction with the application of plank beds and of traditional technologies of soil strengthening using industrial waste demonstrates a simpler technology, a reduction of risk of its violation, a reduction of construction machinery and a possibility to use it for changing military, and then public roads with permanent pavement. This is impossible when plank beds are used, they must be deleted to avoid rotting in the humidified layers of clay soil.

Thus, the design of the pavement of the forest road proposed in Figure 6, depending on the required traffic intensity, can be implemented by the following composition of forestry machines: mulcher, rotator, grader, distributor of powder materials and mills DS-73 and DS-74 on the basis of pneumatic wheel tractor with interchangeable attachments Т-158К. For compaction and rolling, we recommend the use of lattice and cam vibratory rollers with an adjustable amplitude of vibrations for the final formation of a rough coating layer of a forest road based on a complex binder.

Conclusion. The technology of building temporary logging roads and their permanent surfaces by modern road-building, logging machinery and specialized machines for the construction and maintenance of logging roads developed with account of risks will contribute to the development of logging road network and to a simultaneous reduction of the environmental impact from the industrial waste which is stored in industrial zones at a considerable distance from logging roads.

References

1. Baran S., Wójcikowska-Kapusta A., Żukowska G., Bik-Malodzińska M., & Wesolowska-Dobruk S. (2015). Influence of sludge-ash composts on some properties of reclaimed land. *Arkhivy okhrany okruzhayushchei sredy*. No. 41 (2), pp. 82–88. DOI: <https://doi.org/10.1515/aep-2015-0022>. (In Polish).
2. Kondrashova E.V., Skrypnikov A.V., Skvorcova T.V. Model for defining the economic boundaries of the areas of operation of suppliers of materials in conditions of probabilistic nature of road construction of forest

- строительства лесовозных автодорог // *Фундаментальные исследования*. 2011. № 8. С. 379–385.
3. Штефан Ю.В., Бондарев Б.А., Янковский Л.В. Применение кубовидного литого шлакового щебня для строительства и ремонта магистральных лесных дорог // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2016. № 10. С. 11–16.
 4. Штефан Ю.В., Бондарев Б.А. Количественная оценка риска получения асфальтобетонных смесей для городских автомобильных дорог // *Международная конференция «Актуальные проблемы машиностроения» (AIME 2018)*. Новосибирск. 2018. С. 570–573. DOI: <https://doi.org/10.2991/aime-18.2018.109>
 5. Лю Г., Чэнь С., Цзэн Ц., Цуй Х., Фан Ю., Гу Д. и др. Факторы риска для чрезвычайно серьезных дорожно-транспортных происшествий: результаты национального статистического годового отчета Китая о дорожно-транспортных происшествиях // *Plos One*. 2018. № 13 (8). С. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201587>
 6. Бабапур Р., Нагди Р., Гаджар И., Мортазави З. Оптимизация профиля лесных дорог с использованием метаэвристических методов // *Прикладное программное обеспечение*. 2018. № 64. С. 126–137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.12.015>.
 7. Кочетков А.В., Чванов А.В., Аржанухина С.П. Научные основы нормирования шероховатых поверхностей дорожных покрытий // *Вестник Волгогр. ГАСУ. Строительство и архитектура*. 2009. № 14. С. 80–86.
 8. Maharaj C., White D., Maharaj R., Morin C. Re-use of steel slag as an aggregate to asphaltic road pavement surface. *Cogent Engineering*. 2017. No. 4 (1). DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1416889>.
 9. Подольский В.П., Лукашук А.Г., Тюков Е.В. Применение композитов грунто-шлаковых соединений для повышения качества обслуживания дорог с низкой плотностью движения // *Международный журнал прикладных инженерных изысканий (IJAER)*. 2016. № 8. Т. 11. С. 5817–5821.
 10. Подольский В.П., Лукашук А.Г. Результаты исследований зависимости физико-механических параметров образцов сталеплавильного шлака от содержания высокомолекулярного жидкого стекла // *Дороги и мосты*. 2015. № 34. С. 23–38.
 11. Ковалев Н.С. Обоснование длительности воздействия климатических факторов при моделировании ускоренного испытания асфальтобетона из шлаковых материалов // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2014. № 3 (42). С. 163–171.
 12. Баловнев В.И., Селиверстов Н.Д., Данилов Р.Г. Исследование работы фрезы рыхлительно-смесительного агрегата ресайклера // *Вестник машиностроения*. 2017. № 10. С. 46–48.
 13. Баловнев В.И., Селиверстов Н.Д. Определение параметров фрезерно-гранулирующего смесительного агрегата ресайклера // *Механизация строительства*. 2015. № 2. С. 16–19.
 - roads. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2011. No. 8, pp. 379–385. (In Russian).
 3. Shtephan Yu.V., Bondarev B.A., Yankovskii L.V. The use of cubical cast slag crushed stone for construction and repair of trunk logging roads. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya*. 2016. No. 10, pp. 11–16. (In Russian).
 4. Shtephan Yu.V., Bondarev B.A. Quantitative risk assessment of engineering slag asphalt mixes for urban roads. *Proceedings of the International Conference «Actual Issues of Mechanical Engineering» (AIME 2018)*. Novosibirsk. 2018, pp. 570 – 573. DOI: <https://doi.org/10.2991/aime-18.2018.109>
 5. Liu G, Chen S, Zeng Z, Cui H, Fang Y, Gu D, Yin Z, Wang Z. Risk factors for extremely serious road accidents: Results from national road accident statistical annual report of China. *Plos One*. 2018. No. 13 (8), pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201587>.
 6. Babapour R., Naghdi R., Ghajar I., Mortazavi Z. Forest road profile optimization using meta-heuristic techniques. *Applied soft computing*. 2018. No. 64, pp. 126–137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.12.015>.
 7. Kochetkov A.V., Chvanov A.V., Arzhanukhina S.P. Scientific fundamentals of norm-setting for uneven surfaces of road pavement. *Vestnik VolgGASU. Stroitelstvo I Architektura*. 2009. No. 14, pp. 80–86. (In Russian).
 8. Maharaj C., White D., Maharaj R., Morin C. Re-use of steel slag as an aggregate to asphaltic road pavement surface. *Cogent Engineering*. 2017. No. 4 (1). DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1416889>.
 9. Podolsky V.P., Lukashuk A.G., Tykov E.B. Slag – soil composites application for service performance enhancement of the roads with low traffic density. *Indexed journal international journal of applied engineering research (ISAER)*. 2016. Vol. 11. No. 8, pp. 5817–5821. (In Russian).
 10. Podolsky V.P., Lukashuk A.G. Results of studies of dependence of physical and mechanical parameters of steel-melting slag samples on content of high-modulus liquid glass. *Dorogi I Mosty*. 2015. No. 2 (34), pp. 23–38. (In Russian).
 11. Kovalev N.S. Substantiation of climatic factors exposure duration when modeling accelerated test of asphalt concrete from slag materials. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2014. No. 3 (42), pp. 163–171. (In Russian).
 12. Balovnev V.I., Seliverstov N.D., Danilov R.G. Research of mill operation of ripping-mixing aggregate of recycler. *Russian Engineering Research*. 2017. No. 10, pp. 46–48. (In Russian).
 13. Balovnev V.I., Seliverstov N.D. Determination of the parameters of milling and granulation mixing unit of road recycler. *Mekhanizatsiya Stroitelstva*. 2015. No. 2 (848), pp. 16–19. (In Russian).

А.С. ИНОЗЕМЦЕВ, канд. техн. наук (inozemcevas@mgsu.ru),
Е.В. КОРОЛЁВ, д-р техн. наук (korolevev@mgsu.ru), Т.К. ДОУНГ, аспирант

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Структурная модель течения пластифицированных цементно-минеральных смесей

Описан сложный характер кривой течения цементно-минеральных смесей, пластифицированных поликарбоксилатным пластификатором. Выделены участки кривой, которые согласно модели Оствальда–Вейля при увеличении скорости сдвига последовательно характеризуют псевдопластическое, адилатантное или апсевдопластическое, дилатантное и псевдопластическое течение. Отмечено, что различные концепции для объяснения реологического поведения дисперсных систем не позволяют анализировать аномальный участок. При этом такой идентифицируемый участок кривой описывается как сдвиговое расслоение или срыв течения. Установлено, что причиной реологической аномалии на кривой течения исследуемых пластифицированных цементных смесей является формирование структурной неоднородности в системе с равномерным начальным распределением воды. Интенсивность реологической аномалии определяется балансом величин изменения напряжения сдвига в зонах «сгущения» и «разряжения» структуры смеси, соответственно приводящих к уменьшению и увеличению структурного соотношения h/d_f относительно начального значения. Предложена структурная модель процесса формирования неоднородности структуры исследуемых смесей. Предложен обобщенный геометрический критерий, учитывающий параметры структуры смеси и позволяющий устанавливать границы аномалии течения.

Ключевые слова: цементно-минеральные пасты, пластифицированные композиции, поликарбоксилатный пластификатор, реологическая кривая, кривая течения, аномалия течения, реологическая аномалия, структурная модель.

Работа выполнена в рамках соглашения № 075-15-2019-1223 о предоставлении субсидий для реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (идентификатор проекта – RFMEFI58318X0072) при финансовой поддержке Минобрнауки РФ.

Для цитирования: Иноземцев А.С., Королёв Е.В., Доунг Т.К. Структурная модель течения пластифицированных цементно-минеральных смесей // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 90–96. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-90-96>

A.S. INOZEMTSEV, Candidate of Sciences (Engineering) (inozemcevas@mgsu.ru),
E.V. KOROLEV, Doctor of Sciences (Engineering) (korolevev@mgsu.ru), T.Q. DOUNG, graduate student
National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Structural Flow Model of Plasticized Cement-Mineral Mixtures

The complex type of the flow curve of cement-mineral mixtures plasticized by a polycarboxylate plasticizer is described in this work. The sections on the rheological curve which consistently characterize a pseudoplastic, dilatant or apseudoplastic (anomalous section), dilatant and pseudoplastic flow type are identified. It is noted that various concepts for explaining the rheological behavior of disperse systems do not allow to analyze the anomalous section. Shear stratification or stalling of the flow explains the presence of such a section. It is established that the cause of the rheological anomaly on the flow curve of the studied plasticized cement mixtures is the formation of structural heterogeneity in a system with a uniform initial distribution of water. The intensity of the rheological anomaly is determined by a change in the structural ratio of the thickness of the interlayer to the diameter of the particle relative to the initial value. A structural model of the process of formation of the heterogeneity of the structure of the studied mixtures is proposed. A geometric criterion that takes into account the structure parameters of the mixture and allows one to establish the boundaries of the flow anomaly is proposed.

Keywords: cement-mineral pastes, structural model, polycarboxylate plasticizer, rheological curve, flow curve.

Work is performed within the agreement No. 075-15-2019-1223 on granting subsidies for realization of the Federal Target Program “Research and Development in Priority Directions of Development of Scientific-Technological Complex of Russia for 2014-2020” (project ID – RFMEFI58318X0072) with financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

For citation: Inozemtsev A.S., Korolev E.V., Doung T.Q. Structural flow model of plasticized cement-mineral mixtures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 90–96. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-90-96>

Исследованию эффективности применения поликарбоксилатных пластификаторов в цементных смесях посвящено множество работ, например [1–5]. Общий механизм действия поликарбоксилатных пластификаторов связывают с формированием электростатического и стерического эффектов [6], зависящих от химической природы и пространственной структуры полимера. В [7] отмечается роль электроповерхностных свойств и явлений в цементных системах на различных стадиях их твердения. Согласно [8], молекулы поликарбоксилатных пла-

стификаторов адсорбируются на поверхности с положительным ζ -потенциалом, например эттрингита и гидросульфоалюмината кальция. При этом отмечается возможность участия в адсорбции пластификатора минеральных добавок [7], которые в зависимости от продолжительности гидратации портландцемента при pH водной фазы менее 10 имеют сопоставимое значение ζ -потенциала.

В [9] установлено, что цементные смеси, содержащие поликарбоксилатный пластификатор, характеризуются сложным характером течения: на зависимо-

стях предельное напряжение сдвига – скорость сдвига присутствует аномальный участок, характеризующийся снижением предельного напряжения сдвига $\tau(\dot{\gamma})$ с ростом скорости сдвига $\dot{\gamma}$. При этом важным условием является наличие пластификатора, вид минеральной добавки не оказывает существенного влияния. Диапазон скорости сдвига, в котором наблюдается реологическая аномалия, равен $0,5–0,8 \text{ с}^{-1}$.

В [10–12] перечислены концепции, предложенные для объяснения реологического поведения дисперсных систем. Концепция диссипации энергии вязкого трения на отдельных частицах и агрегатах, представленных в виде модельных цилиндров или сфер, предлагает для описания сложных кривых течения уравнения Эйнштейна, Куна, Кэссона, обобщенное уравнение течения и др.

Эти модели, в сущности, предназначены для описания общего явления – изменения вязкости дисперсных систем при увеличении скорости сдвига. В большинстве случаев они могут быть использованы с высокой достоверностью. Однако при описании сложного характера течения такие модели позволяют аппроксимировать лишь отдельные (как правило, начальный и конечный) участки кривой. Аномальный участок кривой $\tau(\dot{\gamma})$ называется переходным и не анализируется, хотя отчетливо идентифицируется и описывается как сдвиговое расслоение или срыв течения. Отсюда следует, что для описания сложного течения дисперсных систем необходимо построение структурной модели, учитывающей изменение не только конфигурации частиц, но и изменения силовых эффектов.

Материалы и методы исследования

В данной работе для исследования влияния минеральных добавок на реологические свойства пластифицированных цементно-минеральных смесей применяли портландцемент, минеральные добавки, воду и пластификатор. В качестве вяжущего вещества использовался портландцемент СЕМ I 42,5. Для обеспечения подвижности цементно-минеральных смесей применялся пластификатор на поликарбонатной основе Melflux 1641F. В качестве минеральных добавок использовались: зола-уноса, тонкоизмельченный ракушечник (далее – мука из ракушечника), тонкоизмельченный кварцевый песок (далее – мука из кварцевого песка), микрокремнезем. Химический состав минеральных добавок представлен в табл. 1.

В составе цементно-минеральной смеси варьировалось соотношение минеральной добавки к вяжущему веществу (табл. 2) при постоянном В/Ц=0,4 и количестве пластификатора – 1% от массы портландцемента [13].

Некоторые структурные параметры цементно-минеральных смесей представлены в табл. 3.

Исследование реологических характеристик пластифицированных цементно-минеральных смесей осуществлялось по показателю предельного напряжения сдвига на ротационном вискозиметре MCR-101 с измерительной системой «шар» VM08/Q1 диаметром 8 мм (радиус вращения – 36,5 мм, геометрический фактор – 4,813, системная константа $C_{SR} = 25,6$) [14].

Таблица 1
Table 1

Химический состав минеральных добавок
Chemical composition of mineral additives

Наименование (аббревиатура) минеральной добавки	Соединение, мас. %					
	SiO ₂	CaO+CaCO ₃	Al ₂ O ₃	FeO+Fe ₂ O ₃	MgO+MgCO ₃	Другое
П	94,5	0,3	–	2,5	0,1	2,3
Р	21,2	65	1,5	0,5	0,4	11,4
З	50	2,5	37	4,5	0,5	5,5
МКМ	90	3,5	–	–	–	6,5

Примечания: МКМ – микрокремнезем; П – мука из кварцевого песка; З – зола-уноса; Р – мука из ракушечника.

Таблица 2
Table 2

Маркировка цементно-минеральных смесей и соотношение компонентов
Marking of cement-mineral mixtures and ratio of components

№	Состав	Д/Ц	Состав	Д/Ц	Состав	Д/Ц	Состав	Д/Ц
1	Ц+МКМ-1	0,06	Ц+П-1	0,14	Ц+З-1	0,08	Ц+Р-1	0,2
2	Ц+МКМ-2	0,11	Ц+П-2	0,27	Ц+З-2	0,15	Ц+Р-2	0,41
3	Ц+МКМ-3	0,17	Ц+П-3	0,41	Ц+З-3	0,23	Ц+Р-3	0,68
4	Ц+МКМ-4	0,22	Ц+П-4	0,68	Ц+З-4	0,3	Ц+Р-4	0,95
5	Ц+МКМ-5	0,28	Ц+П-5	0,95	Ц+З-5	0,38	Ц+Р-5	1,22

Примечания: Д/Ц – соотношение между минеральной добавкой и портландцементом; Ц – портландцемент; обозначения «МКМ», «П», «З» и «Р» представлены в примечании к табл. 1.

Таблица 3
Table 3

Физические свойства компонентов и структурные параметры исследуемых смесей
Component physical properties and structural parameters studied mixes

№	Состав	Свойства дисперсной фазы		Расчетная толщина водной прослойки, $h_{в}$, мкм				
		d^* , мкм	$S_{уд}^{**}$, $10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$	Номер состава				
				1	2	3	4	5
1	Ц	6	32	1,25				
2	Ц+П	14	14	1,28	1,26	1,21	1,11	1,01
3	Ц+Р	5,6	16,8	1	0,83	0,68	0,58	0,5
4	Ц+З	19,1	20,9	1,23	1,2	1,17	1,14	1,1
5	Ц+МКМ	11,2	83,6	1,36	1,43	1,48	1,5	1,52

Примечания: * размер частиц, определенный по методу лазерной дифракции; ** – удельная поверхность, определенная по методу БЭТ.

Результаты и обсуждение

Сложный характер кривой течения цементно-минеральных смесей можно представить в общем виде (рис. 1), где выделяются четыре участка, описание которых с помощью модели Оствальда–Вейля выполнено следующим образом. Участок I характеризуется отчетливым псевдопластическим (показатель степени $n < 1$) течением. Участок II в зависимости от степени наполнения дисперсной фазой описывается адилатантным или апсевдопластическим* течением. Для участка III показатель степени $n > 1$, что присуще дилатантному характеру течения. На участке IV характер течения сменяется на псевдопластический ($n < 1$).

Согласно [9], смена характера течения (участок I – участок II – участок III) происходит через переходную зону, когда кривая течения имеет плато, потому границы каждого из участков могут быть определены в следующем диапазоне: начало участка II – при $\dot{\gamma} = 0,45 - 0,55 \text{ с}^{-1}$; начало участка III – при $\dot{\gamma} = 0,7 - 0,85 \text{ с}^{-1}$. Для всех рассмотренных смесей содержание дисперсной фазы является величиной постоянной. Однако наличие реологической аномалии (участок II) указывает на протекание структурных изменений, которые могут быть идентифицированы как уменьшение содержания дисперсной фазы.

Такой вариант структурных изменений (при постоянстве концентрации дисперсной фазы) возможен только при условии возникновения неоднородности в структуре смеси. Модель такой смеси можно представить как дисперсную систему, в которой дисперсная фаза представлена не отдельными частицами, разделенными прослойками жидкости толщиной $2h_0$, а агрегатами, состоящими из группы частиц, разделенных прослойками жидкости толщиной $2h_k$. Причем $h_0 \gg h_k$. Формирование такой структуры обуславливает перераспределение жидкости, приводящее к утолщению ее прослоек между части-

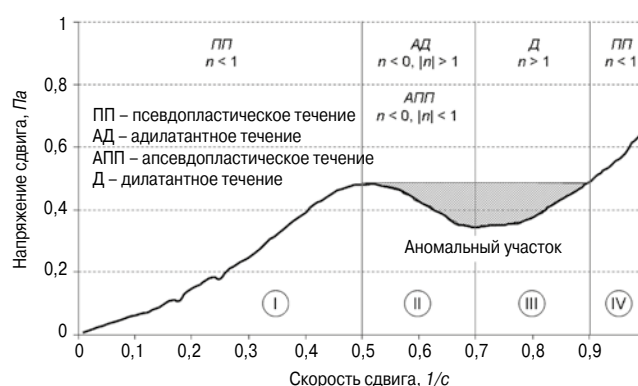


Рис. 1. Общее описание кривой течения пластифицированных цементно-минеральных смесей
Fig. 1. General description of the flow curve of plasticized cement-mineral mixtures

цами дисперсной фазой. Это эквивалентно снижению содержания дисперсной фазы, а следовательно, вязкости смеси (1):

$$v_f = \frac{\eta_{f,max}}{(1 + 2h/d_f)^3}, \tag{1}$$

где $\eta_{f,max}$ – максимальное содержание дисперсной фазы; d_f – диаметр частицы дисперсной фазы. Геометрическим критерием для оценки нарушения однородности распределения частиц является коэффициент однородности, который равен:

$$k_{gom} = \frac{L_1}{L_{N_f}} \cong \sqrt[3]{\frac{V_1}{V_{N_f}}}, \tag{2}$$

где L_i, V_i – размер и объем ячейки-решетки; индекс 1 указывает на одночастичное распределение, а N_f – на распределение агрегатов, состоящих из N_f частиц.

Естественно ожидать, что при $h_0 \gg h_k$ однородность дисперсной системы с увеличением количества частиц, входящих в агрегат, будет снижаться. При этом размер агрегата будет увеличиваться (рис. 2), причем наиболее интенсивно для агрегатов малых размеров.

* В [9] под адилатантным течением понимается течение дисперсной системы, для описания которого с помощью уравнения Оствальда–Вейля используется модель с $n < 0$ и $|n| > 1$, а под апсевдопластическим течением – с $n < 0$ и $|n| < 1$.

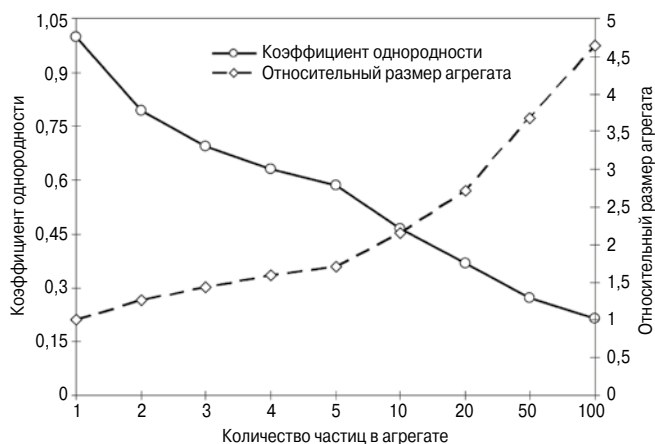


Рис. 2. Зависимость коэффициента однородности дисперсной системы и линейного размера агрегата от количества частиц в агрегате
Fig. 2. Dependence of dispersion uniformity coefficient and linear size of the aggregate on the number of particles in the aggregate

Физическая модель формирования неоднородности структуры описывается дифференциальным уравнением:

$$m \frac{d\vartheta}{dt} - 6\pi\eta_0 d_f \vartheta = 0, \quad (3)$$

где m , ϑ – масса и скорость частицы; d_f – диаметр частицы; η_0 – вязкость жидкости.

Первое слагаемое описывает силу, которая действует на частицу после ее контакта с рабочим органом измерительной системы (реометра), а второе слагаемое – силу сопротивления движению в вязкой среде (сила Стокса). Частица будет двигаться до контакта с другой частицей, и при достаточном уровне импульса образовавшийся агрегат продолжит движение до контакта со следующей частицей. Произойдет увеличение размера агрегата (закономерно увеличится число частиц, входящих в агрегат). Процесс будет продолжаться до достижения агрегатом уровня кинетической энергии, равной уровню тепловой энергии частиц в дисперсной системе.

Решение дифференциального уравнения (3) для первой частицы (контактировавшей с измерительной системой реометра) имеет вид:

$$\vartheta_1 = \vartheta_0 \exp\left(-18 \frac{\eta_0}{d_f^2 \rho_f} t\right), \quad (4)$$

где ϑ_0 – начальная скорость частицы; ρ_f – плотность частицы; t – время.

Столкновение с другой частицей произойдет через время, равное:

$$t_{c,1} = -\frac{d_f^2 \rho_f}{18 \eta_0} \ln\left(1 - \frac{H_0}{\vartheta_0 d_f^2 \rho_f} \frac{18\eta_0}{H_0}\right), \quad (5)$$

где $H_0 = 2(h_0 - h_k)$ – расстояние, пройденное частицей до контакта.

При этом уровень кинетической энергии частицы (агрегата) будет снижаться до уровня тепловой энергии:

$$E_{ag} = \frac{mN_f}{2} \vartheta_i^2 \approx Q_{ag}, \quad (6)$$

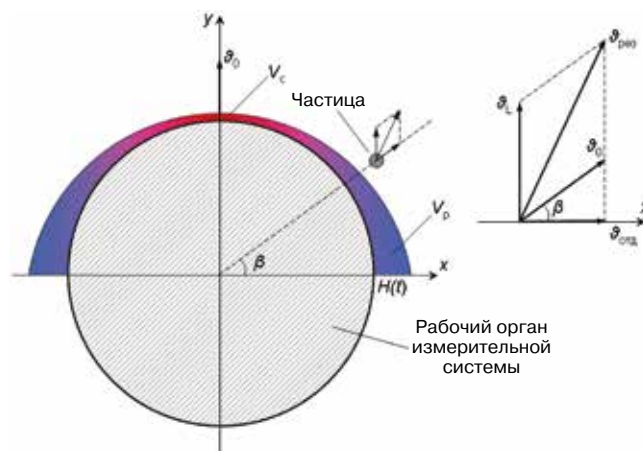


Рис. 3. Модель локального расслоения дисперсной системы
Fig. 3. Model of local stratification of a disperse system

где Q_{ag} – тепловая энергия движения агрегата, рассчитанная по коэффициенту диффузии A . Эйнштейна.

При контакте частиц смеси с рабочим органом измерительной системы реометра их движение, а следовательно, и структурная неоднородность зависят от угла в вертикальной α и горизонтальной β плоскости, под которым происходит контакт. Учитывая симметричность формы рабочего органа измерительной системы можно представить согласно рис. 3.

При определенном соотношении углов α и β движение рабочего органа реометра формирует вокруг собственной поверхности уплотненную зону, за границами которой происходит обратный процесс. Изменение скорости рабочего органа и частиц при увеличении скорости сдвига происходит с различной интенсивностью. При этом скорость отдаления частиц в соответствии с (4) и рис. 3 составит:

$$\begin{aligned} \vartheta_{отд,x} &= \vartheta_0 \exp\left(-\frac{18\eta_0}{d_f^2 \rho_f} t\right) \cos \alpha \cos \beta; \\ \vartheta_{отд,y} &= \vartheta_0 \exp\left(-\frac{18\eta_0}{d_f^2 \rho_f} t\right) \cos \alpha \sin \beta; \\ \vartheta_{отд,z} &= \vartheta_0 \exp\left(-\frac{18\eta_0}{d_f^2 \rho_f} t\right) \sin \alpha. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, смещение в трех направлениях будет формировать общее расстояние H , преодолеваемое частицей от поверхности рабочего органа. При этом движение измерительной системы продолжается лишь в одном направлении. Таким образом, локальное разуплотнение смеси формируется в результате протекания двух процессов. С одной стороны, это удаление из приграничного слоя частиц дис-

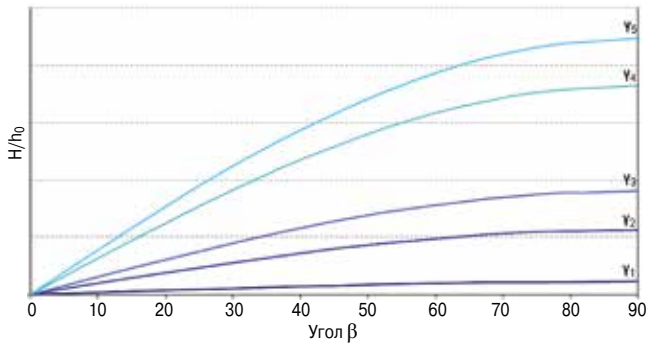


Рис. 4. Зависимость приведенного расстояния отдаления от угла движения частицы (γ_i – скорость сдвига: $\gamma_5 > \dots > \gamma_1$) при $\alpha=0$
Fig. 4. Dependence of the reduced distance of displacement from the movement angle of the particle (γ_i – shear rate: $\gamma_5 > \dots > \gamma_1$) at $\alpha=0$

персной фазы, а с другой – сближение частиц с формированием их агрегатов в «лобовой» зоне (рис. 3). В этом случае условие уменьшения напряжения сдвига дисперсной системы наступает вследствие изменения сил лобового сопротивления $F_{лс}$ (8), когда частицы, препятствующие движению рабочего органа измерительной системы в «периферийной» зоне, после перемещения на расстояние H не оказывают первоначального сопротивления, формируя разуплотненный объем V_p , а сгущение частиц в «лобовой» зоне приводит к повышению сил трения в некотором объеме V_c :

$$\tau = \frac{F_{лс} \rho_f}{48\pi\rho_0 R_0} \frac{\nabla v_0}{v_0}, \quad (8)$$

где $F_{лс}$ – сила «лобового» сопротивления; ∇v_0 – приращение скорости частицы.

При этом расстояние H будет зависеть от углов контакта частицы с рабочим органом реометра (рис. 4).

Таким образом, разница скорости измерительной системы и частиц приводит к разнице расстояний, которые они проходят за равный промежуток времени, формируя локальные объемы с различной плотностью:

$$\rho = v_{f,t} \rho_f + (1 - v_{f,t}) \rho_0,$$

где $v_{f,t}$ – объемное содержание дисперсной фазы в прослойке H_v от поверхности рабочего органа измерительной системы в момент t :

$$v_{f,t} = v_{f,0} \frac{H_v}{H_v - (H_L - H_f)},$$

где H_L, H_f – расстояние, прошедшее рабочим органом и частицей соответственно за время Δt . Это приводит к уменьшению напряжения сдвига при увеличении скорости сдвига (рис. 4).

Известна зависимость изменения напряжения сдвига от структурных параметров смеси [15]:

$$\tau = a \left(\frac{h_0}{d_f} \right)^{-b}, \quad (9)$$

где a, b – константы;

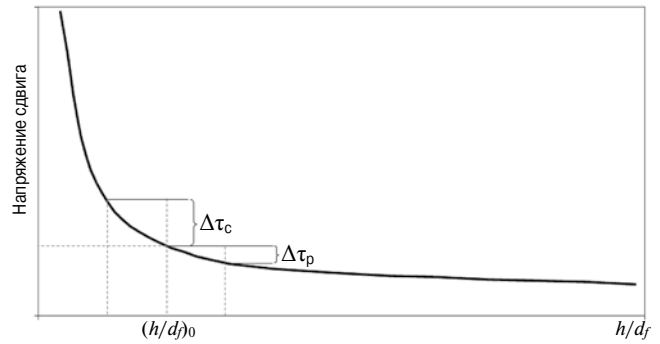


Рис. 5. Зависимость $\tau = f(h/d_f)$
Fig. 5. Dependence $\tau = f(h/d_f)$

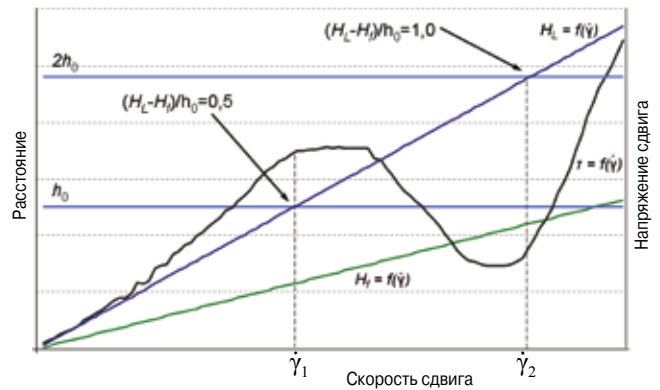


Рис. 6. Общий вид зависимости $H_f = f(\gamma)$ и $H_L = f(\gamma)$
Fig. 6. General view of dependence $H_f = f(\gamma)$ and $H_L = f(\gamma)$

$$\frac{h_0}{d_f} = \sqrt[3]{\frac{\eta_f}{v_f}} - 1.$$

Здесь максимальное содержание дисперсной фазы, которое для условий данной системы достигается при $h_0 \gg h_k$:

$$\eta_f = \frac{\eta_{f,\max}}{(1 + h_k/d_f)^3}, \quad (10)$$

где $\eta_{f,\max}$ – предельное содержание дисперсной фазы (для сферических монодисперсных частиц $\eta_{f,\max} = 0,745$).

Локальная неоднородность смеси, генерируемая рабочим органом измерительной системы, приводит к изменению толщины водной прослойки в отдельных слоях пластифицированной дисперсной фазы, что закономерно будет оказывать взаимно противоположное влияние (рис. 5). Т. е., как описано выше, уплотнение частиц в «лобовой» зоне способствует сгущению, что эквивалентно уменьшению h/d_f и естественному увеличению напряжения сдвига на величину $\Delta\tau_c$, а разуплотнение в «периферийной» зоне оказывает противоположный эффект, оценить который можно величиной $\Delta\tau_p$. При этом формирование аномальной зоны на кривой течения наступает при $\Delta\tau_p > \Delta\tau_c$ и восстановление системы при $\Delta\tau_c > \Delta\tau_p$.

С учетом начальной толщины прослойки h_0 для каждой из пластифицированных цементно-минеральных смесей общим условием проявления реоло-

Таблица 4
Table 4Границы реологической аномалии пластифицированных цементно-минеральных смесей
Boundaries of rheological anomaly of plasticized cement-mineral mixtures

Цементно-минеральный комплекс	Скорость сдвига, соответствующая началу/концу реологической аномалии, $\dot{\gamma}_{c,1}/\dot{\gamma}_{c,2}$, с ⁻¹					
	Номер состава					
	К	1	2	3	4	5
Ц+П	0,404 0,818	0,434 0,859	0,424 0,838	0,424 0,828	–	–
Ц+Р		0,463 0,791	0,495 0,545	–	–	–
Ц+З		0,394 0,798	0,394 0,798	0,384 0,788	0,374 0,758	–
Ц+МКМ		0,51 0,916	–	–	–	–

Примечание. Над чертой – начальная граница $\dot{\gamma}_{c,1}$ реологической аномалии, под чертой – граница $\dot{\gamma}_{c,2}$ реологической аномалии; К – контрольный состав.

гической аномалии может являться достижение некоторого критического состояния системы, когда

$$\frac{H_L - H_f}{h_0} \geq A_{кр}. \quad (11)$$

Анализ экспериментальных данных исследуемых дисперсных систем при варьировании скорости сдвига позволил установить критические значения предложенного геометрического критерия (рис. 6).

Анализ зависимостей $H_L=f(\dot{\gamma})$ и $H_f=f(\dot{\gamma})$ и сопоставление с $\tau=f(\dot{\gamma})$, позволил установить величину скорости сдвига $\dot{\gamma}_{c,1}$, соответствующую началу переходной зоны реологической аномалии, когда наблюдается смена нормального хода зависимости, и $\dot{\gamma}_{c,2}$, совпадающее с границей переходной зоны реологической аномалии, когда ход зависимости изменения напряжения сдвига приобретает классический вид. Для указанных границ $\dot{\gamma}_{c,1}$ и $\dot{\gamma}_{c,2}$ значения геометрического критерия $(H_L - H_f)/h_0$ равны 0,5 и 1 соответственно. Тогда можно рассчитать границы реологической аномалии для каждой цементно-минеральной смеси с учетом переходной зоны (табл. 4).

Таким образом, реологическая аномалия на кривой течения исследуемых пластифицированных цементных смесей возникает вследствие формирования структурной неоднородности. Интенсивность реологической аномалии определяется балансом ве-

личины изменения напряжения сдвига в зонах «сгущения» и «разряжения» структуры смеси, соответственно приводящих к уменьшению и увеличению структурного соотношения h/d_f относительно начального значения. Границы реологической аномалии независимо от применяемой минеральной добавки можно описать обобщенным геометрическим критерием, учитывающим параметры структуры смеси (толщина водной прослойки), а также перемещения рабочего органа реометра и частиц дисперсной фазы.

Заключение и выводы

Предложено описание сложного характера кривой течения цементно-минеральных смесей, включающей адилатантный или апсевдопластический участки течения, наличие которых идентифицируется с помощью модели Оствальда–Вейля при $n < 0$ и $|n| > 1$ или $n < 0$ и $|n| < 1$ соответственно. Установлено, что причиной реологической аномалии на кривой течения исследуемых пластифицированных цементных смесей является формирование структурной неоднородности в системе с равномерным начальным распределением воды. Предложен обобщенный геометрический критерий, учитывающий параметры структуры смеси и позволяющий устанавливать границы аномалии течения.

Список литературы

1. Калашников В.И., Тараканов О.В. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения // *Строительные материалы*. 2017. № 1–2. С. 62–67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-745-1-2-62-67>
2. Молчанов А.О., Нелюбова В.В., Кузьмина Н.О., Строкова В.В. Оценка эффективности пластификаторов различного происхождения // *Ресурсо-энергоэффективные технологии в строительном комплексе региона*. 2016. № 7. С. 73–76.

References

1. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V. On the use of complex additives in new generation concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 1–2, pp. 62–67. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-745-1-2-62-67>
2. Molchanov A.O., Neljubova V.V., Kuz'mina N.O., Strokov V.V. Evaluation of the effectiveness of plasticizers of various origins. *Resursojenergojefektivnye tehnologii v stroitel'nom komplekse regiona*. 2016. No. 7, pp. 73–76. (In Russian).

3. Ларсен О.А., Дятлов А.К. Повышение эффективности мелкозернистых бетонов добавками поликарбоксилатных пластификаторов для монолитного домостроения // *Технологии бетонов*. 2013. № 10 (87). С. 14–15.
4. Горбунов С.П., Федоров Ю.Б., Трофимов Б.Я., Гамалий Е.А. Эффективность пластифицирующих добавок в самоуплотняющихся растворных смесях // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2005. № 13 (53). С. 43–49.
5. Лесовик В.С., Дегтев Ю.В., Воронов В.В. Вяжущие для малых архитектурных форм из самоуплотняющихся бетонов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2014. № 5. С. 85–90.
6. Пустовгар А.П., Бурьянов А.Ф., Василик П.Г. Особенности применения гиперпластификаторов в сухих строительных смесях // *Строительные материалы*. 2010. № 12. С. 62–65.
7. Петрова Т.М., Смирнова О.М., Фролов С.Т. Свойства пластифицированных композиций портландцемент – доменный шлак с учетом электроповерхностных явлений // *Вестник гражданских инженеров*. 2011. № 2 (27). С. 118–123.
8. Plank J., Hirsch C. Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption // *Cement and Concrete Research*. 2007. Vol. 37. Iss. 4, pp. 537–542.
9. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Т.К. Реологические особенности цементно-минеральных систем, пластифицированных поликарбоксилатным пластификатором // *Региональная архитектура и строительство*. 2019. № 3 (40). С. 24–34.
10. Пивинский Ю.Е. Реология дилатантных и тиксотропных дисперсных систем. СПб.: РИО СПбГТИ (ТУ), 2001. 174 с.
11. Кирсанов Е.А., Матвеев В.Н. Неньютоновское течение дисперсных, полимерных и жидкокристаллических систем. Структурный подход. М.: Техносфера, 2016. 379 с.
12. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. М.: Химия. 1988. 256 с.
13. Inozemtcev A., Korolev E., Duong T.Q. Study of mineral additives for cement materials for 3D-printing in construction // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. 032009.
14. Schatzmann M., Bezzola G.R., Minor H.-E., Windhab E. J., Fischer P. Rheometry for large-particulated fluids: analysis of the ball measuring system and comparison to debris flow rheometry // *Rheol Acta*. 2009. № 48. P. 715–733.
15. Королев Е.В., Баженов Ю.М., Альбакасов А.И. Радиационно-защитные и химически стойкие серые строительные композиты. Пенза; Оренбург: ИПК ОГУ, 2010. 364 с.
3. Larsen O.A., Djatlov A.K. Improving the efficiency of fine concrete with polycarboxylate plasticizers for monolithic housing construction. *Tehnologii betonov*. 2013. No. 10 (87), pp. 14–15. (In Russian).
4. Gorbunov S.P., Fedorov Ju.B., Trofimov B.Ja., Gamalij E.A. The effectiveness of plasticizing additives in self-compacting mortar mixtures. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2005. No. 13 (53), pp. 43–49. (In Russian).
5. Lesovik V.S., Degtev Ju.V., Voronov V.V. Cementing agents for small architectural forms made of self-compacting concrete. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. 2014. No. 5, pp. 85–90. (In Russian).
6. Pustovgar A.P., Buryanov A.F., Vasilik P.G. Features of the use of hyperplasticizers in dry building mixtures. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 12, pp. 62–65. (In Russian).
7. Petrova T.M., Smirnova O.M., Frolov S.T. Properties of plasticized Portland cement-blast furnace slag compositions taking into account electro-surface phenomena. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*. 2011. No. 2 (27), pp. 118–123. (In Russian).
8. Plank J., Hirsch C. Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption. *Cement and Concrete Research*. 2007. Vol. 37. Iss. 4, pp. 537–542.
9. Inozemcev A.S., Korolev E.V., Duong T.Q. Rheological features of cement-mineral systems plasticized by polycarboxylate plasticizer. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo*. 2019. No. 3 (40), pp. 24–34. (In Russian).
10. Pivinskij Ju.E. Reologija dilatantnyh i tiksotropnyh dispersnyh sistem [Rheology of dilatant and thixotropic disperse systems]. Saint Petersburg: RIO SPbGTI (TU). 2001. 174 p. (In Russian).
11. Kirsanov E.A., Matveenko V.N. Nen'jutonovskoe tehchenie dispersnyh, polimernyh i zhidkokristallicheskih sistem. *Strukturnyj podhod* [Non-Newtonian flow of disperse, polymer and liquid crystal systems. Structural approach]. Moscow: Tehnosfera. 2016. 379 p.
12. Ur'ev N.B. Fiziko-khimicheskie osnovy tekhnologii dispersnykh sistem i materialov [Physico-chemical principles of dispersed systems and materials technology]. M.: Himija. 1988. 256 p. (In Russian).
13. Inozemtcev A., Korolev E., Duong T.Q. Study of mineral additives for cement materials for 3D-printing in construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. 032009.
14. Schatzmann M., Bezzola G.R., Minor H.-E., Windhab E. J., Fischer P. Rheometry for large-particulated fluids: analysis of the ball measuring system and comparison to debris flow rheometry. *Rheol Acta*. 2009. No. 48, pp. 715–733.
15. Korolev E.V., Bazhenov Ju.M., Al'bakasov A.I. Radiatsionno-zashchitnye i khimicheski stoikie sernye stroitel'nye kompozity [Radiation-protective and chemically resistant sulfur composite building]. Penza, Orenburg: IPK OGU. 2010. 364 p. (In Russian).

УДК 691.421.24

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-97-102>

В.Д. КОТЛЯР¹, д-р техн. наук (diatomit_kvd@mail.ru); Н.И. НЕБЕЖКО², инженер, индивидуальный предприниматель; Ю.В. ТЕРЕХИНА¹, инженер, преподаватель (yuliya-2209@mail.ru); Ю.В. ПОПОВ³, канд. геол.-мин. наук (popovsfedu@gmail.com); Ю.И. НЕБЕЖКО⁴, директор; Р.А. ЯЩЕНКО¹, инженер (roma.8929@mail.ru)

¹ Донской государственной строительный университет (344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

² Индивидуальный предприниматель (344000, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 108)

³ Южный федеральный университет (344006 г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42)

⁴ ООО «Элитная строительная керамика» (346421, г. Новочеркасск, ул. Александровская, 86А)

Особенности получения клинкерного кирпича черного цвета

Представлены результаты исследований влияния ряда факторов на получение стенового и дорожного клинкерного кирпича черного цвета. Показаны примеры изделий и архитектурных решений, отражены проблемы и основные технологические задачи для получения черного цвета изделий, приводятся также данные по видам глин, наиболее пригодных для получения клинкерного кирпича, рассмотрены принципы получения оптимальной структуры обожженного материала. Дается характеристика элементов хромофоров с учетом их доступности для получения клинкерного кирпича черного цвета. Приводятся краткие хромофорные свойства выделенных элементов и составы наиболее распространенных черных керамических пигментов. Рассматривается вопрос о наиболее устойчивых кристаллических соединениях, придающих окраску керамическому материалу, – это шпинели, гранаты, форстерит, диопсид и др. Выделены эффективные кристаллические соединения черного цвета для получения кирпича с соответствующей окраской. Показано влияние стекловатой фазы на насыщенность цвета керамического материала и взаимосвязь с физико-техническими свойствами изделий. Представлены основные рекомендации по определению возможности получения клинкерного кирпича черного цвета на основе различных видов глинистого сырья и технологические принципы производства, основанные на создании особой матричной структуры керамического материала с учетом долговечности и сохранения цвета изделий.

Ключевые слова: клинкерный кирпич, цвет, глина, пигмент, краситель, структура, долговечность.

Для цитирования: Котляр В.Д., Небежко Н.И., Терехина Ю.В., Попов Ю.В., Небежко Ю.И., Ященко Р.А.

Особенности получения клинкерного кирпича черного цвета // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 97–102.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-97-102>

V.D. KOTLYAR¹, Doctor of Sciences (Engineering) (diatomit_kvd@mail.ru); N.I. NEBEZHKO², Engineer; YU.V. TEREKHINA¹, Engineer (yuliya-2209@mail.ru); YU.V. POPOV³, Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy) (popovsfedu@gmail.com); YU.I. NEBEZHKO⁴, Director; R.A. YASHCHENKO¹, Engineer (roma.8929@mail.ru)

¹ Don state technical University (1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation)

² Individual Entrepreneur (108, Prosvesheniia Street, Novocherkassk, 346000, Russian Federation)

³ Southern Federal University (105/42, Bolshaya Sadovaya Street, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation)

⁴ Elitnaya stroitel'naya keramika (86A, Aleksandrovskaya Street, Novocherkassk, Rostov Region, 346421, Russian Federation)

Features of Black Clinker Brick Production

The results of studies on the influence of a number of factors on obtaining wall and road clinker brick of black color are presented. Examples of products and architectural solutions are given, problems and main technological tasks for obtaining a dark color of products are reflected, data on types of clays most suitable for producing clinker brick are given, principles of obtaining the optimal structure of burnt material are considered. The characteristics of chromophore elements are given taking into account their availability for obtaining black brick clinker. Brief chromophore properties of the selected elements and compositions of the most common black ceramic pigments are given. The question of the most stable crystalline compounds that give color to the ceramic material – spinel, garnet, forsterite, diopside, and others – is examined. Efficient black crystalline compounds are selected to produce a brick with a corresponding color. The influence of the glassy phase on the color saturation of the ceramic material and the relationship with the physical and technical properties of the products are shown. The main recommendations for determining the possibility of obtaining clinker brick of black color on the basis of various types of clay raw materials and technological principles of production based on the creation of a special matrix structure of ceramic material, taking into account the durability and color preservation of the products, are presented.

Keywords: clinker brick, color, clay, pigment, dye, structure, durability.

For citation: Kotlyar V.D., Nebezhko N.I., Terekhina Yu.V., Popov Yu.V., Nebezhko Yu.I., Yashchenko R.A. Features of black clinker brick production.. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 97–102. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-97-102>

В настоящее время промышленность стеновой керамики переживает этап развития, для которого характерно многообразие форм и цветовой палитры изделий [1, 2]. Спросом начинает пользоваться кирпич различных цветов, отличающихся от традиционного цвета обожженной глины, с неоднородностью фактуры, с сочетанием оттенков и тонов на одной поверхности, с декоративными эффектами. Тенденции

затронули и клинкерный кирпич, черный цвет которого постепенно входит в архитектурную моду и основным сдерживающим фактором широкого применения, которого является достаточно высокая стоимость. Кирпич черного цвета используется в сочетании с другим кирпичом различной окраски и материалами (рис. 1) или самостоятельно (рис. 2), из него выполняют как отдельные элементы конструк-



Рис. 1. Фасад здания с фрагментами из черного кирпича и раствора
Fig. 1. Building facade with black brick and mortar fragments

ции, так и полностью фасад. Здания из керамического кирпича темных оттенков привлекают к себе внимание, выделяются из общего облика архитектурной среды, при этом для них повышены требования к подбору обязательных элементов фасада (окна, двери) и кровли, а также к качеству выполнения работ (цвет и толщина растворного шва) для сохранения архитектурной выразительности.

В каталогах производителей клинкерный кирпич темного цвета обозначается как «черный», «темно-коричневый», «графитовый», «металлик», «шоколад» и т. п., используются всевозможные торговые названия. Согласно международной системе соответствия цветов – RAL, выделяются следующие виды черного цвета: черно-коричневый, черно-серый, черно-оливковый, черно-синий, графитно-черные цвета с различными оттенками.

В керамической промышленности существует два способа получения цветного кирпича – поверхностное окрашивание и объемное окрашивание. При первом способе поверхность изделий покрывается ангобами или глазуриями с соответствующим цветом, и желательно, чтобы основная масса изделия была близка по цвету к поверхностным покрытиям, тогда дефекты и разрушения поверхностного слоя визуально не так видны. При втором способе окрашивается вся масса кирпича, что сказывается на себестоимости продукции. Для дорожного клинкерного кирпича должен быть окрашен весь объем изделий, так как в процессе эксплуатации происходит истирание поверхностного слоя и необходимо сохранение цветового решения объекта на весь срок службы.

Несмотря на кажущуюся простоту, в реальности, с учетом технико-экономических факторов, производство кирпича черного цвета, особенно объемного окрашивания, требует специальных знаний и достаточно большого опыта, и как результат – выпуском таких изделий занимается весьма ограниченное число производителей. Ориентиром для дорожного клинкерного кирпича здесь может быть немецкая фирма «Klinkerwerke Muhr», которая производит одни из самых «черных» изделий, отличающихся в том числе высокой стоимостью (рис. 3).

На основании обзора исследований по объемному окрашиванию керамического кирпича и экспери-



Рис. 2. Фасад здания из черного кирпича и раствора
Fig. 2. Building facade of black brick and mortar

ментальных работ в этом направлении нами были обозначены основные принципы и условия для производства клинкерного кирпича черного цвета объемного окрашивания.

Из общей технологии керамики известно, что для окраски керамических масс, глазурей или ангобов в их состав необходимо ввести определенные красящие оксиды в соответствующих пропорциях или керамические пигменты. Для получения насыщенного черного цвета керамических масс темного цвета необходим ввод черных пигментов в количестве 2–4%, однако их стоимость очень высока и снижается экономическая эффективность производства, поэтому этот простой и дорогой способ не в полной мере удовлетворяет поставленной задаче. Одно из перспективных направлений объемного окрашивания керамических масс – получение керамических пигментов в составе керамического камня в процессе обжига изделий. При этом сами пигменты должны быть химически устойчивыми, сохранять свой цвет под действием внешних факторов, быть не токсичными и иметь приемлемую стоимость.

Производители керамических пигментов не раскрывают конкретные составы и компоненты своей продукции, указывая зачастую только оксидный состав и необходимые характеристики, при этом для каждого вида глин происходит подбор дозировки и температуры обжига. Последние обобщенные данные по этой теме были представлены в трудах Мартынова М.А. и Визир В.А. еще в 1950–1960-х гг. и принципиальных изменений за это время в составах черных керамических пигментов, как и других цветов, не произошло, так как составы обрабатывались многие десятилетия, а само искусство окраски керамических изделий уходит корнями в глубокую древность [3, 4]. По химическому составу черные пигменты основываются на сочетании в определенных количествах основных оксидов: железа, хрома, кобальта, марганца и меди. Оксиды кобальта и меди в работе не рассматривались как составляющие компоненты для получения черного кирпича в силу их



Рис. 3. Дорожный клинкерный кирпич фирмы «Klinkerwerke Muhr»
Fig. 3. Klinkerwerke Muhr road clinker brick



высокой стоимости. Оксид хрома может рассматриваться как составляющий компонент, если он вводится в виде хромистого железняка, который является крайним членом изоморфного ряда хромшпинелидов переменного состава: магнезиохромит ($MgCr_2O_4$) – хромит ($FeCr_2O_4$) из класса оксидов. Экономически приемлемым является использование только соединений железа и марганца.

Следующим немаловажным фактором для получения черного кирпича с устойчивой окраской является определение окрашивающих кристаллических соединений, которые достаточно подробно изложены в работах И.В. Пища и Г.Н. Масленниковой [5, 6]. Керамические пигменты или красители, отличающиеся механизмом действия, рассматриваются как ветвь минеральных красителей, и только они со своей устойчивой структурой и стойкостью могут обеспечить долговечность изделий. По строению кристаллической решетки выделяют керамические пигменты шпинельного, гранатового типа, на основе кристаллической решетки минералов циркона, диоксида, виллемита, форстерита, авгита, муллита, кордиерита, цельзиана, сфена и других минералов. На основе изучения большого объема литературных источников, а также результатов собственных экспериментальных работ нами было определено, что предпочтительно для окрашивания в черный цвет керамического материала использовать соединения шпинельного типа. При этом надо учитывать, что на окраску кристаллических тел существенное влияние оказывает структура кристаллической решетки, ее симметрия, типы связей и другие факторы [7].

Шпинели или шпинелиды – это группа минералов с общей формулой $RO \cdot R_2O_3$. В качестве двухвалентного катиона здесь могут выступать оксиды магния, кальция, железа, марганца, стронция, бария, меди, цинка и др. Трехвалентным катионом обычно выступают оксиды алюминия, хрома, железа, марганца. Классический минерал – шпинель, это смешанный оксид магния и алюминия – $MgO \cdot Al_2O_3$, с примесью элементов Ti, Fe, Zn, Mn, Ca, в зависи-

мости от содержания или отсутствия которых цвет минерала может быть бесцветным или красным, голубым, розовым, зеленым, фиолетовым, желтым. Что касается керамического кирпича, то с учетом технико-экономических факторов наиболее предпочтительными окрашивающими соединениями являются: марганцевая шпинель $MnO \cdot Al_2O_3$ (галаксит); железистая шпинель $FeO \cdot Al_2O_3$ (герценит); железомарганцевая шпинель $MnO \cdot Fe_2O_3$. Железистая шпинель $FeO \cdot Fe_2O_3$, также может рассматриваться, хотя это и менее предпочтительно.

Нами теоретически была рассчитана оптимальная структура материала для максимального визуального достижения черного цвета кирпича. Было установлено, что для достижения максимального визуального эффекта и экономии окрашивающих веществ в общей массе материала должны быть сформированы так называемые хромофорные кластеры со средними размерами 20–40 мкм, которые на общем фоне резко повышают поглощение световых лучей, и расстояние между которыми должно быть 150–250 мкм (рис. 4). Усредненный химический состав хромофорных кластеров, представленных ферритом марганца со структурой шпинели, представлен в таблице.

Общим фоном для них является традиционный для керамики темно-коричневый цвет, обусловленный наличием оксидов железа. При этом частички оксида железа в виде гематита также должны иметь размеры около 20–40 мкм и быть равномерно распределены в общей массе (рис. 5).

Для получения насыщенного цвета обязательно наличие стеклофазы, которая является основой для рассредоточенных оксидов железа и шпинели в виде феррита марганца. Если говорить о черном дорожном клинкерном кирпиче, полученном нами, то сам кера-

Усредненный химический состав хромофорных кластеров
Average chemical composition of chromophore clusters

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
6–8	2–3	59–61	25–27	1–2	0,2–0,4	1–2	0,5–1

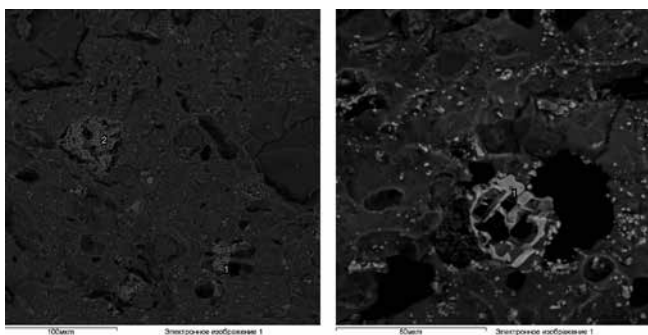


Рис. 4. Хромофорные кластеры феррита марганца черного цвета на общем фоне керамического материала
Fig. 4. Black manganese ferrite chromophore clusters on overall ceramic background

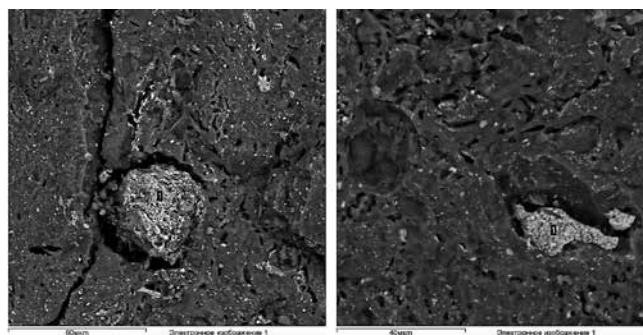


Рис. 5. Зерна гематита в керамическом материале черного цвета
Fig. 5. Hematite grains in black ceramic

мический материал в большей степени представлен стеклофазой. Из минеральных образований характерны муллит, кварц, тридимит, гематит и шпинели, которые в силу их малого количества на рентгенограммах просматриваются не очень четко (2,53; 2,1 Å).

К «усилителю» черной окраски кирпича можно отнести и минерал ильменит — титанистый железняк с общей химической формулой $FeO \cdot TiO_2$, который содержится в повышенных количествах в отдельных видах глин или может вводиться при подготовке керамических масс в виде песка с его повышенным содержанием. Однако здесь также имеет большее значение размер частиц минерала.

В любом случае наличие свободных оксидов марганца в керамическом материале исключается, так как они неустойчивы. В зависимости от условий они меняют свою валентность и вступают в реакции со многими веществами, в том числе и с кладочным раствором, что приводит к изменению цвета лицевой поверхности изделий (рис. 6). В зависимости от вида здания и субъективного мнения потребителя данный эффект воспринимается или как особый шарм кирпичной кладки и декоративный эффект, или же в некоторых случаях как дефект.

Исходя из результатов проведенных исследований, нами выработаны общие принципы для получения клинкерного кирпича черного цвета.



Рис. 6. Металлизированный оттенок на поверхности кирпича темного цвета за счет реакций оксидов марганца после трех лет эксплуатации
Fig. 6. Metallized tint on dark brick surface by manganese oxide reactions after three years of operation

Глина или другое сырье (аргиллиты, алевролиты и т. д.) должны содержать повышенное количество оксидов железа — более 5–6% и повышенное — оксида титана, который представлен в основном ильменитом и является устойчивым минералом с черным цветом. К сожалению, в России не так много традиционного темноцветного спекающегося глинистого сырья. Известны крупные месторождения Ленинградской обл.), на котором проводились экспериментальные исследования, Кучинское месторождение (Московская обл.), а также ряд месторождений Поволжья и Юга России. Поэтому актуально выявление нетрадиционного сырья для получения клинкерного кирпича черного цвета. Проводимые в этом направлении работы показали высокую перспективность использования аргиллитов, аргиллитоподобных глин, попутных продуктов переработки террикоников, а также особых разновидностей опоковидных пород [8–11].

Также для получения клинкерного кирпича черного цвета большое значение имеет формирование особой матричной структуры материала, в которой наблюдается особое сочетание структурных элементов различной окраски. Наиболее подходящим сырьем для формирования такой структуры является камневидное трудноразмокаемое в воде сырье, однако вполне возможно получение матричной структу-



ры и на обычном глинистом сырье. Разработки в этом направлении, показавшие хорошие результаты, проведены группой ученых под руководством А.Ю. Столбоушкина [12–15]. Технологически формирование матричной структуры не представляет особых трудностей и вполне возможно на любом современном заводе.

Следующим важным моментом для получения клинкерного кирпича низкотемпературного спекания черного цвета является ввод минерализаторов и сильных плавней в количестве до 1%, что позволяет снизить температуру обжига и значительно повысить

насыщенность цвета. Минерализаторы также способствуют формированию особой стеклокристаллической микроструктуры, благодаря которой существенно возрастает прочность, особенно ударная, керамического камня.

Исходя из установленных предпосылок и разработанных принципов нами на Юге России выявлены природные и техногенные месторождения сырья, пригодного для получения клинкерного кирпича низкотемпературного спекания темной окраски, что позволит в будущем организовать производство таких изделий с минимальной себестоимостью.

Список литературы

1. Лапунова К.А., Котляр В.Д., Терехина Ю.В. Фигурный керамический кирпич на основе опок: классификация и производство // *Строительные материалы*. 2011. № 12. С. 17–19.
2. Котляр В.Д., Терехина Ю.В., Котляр А.В., Яценко Р.А., Попов Ю.В. Особенности применения дорожного клинкерного кирпича светлого цвета // *Строительные материалы*. 2019. № 4. С. 44–49. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-44-49>
3. Мартынов М.А., Визир В.А. Технология производства керамических красок. Киев: Государственное издательство технической литературы. 1956. 180 с.
4. Визир В.А., Мартынов М.А. Керамические краски. Киев: Техніка, 1964. 255 с.
5. Пищ И.В., Масленникова Г.Н. Керамические пигменты. Минск: Вышэйшая школа, 1987. 132 с.
6. Масленникова Г.Н., Пищ И.В. Керамические пигменты. М.: ООО РИФ «Стройматериалы». 2009. 224 с.
7. Зубехин А.П., Яценко Н.Д., Голованова С.П. Теоретические основы белизны и окрашивания керамики и портландцемента. М.: РИФ «Стройматериалы». 2014. 152 с.
8. Котляр В.Д., Явруян Х.С., Гайшун Е.С., Терехина Ю.В. Комплексный подход при переработке отходов угледобычи Восточного Донбасса // *Управление муниципальными отходами как важный фактор устойчивого развития мегаполиса*. 2018. № 1. С.115–118.
9. Yavruyan K., Gaishun E., Teryokhina Y., Kotlyar V. The research on the sifting from processing of east donbass refuse heap for manufacturing wall ceramics goods. MATEC Web of Conferences. 2018. С. 04055.
10. Kotlyar V.D., Kozlov G.A., Zhivotkov O.I., Lapunova K.A. Paving clinker of low-temperature sintering on the basis of opoka-like rocks. *Materials Science Forum*. 2018. Т. 931 MSF. С. 568–572.
11. Котляр В.Д., Козлов Г.А., Животков О.И., Лапунова К.А. Перспективы использования кремнистых опоковидных пород для производства дорожного клинкерного кирпича низкотемпературного спекания // *Строительные материалы*.

References

1. Lapunova K.A., Kotlyar V.D., Terekhina Yu.V. Shaped ceramic brick based on opes: classification and production. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2011. No. 12, pp. 17–19. (In Russian).
2. Kotlyar V.D., Terekhina Yu.V., Kotlyar A.V., Yashchenko R.A., Popov Yu.V. Features of application of road clinker brick of light color. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 4, pp. 44–49. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-44-49> (In Russian)
3. Martynov M.A., Vizir V.A. Tehnologija proizvodstva keramicheskikh krasok [Ceramic paint production technology]. Kiev: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tehnichekoj literatury. 1956. 180 p.
4. Vizir V.A., Martynov M.A. Keramicheskie kraski [Ceramic-based paints]. Kiev: Tehnika. 1964. 255 p.
5. Pish I.V., Maslennikova G.N. Keramicheskie pigmenty [Ceramic pigments]. Minsk: Vyshejnaja shkola. 1987. 132 p.
6. Maslennikova G.N., Pish I.V. Keramicheskie pigmenty [Ceramic pigments] Moscow: RIF «Strojmaterialy». 2009. 224 p.
7. Zubehin A.P., Yatsenko N.D., Golovanova S.P. Teoreticheskie osnovy belizny i okrashivaniya keramiki i portlandcementsa [Theoretical basis of whiteness and coloring of ceramics and Portland cement]. Moscow: RIF «Strojmaterialy». 2014. 152 p.
8. Kotlyar V.D., Yavruyan H.S., Gaishun E.S., Terekhina Yu.V. Integrated approach in the processing of East Donbass coal waste. *Upravlenie municipal'nymi othodami kak vazhnyj faktor ustojchivogo razvitija megapolisa*. 2018. No. 1, pp. 115–118. (In Russian).
9. Yavruyan K., Gaishun E., Teryokhina Y., Kotlyar V. The research on the sifting from processing of east Donbass refuse heap for manufacturing wall ceramics goods. MATEC Web of Conferences. 2018, pp. 04055.
10. Kotlyar V.D., Kozlov G.A., Zhivotkov O.I., Lapunova K.A. Paving clinker of low-temperature sintering on the basis of opokamorphic rocks. *Materials Science Forum*. 2018. Т. 931 MSF, pp. 568–572.
11. Kotlyar V.D., Kozlov G.A., Zhivotkov O.I., Lapunova K.A. Prospects of the use of siliceous opoka-like rocks for production of paving clinker of low-temperature sintering. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 4,

2018. № 4. С. 13–16. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-758-4-13-16>
12. Stolboushkin A., Akst D., Fomina O., and Ivanov A. Structure and properties of ceramic brick colored by manganese-containing wastes. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 143. Pp 1–8.
 13. Столбоушкин А.Ю., Акст Д.В., Фомина О.А. Использование промышленных отходов при окрашивании керамических матричных композиций на основе природного и техногенного сырья. *Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всероссийской научно-технической конференции*. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2016. С. 154–160.
 14. Столбоушкин А.Ю., Фомина О.А., Акст Д.В., Иванов А.И., Дружинин М.С. Получение декоративной стеновой керамики из глинистого сырья и отходов добычи марганцевых руд // *Строительные материалы*. 2016. № 12. С. 38–45.
 15. Stolboushkin A.Yu., Akst D.V. Investigation of the decorative ceramics of matrix structure from iron-ore waste with vanadium component addition // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931, pp. 520–525.
 - pp. 13–16. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-758-4-13-16> (In Russian).
 12. Stolboushkin A., Akst D., Fomina O., and Ivanov A. Structure and properties of ceramic brick colored by manganese-containing wastes. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 143, pp 1–8.
 13. Stolboushkin A., Akst D., Fomina O., Ivanov A. Use of industrial wastes in painting ceramic matrix composites based on natural and man-made raw materials. *Durability of building materials, products and designs: materials of the All-Russian scientific technical conference*. Saransk: Publishing House of Mordovia University. 2016, pp. 154–160. (In Russian).
 14. Stolboushkin A., Akst D., Fomina O., Ivanov A., Druzhinin M.S. Production of decorative wall ceramics from argillous raw material and wastes of manganese ore mining. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2016. No. 12, pp. 38–45. (In Russian).
 15. Stolboushkin A.Yu., Akst D.V. Investigation of the Decorative Ceramics of Matrix Structure from Iron-Ore Waste with Vanadium Component Addition. *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931, pp 520–525.

КНАУФ — самый привлекательный работодатель России в сегменте строительных материалов и оборудования



Международный холдинг Randstad, один из лидеров мировой кадровой индустрии, уже 20 лет проводит исследование привлекательности брендов работодателей Randstad Employer Brand Research, заслужившее прочный авторитет неангажированностью и объективностью.

По его результатам за 2019 г. Международная группа КНАУФ стала самым привлекательным брендом работодателя на российском рынке в сегменте строительных материалов и оборудования. В России исследование охватило 24 сектора экономики и почти 350 компаний.

Среди множества критериев, по которым респонденты (более 13 тыс. человек) оценивали привлекательность компаний как работодателя, ключевыми были: хорошая оплата труда, финансовая стабильность, интересная работа, карьерный рост и приятная рабочая атмосфера.

Международная группа КНАУФ объединяет почти 35 тыс. сотрудников по всему миру,

около 4 тыс. из них работают в России. Семейные ценности братьев Кнауф, на основе которых они начинали строить свой бизнес, не только были сохранены их преемниками, но и развились в общие ценности всех предприятий группы. Особенно важно, что они транслируются не только сотрудникам, но и людям вне компании, и они их принимают и разделяют. Янис Краулис, управляющий группы КНАУФ Восточная Европа и СНГ, комментируя получение статуса лучшего работодателя, отметил, что одна из глобальных задач КНАУФ – быть лучшим работодателем для лучших сотрудников. И результаты рейтинга показывают, что у компании КНАУФ это получается.

За компанией КНАУФ в рейтинге следуют Rockwool и ТехноНИКОЛЬ.

В России проектом проведения исследования управляет компания ANCOR, при этом всю исследовательскую работу, формирование выборки и сбор данных во всем мире проводит группа Kantar. Первое исследование в России прошло в 2013 г., в 2018 г. присоединилась Украина, в 2020 г. – Казахстан.

В России опрос проходил онлайн в течение января–февраля 2020 г., в нем приняли участие 13574 респондента, которые специально подбирались таким образом, чтобы получилась репрезентативная выборка трудоспособного населения страны. Все участники



отвечали на вопросы единой для всего мира анкеты. По правилам Randstad в него включаются крупнейшие по числу рабочих мест компании из экономически значимых сегментов рынка. Все итоги исследования основаны исключительно на независимом мнении и восприятии людей.

Всего исследование охватывает 33 страны, в числе которых Россия, Казахстан и Украина, и 6126 компаний-работодателей. Онлайн-опрос собрал мнения около 185 тыс. респондентов. В основе рейтинга лежат два вопроса: насколько известна компания и насколько она привлекательна в качестве работодателя.

Редакция поздравляет своего многолетнего партнера — компанию КНАУФ — с заслуженным признанием ее авторитета и привлекательности, как работодателя. Ведь люди — основа любого бизнеса, большого и малого.

ЕКАТЕРИНБУРГ • 2020

BALTI MIX

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ СУХИХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

19-21 августа
2020 года

20
ЛЕТ С ВАМИ
В ОТРАСЛИ

 **BANG & BONSONER**
DELIVERING SMART MATERIAL TECHNOLOGIES



НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СТРОИТЕЛЬНЫХ НАУК

КВИТЕТ

baltimix.ru

Р.И. ШИГАПОВ, инженер (ufagips@mail.ru), Д.А. СИНИЦИН, канд. техн. наук (d4013438@yandex.ru), А.Р. БИКТАШЕВА, инженер (mokko_93@mail.ru), И.В. НЕДОСЕКО, д-р техн. наук (nedoseko1964@mail.ru)

Уфимский государственный нефтяной технический университет (450080, г. Уфа, ул. Менделеева, 195)

Использование облегченного керамзита для утепления чердачных перекрытий

подавляющее большинство зданий жилищно-гражданского назначения малой и средней этажности (до пяти этажей включительно) имеют скатные кровли с холодным вентилируемым чердачным пространством. При всех очевидных преимуществах данного конструктивного решения проблема образования наледей и сосулек на кровле из-за утечек тепла в чердачном пространстве продолжает оставаться очень острой. Очевидно, что наиболее эффективным решением данной проблемы является повышение уровня теплозащиты чердачного перекрытия. Для утепления чердачных перекрытий рекомендуется использовать облегченный керамзитовый гравий насыпной плотностью 200–250 кг/м³, который в отличие от минераловатных плит повышенной жесткости является негорючим, не теряет эксплуатационных свойств в течение продолжительного времени (50 лет и более) и не требует устройства поверх теплоизоляционного слоя защитной стяжки из цементно-песчаного раствора. Утепление чердачного перекрытия в виде засыпки из облегченного керамзитового гравия толщиной 350–400 мм полностью соответствует современным теплотехническим нормативам для средней полосы России и значительно дешевле традиционного варианта утепления с минераловатными плитами ППЖ и цементно-песчаной стяжкой.

Ключевые слова: энергосбережение, чердачное перекрытие, негорючий утеплитель, облегченный керамзитовый гравий, уровень теплозащиты.

Для цитирования: Шигапов Р.И., Синицин Д.А., Бикташева А.Р., Недосеко И.В. Использование облегченного керамзита для утепления чердачных перекрытий // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 104–108.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-104-108>

R.I. SHIGAPOV, Engineer (ufagips@mail.ru), D.A. SINITSIN, Candidate of Sciences (Engineering) (d4013438@yandex.ru); A.R. BIKTASHEVA, Engineer (mokko_93@mail.ru), I.V. NEDOSEKO, Doctor of Sciences (Engineering) (nedoseko1964@mail.ru) Ufa State Petroleum Technical University (195, Mendeleeva Street, Ufa, 450080, Russian Federation)

Use of Lightweight Expanded Clay for Insulation of Attic Floors

The vast majority of domestic buildings for civilian purposes of small and medium floors (up to 5 floors inclusive) have pitched roofs with a cold ventilated attic space. With all the obvious advantages of this design solution, the problem of the formation of ice and icicles on the roof due to heat leaks in the attic space continues to be very acute. Obviously, the most effective solution to this problem is to increase the level of thermal protection of the attic floor. To warm attic floors, it is recommended to use lightweight expanded clay gravel with a bulk density of 200–250 kg / m³, which, unlike mineral wool boards of increased stiffness, is non-combustible, does not lose operational properties for a long time (50 years or more) and does not require a device on top of the insulating layer of a protective screed made of cement-sand mortar. The insulation of the attic floor in the form of a backfill made of lightweight expanded clay gravel 350–400 mm thick fully complies with modern heat-technical standards for central Russia and is much cheaper than the traditional version of insulation with mineral wool slabs and cement-sand screed.

Keywords: attic flooring, non-combustible insulation, lightweight expanded clay gravel, level of thermal protection.

For citation: Shigapov R.I., Sinitsin D.A., Biktasheva A.R., Nedoseko I.V. The use of lightweight expanded clay for insulation of attic floors. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 104–108. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-104-108>

подавляющее большинство отечественных зданий жилищно-гражданского назначения (жилых, учебных, административных, лечебных) малой и средней этажности (до пяти этажей включительно), построенных как еще в советские времена, так и в последние десятилетия, большей частью имеют скатные кровли с холодным вентилируемым чердачным пространством. Следует отметить, что сама техническая необходимость устройства скатных кровель (с организованным или неорганизованным водостоком в зависимости от этажности здания) признаётся практически всеми проектными, подрядными и жилищно-коммунальными организациями, которые участвуют в процессе проектирования и эксплуатации данных объектов.

Однако несмотря на практически повсеместное использование строительными организациями совре-

менных кровельных гидроизоляционных материалов повышенной коррозионной стойкости и водонепроницаемости (профнастила с двойным цинковым и полимерным покрытием, битумной черепицы типа «Шинглас», волнистых битумно-полимерных кровельных листов типа «Ондулин»), а также применение прогрессивных проектных решений и современных конструкционных материалов для устройства стропильных систем (ЛСТК – легкие тонкостенные оцинкованные гнутые профили; обработка деревянных стропил и обрешетки эффективными антисептиками и антипиренами, существенно повышающими их огнестойкость и долговечность), образование наледи, сосулек, конденсата из-за утечек тепла в чердачном пространстве, к сожалению, остается проблемой для жилищно-коммунальных организаций, осуществляющих обслуживание и ремонт этих зданий [1].

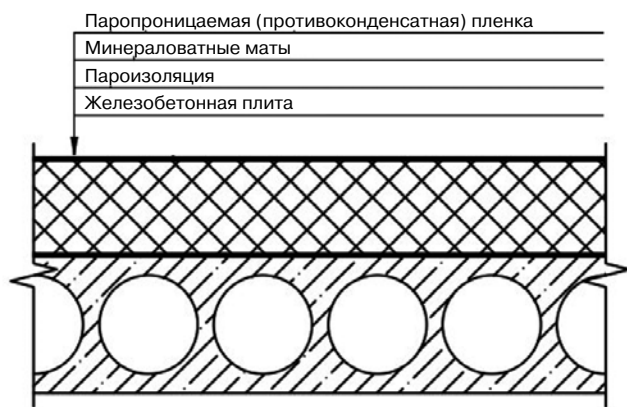


Рис. 1. Конструкция чердачного перекрытия с использованием минераловатных матов
Fig. 1. Attic floor construction using mineral wool mats

Решение названных проблем, и с этим согласны практически все участники проектирования, строительства и эксплуатации данных объектов, неразрывно связано с введением новых отечественных нормативов по повышению теплотехнической эффективности ограждающих конструкций (в том числе и такой значимой, как чердачные перекрытия). Однако их реализация на практике за последние 25 лет выявила и ряд не решенных до настоящего времени проблем [2].

С 1995 г. (начиная со знакового изменения № 3 к советскому СНиП II-3-79 «Строительная теплотехника») более чем двукратное повышение термического сопротивления чердачного перекрытия решалось за счет использования так называемых «эффективных» утеплителей, как правило, матов на минераловатной основе (рис. 1) взамен тяжелых и холодных керамзитовых и шлаковых засыпок (плотностью 500–1200 кг/м³). Утеплители на органической основе, в частности пенополистирол и пенополиуретан, практически не применялись из-за их повышенной горючести.

Однако практика эксплуатации таких конструктивных решений выявила и ряд недостатков. Маты, особенно пониженной плотности, сильно слеживаются и зачастую теряют структурную прочность из-за необратимых процессов термоокислительного старения фенолформальдегидных или карбамидных смол [3, 4, 5]. Это подтверждается также многочисленными результатами обследований строительных объектов в Республике Башкортостан, возведенных в период с 1995 по 2010 г. (рис. 2).

Но главным препятствием для применения данного решения, несмотря на его простоту и дешевизну, явилось серьезное ужесточение противопожарных норм [6], что потребовало начиная с 2005 г. обязательного устройства негорючей растворной стяжки поверх теплоизоляционного слоя [7]. Так как по поверхности мягких матов цементно-песчаную стяжку (а ее минимальная толщина в связи с технологическими особенностями устройства не может быть меньше 50–60 мм) выполнить практически невоз-



Рис. 2. Разрушение структуры и оседание минераловатных матов утепления чердачного перекрытия жилого дома в Уфе после 12 лет эксплуатации

Fig. 2. The destruction of the structure and deposition of mineral mats insulation of attic floor in the apartment building in Ufa, after 12 years of operation

можно, мягкие маты практически повсеместно были заменены минераловатными плитами повышенной жесткости (рис. 3). Данное техническое решение по утеплению чердачных перекрытий, которое применяется в настоящее время, привело к существенному удорожанию сметной стоимости работ: плиты повышенной жесткости (ППЖ), удовлетворяющие противопожарным нормам, стоят в несколько раз дороже матов, до 5–6 тыс. р./м³; устройство цементно-песчаной стяжки в подкровельном чердачном пространстве, когда стропила, обрешетка и кровля смонтированы, также требует значительных затрат (не менее 800–1000 р./м²). Кроме того, и на наш взгляд это более важно, цементно-песчаная стяжка не дает эффективно осуществлять осушение утеплителя (перфорированную стяжку выполнить практически невозможно). Это приводит к существенному ухудшению теплотехнических характеристик и снижению долговечности утеплителя, и, как показала недавняя практика массового использования данных конструктивных решений, применение минераловатных плит повышенной жесткости без возможности вентиляции во время эксплуатации ведет к их увлажнению, промораживанию и практически пол-

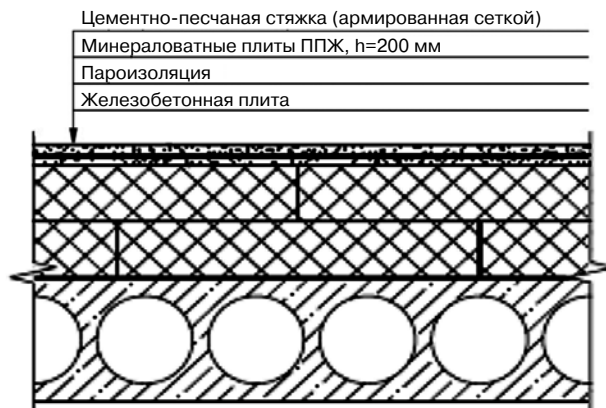


Рис. 3. Конструкция чердачного перекрытия с использованием минераловатных плит повышенной жесткости и защитой их цементно-песчаной стяжкой
Fig. 3. The construction of the attic floor using mineral wool mats of increased rigidity and their protection with a cement-sand fill

Таблица 1
Table 1

Результаты испытания керамзитового гравия производства ООО «Уфимская гипсовая компания»
Ceramic gravel test results produced by Ufa Gypsum Company

Размер фракции гравия, мм	Насыпная плотность, кг/м ³	Марка по насыпной плотности	Прочность при сдавливании, МПа (кг/см ²)	Марка по прочности	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии (справочный согласно СП 50.13330.2012)
10–20	M290	300	0,81 (8,05)	П 35	0,108
20–40	M245	250	0,58 (5,75)	П 25	0,099

ному разрушению менее чем за 10 лет службы [8] и неминуемой последующей весьма дорогостоящей замене утеплителя вместе со стяжкой.

Решение данной проблемы, на наш взгляд, вполне возможно, если рационально, с учетом современных реалий, использовать положительный опыт эксплуатации практически всех гражданских зданий со скатными чердачными кровлями, построенных в предыдущее время (здания, построенные в советский период и здания старой постройки, имеющие важное историко-культурное значение). Чердачные перекрытия таких зданий утеплялись различными органическими и минеральными засыпками. Одним из примеров является историческое здание Московского экзерциргауза с деревянным чердачным перекрытием – крытого плаца для проведения военных смотров, построенного в 1817 г. возле Московского Кремля (ныне Манеж) [9], которое, согласно растиражированной в Интернете информации, после первой реконструкции в 1820-х гг. было засыпано полуметровым слоем табачных листьев, обладавших не только прекрасными теплофизическими характеристиками, но и эффективно защищавшими конструкции покрытия – знаменитые деревянные фермы инженера-механика и архитектора Августина Бетанкура – от гниения и поражения на-

секомыми-вредителями. Из минеральных засыпок наиболее популярны были шлаковые, а с 1960-х гг. им на смену пришли керамзитовые засыпки [10].

Керамзит, который в прошлом зарекомендовал себя как эффективный и долговечный конструкционный и теплоизоляционный материал [11], незаслуженно забытый в начале 1990-х, сегодня переживает второе рождение. Этому способствовала большая организационно-техническая работа по сокращению топливно-энергетических затрат и повышению эффективности производства, проведенная головным организационно-техническим институтом НИИКерамзит и отечественными предприятиями – производителями керамзитового гравия [12–14]. Если еще в недавнем прошлом средняя насыпная плотность выпускаемого керамзитового гравия составляла 400–550 кг/м³, то в настоящее время практически все предприятия-производители имеют возможность получать продукцию с плотностью 350 кг/м³ и менее. Приведенные в табл. 1 данные о средней плотности керамзитового гравия, производимого Уфимской гипсовой компанией (по результатам испытаний в лаборатории Архитектурно-строительного института УГНТУ), показали, что насыпная плотность керамзитового гравия фракций 20–40 мм составляет 240–245 кг/м³, причем стоимость таких крупных фракций самая низкая при массовом производстве. Использование более мелких фракций для засыпок, на наш взгляд, нецелесообразно из-за их большей плотности и стоимости, кроме того, мел-



Рис. 4. Облегченный керамзитовый гравий фракции 20–40 мм (марка по насыпной плотности M250) производства ООО «Уфимская гипсовая компания».
Fig. 4. Lightweight expanded clay gravel fractions of 20–40 mm (grades with a bulk density of M250) manufactured by Ufa Gypsum Company

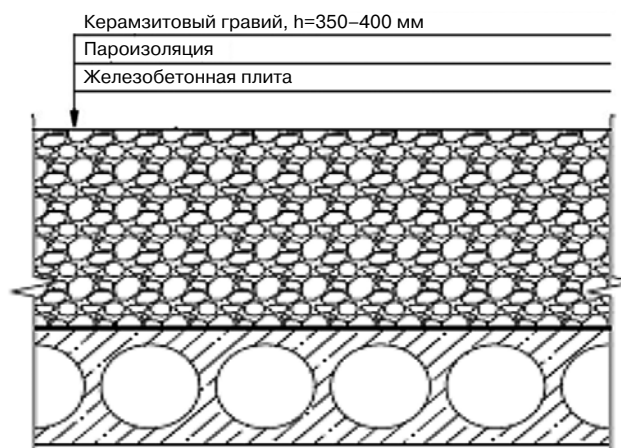


Рис. 5. Конструкция чердачного перекрытия с использованием для утепления облегченного керамзитового гравия крупных фракций
Fig. 5. Attic flooring design using coarse fractions for insulation of light clay gravel

Таблица 2
Table 2Результаты теплотехнического расчета чердачного перекрытия для климатических условий Уфы
Results of heat engineering calculation of attic floor for climatic conditions of Ufa

Материал утепления чердачного перекрытия	Горючесть материала	Коэффициент теплопроводности в условиях эксплуатации «А», Вт/(м·К) (справочный согласно СП 50.13330.2012)	Минимальное нормируемое значение сопротивления теплопередаче чердачного перекрытия для жилого здания $R_0^{норм}$, м ² ·°С/Вт	Требуемая толщина слоя утеплителя	Вес 1 м ² слоя теплоизоляции
ППЖ-160	Г1 (слабогорючий)	0,043	$4,44 \times 0,8 = 3,55$	200	120
Керамзитовый гравий марки М200–250	НГ (негорючий)	0,1–0,11		350–400	100

Примечание. Вес 1 м² теплоизоляции из минераловатных плит приведен с учетом защитной цементно-песчаной стяжки толщиной 50 мм плотностью 1800 кг/м³.

кие фракции успешно используются для других целей: в стяжках под полы, в фильтрах для очистки воды и др.

Важным преимуществом при использовании облегченного керамзита крупных фракций (рис. 4) для утепления чердачных перекрытий является отсутствие необходимости устройства цементно-песчаной стяжки (рис. 5), что не только дополнительно снижает стоимость производимых работ, но и вес чердачного перекрытия.

Определим требуемую толщину утепления чердачного перекрытия облегченным керамзитовым гравием в соответствии с СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» для климатических условий Уфы.

Нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче чердачного перекрытия $R_0^{норм}$ при расчете по поэлементным требованиям определяется по формуле 5.1 СП 50.13330.2012:

$$R_0^{норм} = R_0^{тп} \cdot m_p = 4,44 \cdot 0,8 = 3,55 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}, \quad (1)$$

где $R_0^{тп}$ – базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, м²·°С/Вт, принимаемое в зависимости от градусо-суток отопительного периода (ГСОП) региона строительства; для жилого здания в Уфе ГСОП = 5643°С·сут; m_p – коэффициент, принимаемый равным от 0,8 до 1 в зависимости от удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания.

Приведенное сопротивление теплопередаче $R_0^{тп}$ ограждающей конструкции должно быть не менее нормируемого значения $R_0^{норм}$ и рассчитывается в соответствии с приложением Е к СП 50.13330.2012 с использованием результатов расчетов температурных полей. Сопротивление теплопередаче $R_0^{тп}$ однородной части чердачного перекрытия определим по формуле:

$$R_0^{тп} = 1/\alpha_{в} + \sum R_i + 1/\alpha_{н}, \quad (2)$$

где $\alpha_{в}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, принима-

емый по табл. 4 СП 50.13330.2012; $\alpha_{н}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, принимаемый по табл. 6 СП 50.13330.2012, где R_i – термическое сопротивление отдельного слоя многослойной ограждающей конструкции.

R_i определяется по формуле Е.7 СП 50.13330.2012:

$$R_i = \delta_i / \lambda_i, \quad (3)$$

где δ_i – толщина слоя, мм; λ_i – расчетный коэффициент теплопроводности материала слоя, принимаемый по приложению Г к СП 50.13330.2012, Вт/(м²·°С).

Теплотехнический расчет чердачного перекрытия с утеплением минераловатными плитами повышенной жесткости плотностью 160 кг/м³ ППЖ-160 и керамзитовым гравием марок по плотности 200 и 250 (табл. 2) показывает, что приведенное термическое сопротивление $R_0^{тп}$, м²·°С/Вт, засыпки из облегченного керамзитового гравия толщиной 350–400 мм полностью соответствует современным теплотехническим нормативам для Уфы и не превышает по весу традиционный вариант утепления с плитами ППЖ и цементно-песчаной стяжкой.

Также очень важно отметить, что стоимость утепления чердачного перекрытия облегченным керамзитовым гравием (1,2–1,3 тыс. р./м²) как минимум в два и более раза ниже стоимости утепления чердачного перекрытия минераловатными плитами повышенной жесткости ППЖ-160 (2–2,5 тыс. р./м²).

Следует отметить, что керамзитовые засыпки (толщиной 200–250 мм) оказались наиболее эффективным засыпным утеплителем чердачных перекрытий, что подтверждается более чем полувековой практикой их эксплуатации в различных климатических зонах Советского Союза.

Таким образом, использование облегченного керамзита можно рекомендовать к более широкому практическому использованию, что не только позволит снизить стоимость устройства чердачных кровель, но и повысит их эксплуатационную надежность.

Список литературы

1. Дружинин П.В., Юрчик Е.Ю. Механизм образования наледей и сосулек на крышах домов // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2012. № 1 (19). С. 66–71.
2. Анисимов М. В. Тепловая защита чердачного перекрытия многоквартирного жилого здания с нетиповой кровлей при проведении капитального ремонта // *Известия Томского политехнического университета: Техника и технологии в энергетике*. 2014. Т. 324. № 4. С.15–21.
3. Дроздук Т.А., Айзенштадт А.М., Тутыгин А.С., Фролова М.А. Неорганическое связующее для минераловатной теплоизоляции // *Строительные материалы*. 2015. № 5. С. 86–88.
4. Румянцев Б.М., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю. и др. Технологические аспекты эксплуатационной стойкости минеральных волокон // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 1. С. 32–36.
5. Перфилов В.А., Пилипенко А.С., Пятаев Е.Р. Эксплуатационная стойкость минераловолокнистых изделий // *Вестник МГСУ*. 2016. № 3. С. 79–85.
6. Мельников В.С., Кириллов С.В., Мельников М.В. Минеральная вата – теплоизоляция фасадных и кровельных систем в условиях пожара, пролива и тления // *Интернет-журнал Науковедение*. 2016. Т. 8. № 6. <https://naukovedenie.ru/PDF/63TVN616.pdf>
7. Белых А.Ф., Фахрисламов Р.З. Проблемы снижения теплопотерь и обеспечение пожарной безопасности конструкций тепловой изоляции // *Пожаровзрывобезопасность*. 2010. № 7. С. 22–28.
8. Ершов М.Н., Бабий И.Н., Менайлюк И.А. Анализ технологических особенностей применения фасадных систем теплоизоляции // *Технология и организация строительного производства*. 2015. № 4–1. С. 43–47.
9. Егорова О.В., Тимофеев Г.А. Манеж инженера Бетанкура // *Вестник МГСУ*. 2012. № 4. С. 6–16.
10. Недосеко И.В., Бабков В.В., Алиев Р.Р. и др. Применение конструктивно-теплоизоляционного керамзитобетона при строительстве и реконструкции зданий жилищно-гражданского назначения // *Известия КГАСУ*. 2010. № 1. С. 325–330.
11. Семенов А.А. Состояние российского рынка керамзита // *Строительные материалы*. 2010. № 8. С. 4–5.
12. Садыков Р.К., Сабитов А.А., Кабилов Р.Р. Перспективы использования минерально-сырьевой базы керамзитового сырья в Республике Татарстан // *Строительные материалы*. 2014. № 5. С. 4–7.
13. Петров В.П. Вопросы энергетики, экологии и экономики производства пористых заполнителей // *Строительные материалы*. 2010. № 8. С. 11–13.
14. Леонович С.Н., Свиридов Д.В., Беланович А.Л. и др. Пористый керамический материал на основе глины и отходов производства гранитного щебня // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 45–50.

References

1. Druzhinin P.V., Yurchik E.Yu. Mechanism of formation of floats and icicles on roofs of houses. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. 2012. No. 1 (19), pp. 66–71. (In Russian).
2. Anisimov M.V. Thermal protection of attic floor of apartment building with atypical roof during major repairs. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta: Tekhnika i tekhnologii v energetike*. 2014. T. 324. No. 4, pp. 15–21. (In Russian).
3. Drozdzyuk T.A., Aizenshtadt A.M., Tutygin A.S., Frolova M.A. Inorganic binding agents for mineral wool heat insulation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 5, pp. 86–88. (In Russian).
4. Rumyantsev B.M., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu. and other. Technological aspects of the operational stability of mineral fibers. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2015. No. 1, pp. 32–36. (In Russian).
5. Perfilov V.A., Pilipenko A.S., Pyataev E.R. The operational resistance of mineral fiber product. *Vestnik MGSU*. 2016. No. 3, pp. 79–85. (In Russian).
6. Melnikov V.S., Kirillov S.V., Melnikov M.V. Mineral wool – thermal insulation of facade and roofing systems in a strait and smoldering fire. *Internet-journal Naukovedenie*. 2016. Vol. 8. No. 6. <https://naukovedenie.ru/PDF/63TVN616.pdf>
7. Belykh A.F., Fakhrislamov R. 3. Problems of reducing heat loss and ensuring fire safety of thermal insulation structures. *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2010. No. 7, pp. 22–28. (In Russian).
8. Ershov M.N., Babiy I.N., Meneilyuk I.A. Analysis of technological features of the use of facade insulation systems. *Tekhnologiya i organizatsiya stroitel'nogo proizvodstva*. 2015. No. 4–1, pp. 43–47. (In Russian).
9. Egorova O.V., Timofeev G.A. Manage of Engineer Betancourt. *Vestnik MGSU*. 2012. No. 4, pp. 6–16. (In Russian).
10. Nedoseko I.V., Babkov V.V., Aliiev R.R. and others. Application of structural-heat-insulating ceramic concrete in construction and reconstruction of housing and civil buildings. *Izvestiya KGASU*. 2010. No. 1, pp. 325–330. (In Russian).
11. Semenov A.A. State of the Russian market of haydite. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 8, pp. 4–5. (In Russian).
12. Sadykov R.K., Sabitov A.A., Kabirov R.R. Prospects of using the mineral-raw material base of haydite raw materials in the Republic of Tatarstan. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 5, pp. 4–7. (In Russian).
13. Petrov V.P. Issues of energy, ecology and economy of porous fillers production. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 8, pp. 11–13. (In Russian).
14. Leonovich S.N., Sviridov D.V., Belanovich A.L., Karpushenkova L.S., Karpushenkov S.A. Porous ceramic material based on clay and waste of production of granite rubble. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 45–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-45-50>

24-25 ИЮНЯ / 2020

III МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА ТЕРРИТОРИЙ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ»

Место проведения:
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
ул. Малая Морская, 14
Petro Palace Hotel

Организатор конференции



INTERNATIONAL
ASSOCIATION OF
FOUNDATION
CONTRACTORS

МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

Генеральный спонсор



ГЕОИЗОЛ
группа компаний



Спонсор конференции



Генеральные информационные партнеры



www.fc-union.com, info@fc-union.com

тел.: +7 (495) 66-55-014, моб.: +7 916 36-857-36

ИнтерСтройЭкспо

Международная выставка
строительных и отделочных
материалов

2-4 сентября
2020

Санкт-Петербург
КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»

Одновременно состоится
международные выставки:



Организатор — компания MVK
Офис в Санкт-Петербурге

+7 (812) 380 60 14
interstroyexpo@mvk.ru

Получите бесплатный
электронный билет на сайте
interstroyexpo.com,
используя
промокод **ise-cm**

12+