

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

ISSN 0585-430X (Print)

ISSN 2658-6991 (Online)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ[®] №3



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU МАРТ 2021 г. (789)





KNAUF

РЕКЛАМА

НЕМЕЦКИЙ СТАНДАРТ. ЕДИНОЕ КАЧЕСТВО ДЛЯ ВСЕХ СТРАН

Высокие корпоративные принципы и традиции производства материалов КНАУФ — это залог качества в строительстве и ремонте!



www.knauf.ru

ООО «КНАУФ ГИПС»

Учредитель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»,
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,
д. 9, корп. 1, кв. 1
Издатель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,
д. 9, корп. 1, кв. 1
Свид. о регистрации ПИ № 77-1989
ISSN 0585-430X (Print) ISSN 2658-6991 (Online)
Входит в Перечень ВАК, РИНЦ,
Russian Science Citation Index
на платформе Web of Science
Адрес редакции: Россия, 127434, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 9, стр. 3

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№ 3

ОСНОВАН В 1955 Г.

(789) Март 2021 г.

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

Отрасль в современных условиях

А.А. СЕМЁНОВ

Российский рынок цемента: итоги 2020 г. и краткосрочные перспективы 4

КНАУФ: итоги 2020 г. и планы на 2021 г. (Информация) 7

Материалы и технологии

В.С. ЛЕСОВИК, Р.С. ФЕДЮК

Композиты нового поколения для специальных сооружений 9

В.Н. ЯРМАКОВСКИЙ

Мосты между наукой и практикой строительства 18

К юбилею кафедры «Производство строительных изделий и конструкций»

Тверского государственного технического университета (Информация) 36

Х.Т. ЛЕ, В.А. ГЛАДКИХ, Е.В. КОРОЛЕВ, А.Н. ГРИШИНА

Водостойкость сероасфальтобетона. Результаты исследования и особенности определения 39

А.П. КОНСТАНТИНОВ, И.С. АКСЁНОВ

Анализ существующих подходов к назначению и определению воздухопроницаемости окон 45

Т.Ю. УМАРОВ, С.З. РАЗЗОКОВ

Регенерация хризотил-асбеста из техногенных отходов хризотилцементной промышленности 52

Пожарная безопасность строительных материалов

С.В. ФЕДОСОВ, В.И. ГОЛОВАНОВ, А.А. ЛАЗАРЕВ, М.В. ТОРОПОВА, В.Г. МАЛИЧЕНКО

О проблеме совершенствования строительных изделий, обеспечивающих
пожарную безопасность малоэтажных зданий 57

ВЭЙ ТЯНЬ, ШОУЧАО ЦЗЯН, САИД ШЕБЛ

Проектирование и практика огнестойкого абстрактного композита 64

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за достоверность приведенных сведений, точность данных по цитируемой литературе и за использование в статьях данных, не подлежащих открытой публикации. Редакция может опубликовать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точку зрения автора. Перепечатка и воспроизведение статей, рекламных и иллюстративных материалов возможны лишь с письменного разрешения главного редактора. Редакция не несет ответственности за содержание рекламы и объявлений.

Founder of the journal: «STROYMATERIALY»
Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,
 Moscow, 125319, Russian Federation
Publisher: «STROYMATERIALY»
 Advertising-Publishing Firm, OOO
Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,
 Moscow, 125319, Russian Federation
 Registration certificate PI № 77–1989
ISSN 0585-430X (Print) ISSN 2658-6991 (Online)
 Included in the list of journals of the Higher
 Attestation Commission (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®

№ 3

Founded in 1955 (789) March 2021

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

Industry under present conditions

A.A. SEMENOV

Russian Cement Market: Results of 2020 and Short-Term Prospects 4

KNAUF: results of 2020 and plans for 2021 (Information)..... 7

Materials and technologies

V.S. LESOVIK, R.S. FEDIUK

New Generation Composites for Special Facilities..... 9

V.N. YARMAKOVSKY

Bridges between Science and Practice of Building 18

To the Anniversary of the Department "Production of Construction Materials and Structures"

Tver State Technical University (Information)..... 36

H.T. LE, V.A. GLADKIKH, E.V. KOROLEV, A.N. GRISHINA

Moisture Resistance of Sulfur-Extended Asphalt Concrete. Results of the Study and Features of Definition..... 39

A.P. KONSTANTINOV, I.S. AKSENOV

Analysis of Existing Approaches to Specifying and Determining of Window Air Permeability..... 45

T.Yu. UMAROV, S.Z. RAZZOKOV

Chrysotile-Asbestos Regeneration from Technogenic Waste of the Chrysotile-Cement Industry 52

Fire safety of construction materials

S.V. FEDOSOV, V.I. GOLOVANOV, A.A. LAZAREV, M.V. TOROPOVA, V.G. MALICHENKO

On the Problem of Improving Construction Products that Ensure Fire Safety of Low-Rise Buildings..... 57

WEI TIAN, SHOUCHAO JIANG, SAYED SHEBL

Abstract Composite Fire-Resistance Design and Practice 64

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)

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 (Санкт-Петербург)

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)

BURYANOV A.,

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

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 (St. Petersburg)

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» <http://www.gs-expert.ru/>

Российский рынок цемента: итоги 2020 г. и краткосрочные перспективы

Приведены сведения о состоянии и основных тенденциях развития рынка цемента в России в 2020 г. По итогам прошедшего года в России было произведено 55,99 млн т цемента (97,1% к уровню аналогичного периода предыдущего года). Пик падения пришелся на апрель, когда производство цемента упало на 17,6%, однако в дальнейшем объемы производства начали постепенно восстанавливаться. Основной объем произведенного в 2020 г. цемента пришелся на долю портландцементов без минеральных добавок, объем выпуска этой продукции составил 34,51 млн т (61,6% общероссийского выпуска цемента). По оценкам ГС-Эксперт, в случае благоприятного развития эпидемиологической ситуации в стране и отсутствия новых ограничений, возобновления роста отечественной экономики и сохранения стабильного курса рубля в 2021 г. темпы роста производства и потребления цемента в стране составят около 3–5% по сравнению с 2020 г. с последующим замедлением до 2–3% в 2022–2023 гг.

Ключевые слова: цемент, анализ рынка, экономика России.

Для цитирования: Семёнов А.А. Российский рынок цемента: итоги 2020 г. и краткосрочные перспективы // *Строительные материалы*. 2021. № 3. С. 4–6. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-4-6>

A.A. SEMENOV, Candidate of Science (Engineering), General Director (info@gs-expert.ru)
LLC "GS-Expert" <http://www.gs-expert.ru/>

Russian Cement Market: Results of 2020 and Short-Term Prospects

Information on the state and main trends of the cement market development in Russia in 2020 is provided. According to the results of 2020, 55.99 million tons of cement were produced in Russia (97.1% compared to the same period of the previous year). The fall peaked in April, when cement production fell by 17.6%, but later production volumes began to gradually recover. The main volume of cement produced in 2020 fell on the share of Portland cements without mineral additives, the volume of production of this product amounted to 34.51 million tons (61.6% of the total Russian cement output). According to the GS-Expert, in case of favorable development of the epidemiological situation in the country and the absence of new restrictions, the resumption of growth of the domestic economy and the preservation of a stable ruble exchange rate in 2021, the growth rate of cement production and consumption in the country will be about 3–5% compared to 2020, followed by a slowdown to 2–3% in 2022–2023.

Keywords: cement, market analysis, Russian economy.

For citation: Semenov A.A. Russian cement market: results of 2020 and short-term prospects. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 3, pp. 4–6. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-4-6>

Пандемия COVID-19 в 2020 г. оказала крайне негативное влияние как на российскую экономику в целом, так и на строительный комплекс и промышленность строительных материалов. По итогам года ВВП упал на 2,9%; инвестиции в основной капитал сократились на 4,1% (данные за 9 месяцев 2020 г.); реальные располагаемые доходы населения сократились на 3,5%. Наблюдается существенное сокращение объемов строительства жилых и нежилых зданий. Так, ввод нежилых зданий в 2020 г. сократился на 5,6% по сравнению с предыдущим годом — до 30,8 млн м². В сегменте жилищного строительства, по данным Росстата, объем ввода жилых домов составил всего 75,5 млн м² (-5,9% к уровню 2019 г.); с учетом ввода индивидуальных жилых домов, построенных на участках для садоводства, ввод жилья составил около 80,6 млн м² (-1,8% к 2019 г.). При этом стоит отметить, что ввод многоквартирных жилых домов начиная со II квартала 2020 г. стабильно сокращался, а значительный прирост ввода индивидуальных жилых домов в III–IV кварталах был обусловлен массовой постановкой на кадастровый учет ранее построенных жилых домов, завершенных в I полугодии и не учтен-

ных из-за ограничительных мер, связанных с пандемией COVID-19 (см. таблицу).

Принятые Правительством РФ меры поддержки российской экономики, снижение ключевой ставки ЦБ РФ, а также принятие программы льготной ипотеки под 6,5% оказали существенную поддержку отечественным застройщикам. Однако, несмотря на прогнозируемое Правительством РФ восстановление российской экономики в 2022 г., строительный комплекс, судя по всему, по-прежнему ждут достаточно непростые времена. В соответствии с проектом постановления Правительства РФ «О внесении изменений в государственную программу «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» увеличение объемов жилищного строительства до 120 млн м² в год переносится с 2024 на 2029 г., а в ближайшие два года ежегодные темпы прироста ввода жилых домов не превысят 1–2 млн м² в год, что соответствует среднегодовым темпам роста менее 2,5%. Последующий двухлетний период роста ввода жилья с темпами до 6% в год в 2025–2026 гг. вновь сменится фактически стагнацией (рис. 1).

Объемы и динамика ввода жилых домов в России в 2020 г.
Volumes and dynamics of residential buildings commissioning in Russia in 2020

	I кв.	II кв.	III кв.	IV кв.	Период с начала года
Объем ввода жилых домов (без учета строительства на участках для садоводства), млн м ²	14,7	12	18,6	30,2	75,5
% к предыдущему году	98,7	78,8	100,9	95,2	94,1
Объем ввода жилых домов (с учетом строительства на участках для садоводства), млн м ²	15,4	12,6	19,8	32,8	80,6
% к предыдущему году			105,7	99	98,2
Индивидуальные жилые дома (без учета строительства на участках для садоводства), млн м ²	7,3	5,7	9,6		
% к предыдущему году	91,9	72,7	99,7		
Индивидуальные жилые дома (с учетом строительства на участках для садоводства), млн м ²	8	6,3	10,8	13,6	38,7
% к предыдущему году			112,3	104,4	100,5
Многokвартирные жилые дома, млн м ²	7,4	6,3	9	19,2	41,9
% к предыдущему году	106,5	85,4	98,7	95,4	96,2

Источник: Росстат, оценка ГС-Эксперт

По итогам 2020 г., по данным Росстата, в России было произведено 55,99 млн т цемента (97,1% к уровню аналогичного периода предыдущего года). Пик падения пришелся на апрель, когда производство цемента упало на 17,6% по сравнению с апрелем 2019 г. В дальнейшем объемы производства начали постепенно восстанавливаться, и в IV квартале объем производства на 2,5% превысил уровень аналогичного периода 2019 г. (рис. 2).

Снижение объемов производства цемента в 2020 г. наблюдалось во всех федеральных округах за исключением Северо-Западного, Приволжского и Уральского. Также следует отметить неравномерное изменение объемов выпуска цемента по регионам. Рост объемов производства в 2020 г. отмечен всего в 14 из 35 регионов, в которых расположены действующие цементные заводы (или помольные терминалы). Наибольшие темпы роста производства по итогам 2020 г. были характерны для Ульяновской области (рост на 24% по сравнению с уровнем аналогичного периода предыдущего года), Саратовской области (рост на 9,6%), Республики Крым (рост на 7,6%). Наибольшее падение объемов выпуска цемента в 2020 г. отмечено в Алтайском крае (объем производства снизился на 77,9% по сравнению с уровнем 2019 г.), Магаданской области (-37,3%), Липецкой области (-27,2%), Еврейской АО (-26,4%) и Республике Дагестан (-23,1%). Выпуск цемента в Архангельской, Самарской, Тюменской, Сахалинской и Амурской областях, а также в Республике Коми в 2020 г. не осуществлялся. В III квартале возобновилось производство цемента в Алтайском крае.

По итогам 2020 г. основной объем произведенного в стране цемента пришелся на долю портландцементов без минеральных добавок. По данным Росстата, объем выпуска этой продукции составил

34,51 млн т (61,6% общероссийского выпуска цемента). Второе место по объемам производства занимают портландцементы с добавками. Объем выпуска этой продукции составил 18,91 млн т (33,8% от общего объема производства цемента в стране).

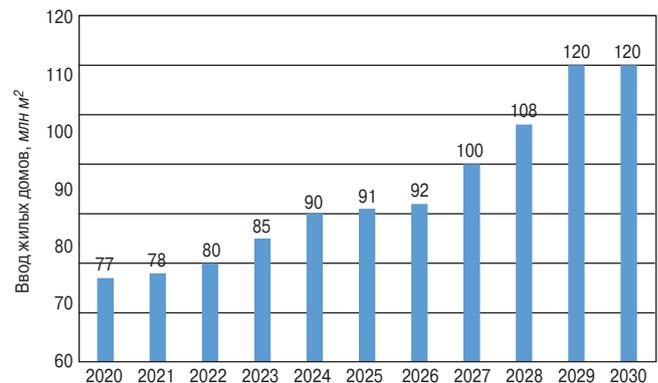


Рис. 1. Прогноз объемов жилищного строительства на 2021–2030 гг. Источник: <https://regulation.gov.ru>

Fig. 1. Forecast of the volume of housing construction in 2021–2030. Source: <https://regulation.gov.ru>

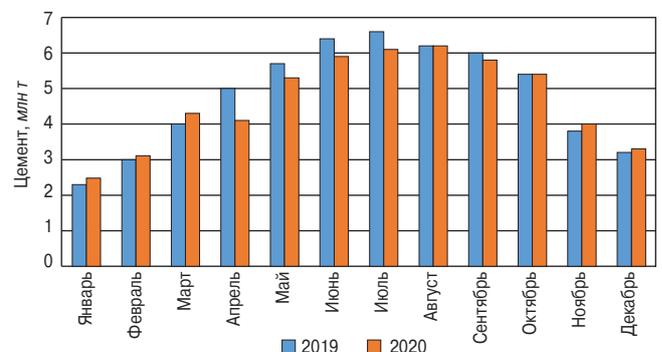


Рис. 2. Динамика производства цемента в РФ в 2019–2020 гг. Источник: Росстат

Fig. 2. Dynamics of cement production in the Russian Federation in 2019–2020. Source: Rosstat

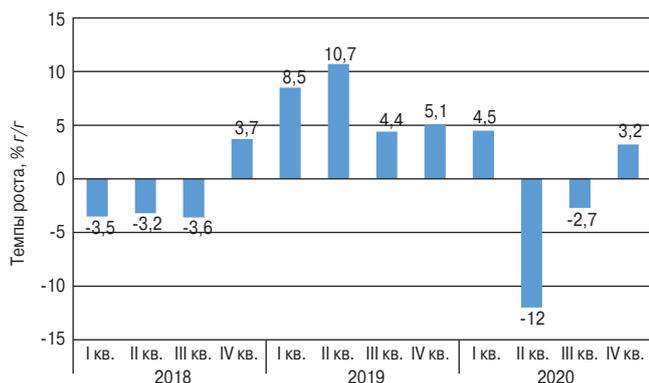


Рис. 3. Поквартальные темпы роста потребления цемента в РФ в 2018–2020 гг. Источник: оценка ГС-Эксперт

Fig. 3. Quarterly growth rates of cement consumption in the Russian Federation in 2018–2020. Source: GS-Expert

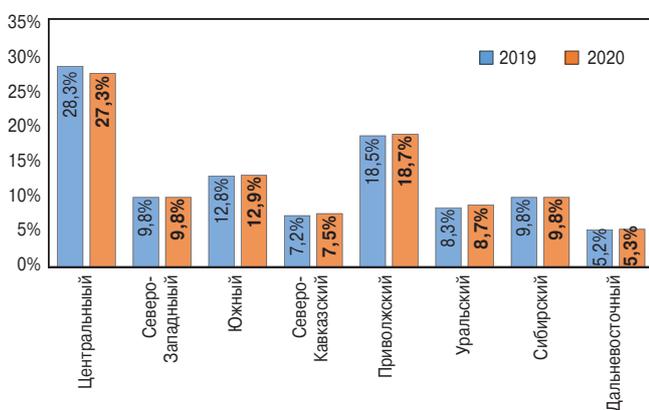


Рис. 4. Структура потребления цемента в разрезе федеральных округов в 2019 и 2020 гг., %. Источник: оценка ГС-Эксперт

Fig. 4. Structure of cement consumption by federal districts in 2019 and 2020, %. Source: GS-Expert

В 2020 г. наблюдалось снижение объемов производства всех видов цемента, за исключением белых портландцементов. Наибольшее падение отмечено в сегментах прочих цементов и тампонажных цементов.

По итогам 2020 г. объем импорта цемента в Россию вырос на 18% по сравнению с аналогичным периодом предыдущего года и составил около 1,6 млн т. Поставки цемента в Россию осуществлялись не менее чем из шести стран мира. Основной объем поставок (около 58%) традиционно пришелся на долю Республики Беларусь.

В 2020 г. российские компании экспортировали около 1,3 млн т цемента, что на 14% больше, чем годом ранее. Экспортные поставки российского цемента осуществлялись в 22 страны мира, однако основными рынками сбыта российской продукции являлись страны бывшего СССР, в первую очередь Казахстан и Беларусь, на долю которых суммарно пришлось около 82% российского экспорта. Лидером по объемам экспорта по итогам 2020 г. стало АО «Мальцовский портландцемент». Второе место по объемам экспорта цемента заняло ООО «ЮУГПК», третье – ООО «Топкинский це-

мент». На долю этих компаний суммарно пришлось порядка 59%.

Потребление цемента в России по итогам 2020 г. составило около 56,3 млн т, что на 2,9% меньше, чем годом ранее. При этом в IV квартале объем потребления цемента в стране вырос на 3,2% по сравнению с IV кварталом 2019 г. и составил около 12,9 млн т (рис. 3).

Потребление цемента в различных регионах России довольно неравномерно (рис. 4). Так, по итогам 2020 г. около 27,3% от общего объема потребленного в России цемента пришлось на долю Центрального федерального округа (-1 процентный пункт по сравнению с 2019 г.). На втором месте по объемам потребления находится Приволжский федеральный округ – около 18,7% общероссийского потребления (+0,2 пп). Минимальные объемы потребления характерны для Дальневосточного федерального округа.

Основным рынком сбыта цемента в 2020 г. был Московский регион (Москва и Московская обл.), где было реализовано, по оценкам ГС-Эксперт, около 8,4 млн т цемента, или около 15% от общероссийского потребления этой продукции. На втором месте по объемам потребления цемента в 2020 г. находится Краснодарский край – около 3,6 млн т (6,5% общероссийского потребления). Третье место занимают Санкт-Петербург и Ленинградская обл., на долю этих регионов суммарно пришлось около 6,2% общероссийского потребления продукции (порядка 3,5 млн т).

После нескольких лет устойчивого роста цен на цемент в 2020 г. наблюдалась их стагнация. По итогам года средняя цена производителей на цемент (без учета НДС, стоимости доставки, сбытовых и посреднических расходов) выросла всего на 0,7% по сравнению с уровнем 2019 г. и составила 3,7 тыс. р./т. При этом в 2018 г. средняя цена производителей выросла на 5,7%, а в 2019 г. – на 4,5%.

Средняя цена приобретения цемента строительными и подрядными организациями (с учетом НДС, доставки, сбытовых и посреднических расходов), по данным Росстата, по итогам 2020 г. составила 4,964 тыс. р./т, что на 1,4% больше, чем годом ранее.

По оценкам ГС-Эксперт, в случае благоприятного развития эпидемиологической ситуации в стране и отсутствия новых ограничений, возобновления роста отечественной экономики и сохранения стабильного курса рубля в 2021 г. темпы роста производства и потребления цемента в стране составят около 3–5% по сравнению с 2020 г. с последующим замедлением до 2–3% в 2022–2023 гг. Дополнительную поддержку цементной промышленности могла бы оказать реализация программы строительства цементобетонных дорог, но, к сожалению, в ближайшие годы данный сегмент рынка по-прежнему не будет оказывать существенного влияния на уровень потребления цемента в целом по стране.

КНАУФ: итоги 2020 г. и планы на 2021 г.

Пандемия 2020 г. и вызванные ею карантинные мероприятия заметно повлияли на жизнь в мире и бизнес в России. При этом начало 2021 г. внушает надежду, что деловая жизнь войдет в привычное русло. Это подтверждается тем, что 23 марта 2021 г. состоялась традиционная встреча управляющего группы КНАУФ Восточная Европа и СНГ Яниса Краулиса с журналистами.



В начале встречи Янис Краулис рассказал о компании КНАУФ в 2020 г. Как и практически все представители бизнеса, руководство КНАУФ активно перестроило работу компании: офисный персонал был переведен на удаленную работу; перешли, насколько это было возможно, в цифровой формат. Поставки оформлялись в электронном виде, все заводы и сбытовые организации работали с применением информационных технологий в максимально возможном объеме. Ни один завод на территории Российской Федерации не прекращал свою работу. Все предприятия работали и поставляли продукцию на рынок. Особенно трудным для компании оказался период, когда закрылись строительные площадки и магазины по продаже строительных материалов. Финансовые потери, понесенные в это время, не удалось компенсировать за оставшиеся месяцы прошлого года: по его итогам компания оказалась ниже плановых показателей на 2–3% в денежном выражении и на 5–7% в объеме по основным группам материалов.

Важно отметить, что материалы компании КНАУФ были очень востребованы и активно использовались в строительстве медицинских центров для приема больных с коронавирусной инфекцией.

Незадолго до введения карантинных мер в Санкт-Петербурге (на предприятии КНАУФ ГИПС Колпино) был запущен завод по изготовлению цементных смесей. Рекордных результатов удалось достичь в Украине: первый раз в истории всех предприятий КНАУФ в мире за один месяц на производстве в Соледаре произвели и продали 52 тыс. т. сухих смесей. В Узбекистане продолжили реализацию большого инвестиционного проекта по строительству второго в стране завода по производству гипсокартонных листов (Фергана). В России на заводе в Краснодарском крае начала работать новая установка по выпуску грунтовок.

По оценке Яниса Краулиса, 2020 г. был очень благоприятный в отношении цен на сырье. Практически везде цены были низкими. Это касалось и металла, и химических компонентов, электроэнергии, газа, а также логистических затрат. Однако в 2021 г. цены на металл, который используется в производстве, выросли больше чем на 30% и продолжают расти. Это связано в первую очередь с нехваткой производственных мощностей у производителей в стальной промышленности; часть линий закрыты на ремонт или модернизацию. В себестоимости профиля КНАУФ очень большую долю составляет стоимость металла, поэтому в компании также вынуждены поднимать цену.

Кроме того, большую проблему для производителей гипсокартона составляет изменение цены на макулатуру (она выросла почти на 60%), что, с одной стороны, логично следует из ситуации в народном хозяйстве, где снизилось использование бумаги, в том числе особенно резко из-за пандемии, а с другой – сочетается с очень большим спросом на макулатуру: ее элементарно не хватает, и сейчас КНАУФ импортирует макулатуру частично из-за рубежа, например из Прибалтики.

Пандемия ускорила процесс цифровизации в том числе в КНАУФ. В международной группе КНАУФ за очень короткий срок внедрили Microsoft Teams. Это решение дало возможность проводить онлайн презентации, общаться, взаимодействовать удаленно. В прошлом году также развернули внутреннюю социальную сеть на основе Microsoft Yammer. Теперь у сотрудников в разных частях света есть возможность обмениваться лучшим опытом, высказывать свое мнение, делиться идеями.

Применительно к строительному сектору будущее строительства – это BIM-технологии. Информационное моделирование помогает лучше прогнозировать процессы, принимать правильные решения, что в свою очередь приводит к увеличению эффективности и снижению затрат. Специалисты компании КНАУФ активно работали, работают сейчас и продолжат работать над развитием этого направления, потому что без этого невозможно эффективно строить в будущем.

За два года с момента запуска завода модульных систем КНАУФ в России уже было реализовано более 20 проектов. Среди них есть индивидуальные частные дома, коттеджные поселки, общественные здания, медицинские модули. Сейчас осуществляется интересный проект с Евразом в области строительства многоквартирных домов, для которых компания изготавливает сантехнические модули. Общий объем производства на опытном заводе в Красногорске превысил 30 тыс. м². Дополнительно были запущены две небольшие линии: в Новомосковске и в Узбекистане. Проект модульных систем успешно развивается, у него хорошие перспективы. Увеличение доли заводской готовности зданий – это общемировая тенденция.

В компании КНАУФ продолжается работа над расширением ассортимента. На российский рынок была выведена монтажная пена, интерьерная краска, ведутся работы по расширению номенклатуры цементных смесей. Первыми появятся новый ремонтный состав и штукатурка и шпаклевка. Также активно прорабатываются проекты, связанные со строительной акустикой, улучшением акустического комфорта зданий. Акцент в этот раз сделан на многоквартирные жилые дома: системы КНАУФ дают улучшение защиты от шума и дополнительный комфорт как между соседними квартирами, так и внутри квартир.

Объем поддержки проектов в области культуры, искусства и других социальных сфер был несколько сокращен в 2020 г. из-за пандемии. Трудно поддерживать мероприятия, которые отменяются и переносятся, к тому же не все идеи возможно полноценно воплотить онлайн. Тем не менее компания КНАУФ выступила одним из ключевых партнеров «Года Германии в России», большого проекта, организованного совместно Посольством ФРГ, Гете-Институтом и Российско-германской внешнеторговой палатой. Было принято решение в рамках данного проекта поддерживать в первую очередь культурные проекты в регионах.



Организатор конференции



INTERNATIONAL
ASSOCIATION OF
FOUNDATION
CONTRACTORS

МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

Официальная поддержка

bauma CTT RUSSIA

26-27
МАЯ 2021

VII МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ

«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ УСТРОЙСТВА ОСНОВАНИЙ
И ФУНДАМЕНТОВ»

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ:
МОСКВА, МВЦ «КРОКУС ЭКСПО»,
В РАМКАХ ВЫСТАВКИ СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
И ТЕХНОЛОГИЙ «BAUMA CTT RUSSIA»

Генеральный спонсор конференции



Спонсоры конференции



Генеральные информационные партнеры



www.fc-union.com, info@fc-union.com
тел. +7 (495) 66-55-014, моб. +7 925 57-57-810

К 75-летию

Валерия Станиславовича ЛЕСОВИКА



9 марта 2021 г. исполнилось 75 лет Валерию Станиславовичу Лесовику, доктору технических наук, профессору, члену-корреспонденту РААСН, заслуженному деятелю науки РФ, заслуженному работнику высшей школы РФ, вице-президенту «Ассоциации ученых в области строительного материаловедения».

По окончании геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова Валерий Станиславович в течение пяти лет работал в производственных организациях и научно-исследовательских институтах. С 1975 г. работает в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова, где в 1989 г. организовал и возглавил кафедру строительного материаловедения. Учебно-методическая работа В.С. Лесовика направлена на создание трансдисциплинарных комплексов с учетом передового отечественного и зарубежного опыта и способствует интенсификации учебного процесса. Студенты кафедры являются победителями конкурсов дипломных и научных студенческих работ по специальности.

Работая в должности первого проректора университета, В.С. Лесовик ориентировал кафедры университета на междисциплинарность исследований, расширение географии приема, дистанционную форму образовательной деятельности, выход на международное научно-образовательное пространство. В.С. Лесовиком разработана концепция образовательного процесса, основанная на трансдисциплинарных подходах. С 2005 г. проводятся вебинары, международные конгрессы. Более 50 докладов размещены в сети Интернет, в том числе на английском и арабском языках.

В.С. Лесовик является автором нового научного направления геоника (геомиметика), в рамках которого сформулирована теория техногенного метасоматоза в строительном материаловедении, законы сродства структур и подобия. Реализация теоретических положений и системный подход к решению проблем, сформулированных в рамках геоники (геомиметики), позволили разработать методологические основы создания эффективных строительных композитов нового поколения, защищающих человека от негативного воздействия аномальных природных и техногенных процессов. На основании этих законов разработана широкая номенклатура строительных композитов нового поколения, в том числе для аддитивных технологий в строительстве. Фундаментальная основа проектирования и создания композитов для аддитивных технологий – это переход к трансдисциплинарным исследованиям.

Создан международный научно-образовательный центр «Геоника (Геомиметика)», который проводит исследования по разработке строительных материалов нового поколения и вносит существенный вклад в современный инновационный учебный процесс.

Результаты научных работ В.С. Лесовика по комплексному использованию минеральных ресурсов Курской магнитной аномалии и Архангельской алмазодобывающей провинции позволили утвердить Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых нерудное сырье, на базе которого построены десятки заводов по производству строительных композитов, возведены миллионы квадратных метров жилья, промышленных зданий и сооружений, построены, реконструированы и отремонтированы тысячи километров дорог и тротуаров.

Полученный опыт был использован как в Российской Федерации, так и для решения проблем во многих странах Латинской Америки, арабских государств, Китая, Королевства Камбоджи и др.

За годы работы в университете В.С. Лесовик участвовал в подготовке более 25 тыс. высококвалифицированных специалистов, он является автором свыше 600 публикаций, 55 патентов. В рамках созданной В.С. Лесовиком научной школы защищено около 150 кандидатских и докторских диссертаций.

Результаты научно-исследовательских работ доложены на международных конференциях в Германии, Китае, США, Англии, Чехии, Польше, Колумбии, Аргентине, Казахстане и других государствах.

Валерий Станиславович возглавляет «Топ 100 самых цитируемых российских ученых» РИНЦ по направлению «Строительство. Архитектура».

Научная и педагогическая деятельность В.С. Лесовика отмечена многими наградами и званиями, среди которых высшая степень «Fellow ICE» британского Института гражданских инженеров, орден Европейского научного и индустриального консорциума *Labore et Scientia*, золотая медаль Московского международного салона образования, золотая медаль Парижского книжного салона, медаль им. М.В. Ломоносова, премия им. А.Н. Косыгина и др.

В.С. Лесовик – почетный профессор многих университетов России и зарубежных стран.

Многие годы Валерий Станиславович является членом редакционного совета журнала «Строительные материалы»[®], автором, рецензентом, научным консультантом. Но самое главное, Валерий Станиславович – настоящий друг нашей редакции. **Сердечно поздравляем Вас с юбилеем, желаем здоровья, благополучия и больших творческих удач.**

УДК 666.972.1

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-9-17>

В.С. ЛЕСОВИК¹, д-р техн. наук, член-корр. РААСН (naukavs@mail.ru);

Р.С. ФЕДЮК², канд. техн. наук (roman44@yandex.ru)

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

² Дальневосточный федеральный университет (690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10)

Композиты нового поколения для специальных сооружений

Приведены результаты исследований, доказывающих, что применение теоретических основ геоники (геомиметики) позволяет получить композиционные вяжущие и бетоны на их основе для строительства специальных сооружений. Разработаны фибробетоны на вяжущих, содержащих комплекс многокомпонентных добавок. Ударная выносливость стале- и базальтофибробетонов возрастает более чем в восемь раз по сравнению с неармированными составами. Повышение ударной вязкости и истираемости достигнуто за счет введения в составы наномодифицированных гидротермальных нанокремнеземов, что позволяет применять их при строительстве федеральных трасс и взлетно-посадочных полос. В результате целенаправленного управления структурообразованием цементных композитов с применением золы-уноса и отсева дробления известняка, измельченных совместно с цементом в варио-планетарной мельнице, получены составы, малопроницаемые для пара и газа. Подтвержден потенциал управления структурообразованием при создании звукопоглощающих ячеистых бетонов, имеющих открытую пористость выше 60%.

Ключевые слова: динамическая прочность, композиционное вяжущее, аморфный кремнезем, цементный композит, фибробетон.

Для цитирования: Лесовик В.С., Федюк Р.С. Композиты нового поколения для специальных сооружений // *Строительные материалы*. 2021. № 3. С. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-9-17>

V.S. LESOVIK¹, Doctor of Science (Engineering), Corresponding Member of RAACS of RAASN (naukavs@mail.ru);

R.S. FEDIUK², Candidate of Sciences (Engineering) (roman44@yandex.ru)

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

² Far Eastern Federal University (10, Ajax, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation)

New Generation Composites for Special Facilities

The results of studies, proving that the application of the theoretical foundations of geonics (geomimetics) makes it possible to obtain composite binders and concretes based on them for the construction of special structures, are given. Fiber-reinforced concretes based on binders containing a complex of multi-component additives have been developed. The impact endurance of steel and basalt fiber reinforced concretes increase more than eight times compared to non-reinforced compounds. The increase in impact strength and abrasion is achieved due to the introduction of nano-modified hydrothermal nano-silicons into the compositions, which makes it possible to use them when constructing federal highways and runways. As a result of purposeful control of the structure formation of cement composites with the use of fly ash and screening of limestone chippings crushed together with cement in a vario-planetary mill, compositions that are poorly permeable to steam and gas are obtained. The potential for controlling structure formation when producing sound-absorbing cellular concretes with an open porosity above 60% has been confirmed.

Keywords: dynamic strength, composite binder, amorphous silica, cement composite, fiber concrete.

For citation: Lesovik V.S., Fediuk R.S. New generation composites for special facilities. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 3, pp. 9–17. (In Russian).

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-9-17>

Специальные сооружения представляют собой особую группу строительных объектов: к этой категории относятся конструкции и сооружения гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций, космодромы, взлетно-посадочные полосы (ВПП), шахтные пусковые установки и другие объекты и сооружения специального назначения, предназначенные для эксплуатации в экстремальных условиях и выполнения определенных функциональных задач.

Воздействия на специальные сооружения систематизировали и в значительной степени исследовали З.Б. Хабер [1], J.D. Riera [2, 3]. Отечественная научная школа всесторонне изучила защиту различных строительных объектов от ионизирующих радиоактивных

излучений [4, 5]. В частности, получена широкая номенклатура бетонных композитов с применением тяжелых заполнителей [6–8]. Т.В. Загоруйко [9], Т.А. Хежев [10], В. Страхов [11] изучали огнестойкость и жаростойкость сооружений различного назначения. Большой вклад в создание высокопрочных малопроницаемых цементных композитов внесли I. Dela Varga [12], D.-Y. Yoo [13, 14] и российская научная школа геоники (геомиметики) [15–18]. Анализ вышеперечисленных литературных источников свидетельствует о необходимости направленного структурообразования на различных масштабных уровнях за счет синергетического эффекта органических и минеральных добавок и активации вяжущих систем. Воздействие микроорганизмов на строитель-

Таблица 1
Table 1

Целевые требования для расчета специальных сооружений
Target requirements for the design of special structures

Гидротехнические сооружения	Защитные сооружения	Покрытия космодромов и ВПП	Звукозащитные преграды
Водонепроницаемость	Ударная вязкость	Истираемость	Звукопоглощение
Паронепроницаемость	Газонепроницаемость	Морозостойкость	Звукоотражение
Газонепроницаемость	Огнестойкость	Ударная вязкость	Звукоизоляция
Истираемость	Паронепроницаемость	Химическая стойкость	Морозостойкость
Коррозия	Химическая стойкость	Огнестойкость	Водопоглощение

Таблица 2
Table 2

Результаты подбора рационального состава КВ
Results of selection of the CB rational composition

Состав	Компоненты КВ, %			С	Нормальная густота, %	Предел прочности при сжатии, МПа
	ПЦ	МП+И	ЗРЛ			
1	60	7	32	1	22,3	62,36
2	60,7	7	31	1,3	21,6	63,96
3	61,4	7	30	1,6	20,3	64,21
4	56,5	10,5	32	1	22,7	67,36
5	57,2	10,5	31	1,3	21,5	71,21
6	57,9	10,5	30	1,6	20,8	66,39
7	53	14	32	1	23	63,36
8	53,7	14	31	1,3	22,1	64,65
9	54,4	14	30	1,6	22,6	62,11

ные материалы и конструкции исследовано в [19–20]. Сейсмостойкость сооружений рассматривалась В.А. Котляревским [21–22].

При этом к настоящему времени исследование специальных сооружений на воздействие комплекса природных и техногенных явлений не производилось.

Основные требования, предъявляемые к материалам специальных сооружений, приведены в табл. 1. Обязательными целевыми требованиями для всех специальных сооружений являются прочность при сжатии и пористость.

Рабочая гипотеза настоящего исследования заключается в том, что с использованием теоретических основ геоники (геомиметики) возможно получить композиционные вяжущие и бетоны на их основе для строительства специальных сооружений.

Цель работы

Разработка композиционных вяжущих и цементных бетонов для строительства различных специальных сооружений.

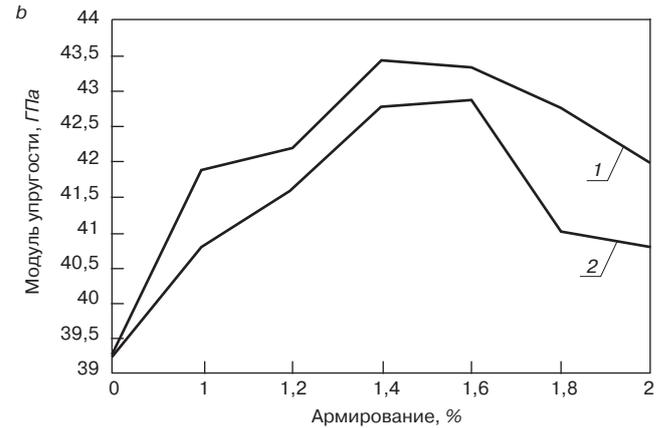
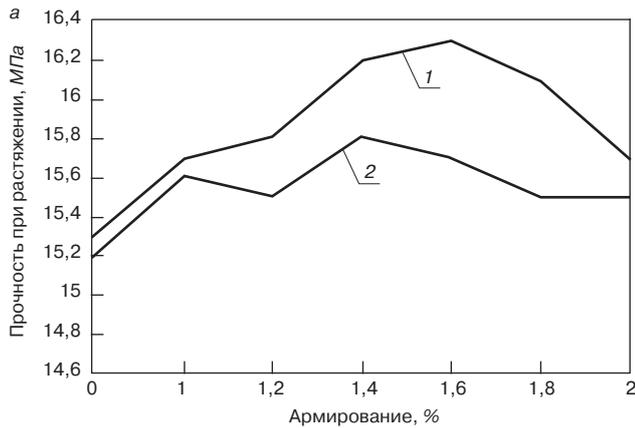


Рис. 1. Влияние процента введенной фибры на прочность при растяжении (а) и модуль упругости (b) бетона: 1 – армирование стальной фиброй; 2 – армирование базальтовой фиброй

Fig. 1. Influence of the percentage of fiber introduced on tensile strength (a) and modulus of elasticity (b) of concrete: 1 – steel fiber reinforcement; 2 – reinforcement with basalt fiber

Таблица 3
Table 3

Физико-механические свойства мелкозернистого бетона
Physical and mechanical properties of fine-grained concrete

Состав	Расход материалов на 1 м ³ , кг				Прочность при сжатии, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Модуль упругости, ГПа
	Цемент	Наполнители КВ	Заполнитель	Вода			
2	646	508	1020	223	73,6	54	41
5	606	548	1020	231	82,6	65,2	55,3
8	565	589	1020	236	75,3	50,3	41,3
ЦЕМ I 42,5 Н	545	–	1634	218	62,9	41,8	35,2
ПЦ+31% ЗРЛ	376	169	1634	241	71,2	52,3	44
ПЦ+1,3% С	512	33	1634	182	65,3	49,2	41,2

Таблица 4
Table 4

Составы и свойства композиционных вяжущих
Compositions and properties of composite binders

Состав	Цемент, %	Зола-уноса, мас. %		Известняк, %	Предел прочности при сжатии, МПа		
		Владивостокская ТЭЦ-2	Артемовская ТЭЦ		3 сут	7 сут	28 сут
1	100	–	–	–	17	32,5	47,5
2	30	–	50	20	30,2	40,1	50,4
3	35	45	–	20	34,2	43,1	53,2
4	40	–	45	15	36,6	48,2	56,6
5	45	45	–	10	39,2	50,1	59,2
6	50	–	40	10	45,1	54,9	65,8
7	55	40	–	5	47,2	54,1	70,2
8	100 (ВНВ)	–	–	–	60,3	81	103,2

Примечание. Контрольный состав № 1 – без домолла; составы № 2–8 измельчены до S_{уд}=600 м²/кг.

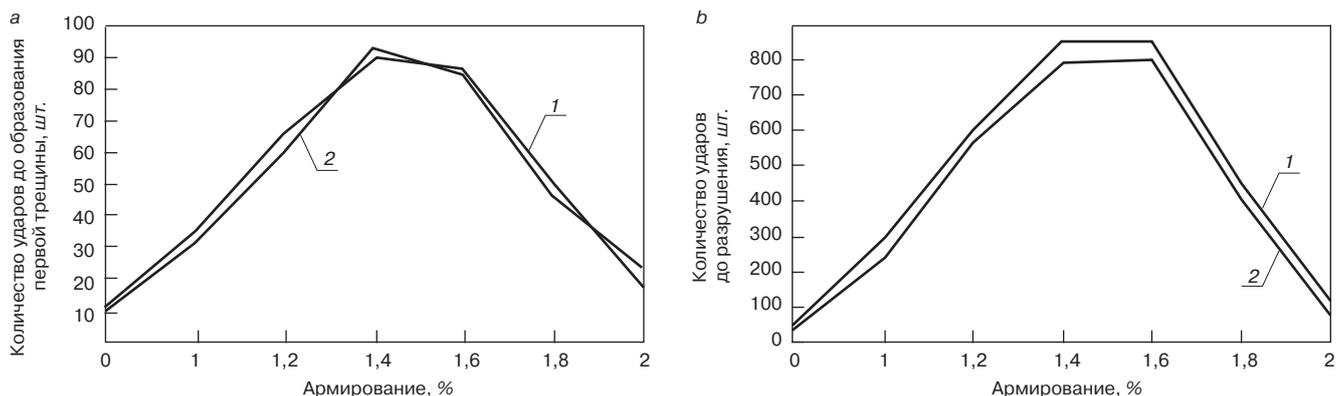


Рис. 2. Влияние процента введенной фибры на количества ударов до начала трещинообразования (а) и до разрушения (б) бетона: 1 – армирование стальной фиброй; 2 – армирование базальтовой фиброй

Fig. 2. Influence of the percentage of fiber introduced on the number of impacts before cracking (a) and before destruction (b) of concrete: 1 – steel fiber reinforcement; 2 – reinforcement with basalt fiber

Таблица 5
Table 5

Паропроницаемость мелкозернистого бетона в зависимости от состава вяжущего
Vapor permeability of fine-grained concrete depending on the composition of the binder

Состав	Расход материалов на 1 м ³							ОК	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	
	Вяжущее, кг				Отсев дробления гранитного щебня, кг	Песок, кг	Вода, л		для сухого климата	для влажного климата
	ЦЕМ I	Зола	Известняк	СП						
1	550	–	–	1,2	1000	623	220	10–12	0,032	0,03
2	288	235	27				330		0,022	0,021
3	275	246	29				334		0,026	0,025
4	257	257	36				337		0,027	0,026
5	244	268	38				343		0,03	0,029
6	230	278	42				348		0,032	0,03

Фибробетоны с улучшенной ударной вязкостью

Исследования были направлены на разработку состава композиционного вяжущего (КВ) на основе портландцемента (ПЦ), золы рисовой лузги (ЗРЛ), мелкозернистого песка (МП), известняка (И) и суперпластификатора (С). Согласно табл. 2, разработанное вяжущее позволяет получать цементные композиты с пределом прочности при сжатии на уровне 60–70 МПа.

Физико-механические свойства мелкозернистого бетона с применением композиционного вяжущего приводят к росту кубиковой прочности при сжатии на 17%, призмочной прочности на 32% и модуля упругости на 16% (табл. 3). Полученный прирост в прочностных характеристиках стал возможен в результате уплотнения микроструктуры цементного композита и, как следствие, получения низкой пористости, в том числе из-за снижения водоцементного отношения.

Создание фибробетонов с улучшенной ударной вязкостью достигалось путем внедрения в бетонную систему стальных и базальтовых волокон. Здесь важным является определение рационального процента фибры (рис. 1).

Отмечаются практически равные характеристики для обоих видов фибры с небольшими преимуще-

ствами стального волокна. Схожая тенденция наблюдается и при изучении ударной выносливости разработанного композита (рис. 2).

В частности, доказано повышение количества ударов, как до начала трещинообразования, так и до разрушения, больше чем в восемь раз по сравнению с неармированными составами. Выявлена эффективность применения стальной и базальтовой фибры для создания «мостов», препятствующих как началу трещинообразования, так и раскрытию трещин.

Сравнивая рис. 2, а и б, отмечаем, что даже после начала трещинообразования образец еще длительно время воспринимал значительные ударные нагрузки перед разрушением.

Малопроницаемые цементные композиты

Такие бетоны создаются в результате максимального снижения пористой составляющей. Было разработано семь композиций, включающих портландцемент (Спасскцемент) ЦЕМ I 42,5Н, известняк, две различные золы-уноса и поликарбоксилатный суперпластификатор (0,3% для всех составов) (табл. 4).

Разработанные составы вяжущего были подвергнуты механохимической активации в варио-планетарной мельнице, что позволило повысить их активность более чем на 60%. Это объясняется вторичной

Таблица 6
Table 6Зависимость между общей пористостью и прочностью при сжатии ячеистых бетонов (28 сут)
Relationship between total porosity and compressive strength of cellular concrete (28 days)

Состав	Прочность при сжатии, МПа	Плотность, кг/м ³	Пористость, %		
			Общая	Открытая	Закрытая
Изоляционные композиты					
1	1,1	315	85,1	40	45,1
2	1,1	322	85,2	61,9	23,2
3	1,5	331	87	39,8	47,2
4	1	329	85	62,1	22,9
Контрольный	1	321	72,7	41,9	30,8
Конструкционно-изоляционные композиты					
5	4,0	584	69,8	30,1	39,7
6	4,3	592	70	42,3	27,7
7	4,9	602	69,7	26	43,7
8	4	601	70,7	50,8	19,9
Конструкционные композиты					
9	7,6	815	63,6	23,9	39,7
10	7,5	826	63,9	36,8	27,1
11	7,8	836	65,4	25,8	39,6
12	7,6	834	63,3	41,1	22,2

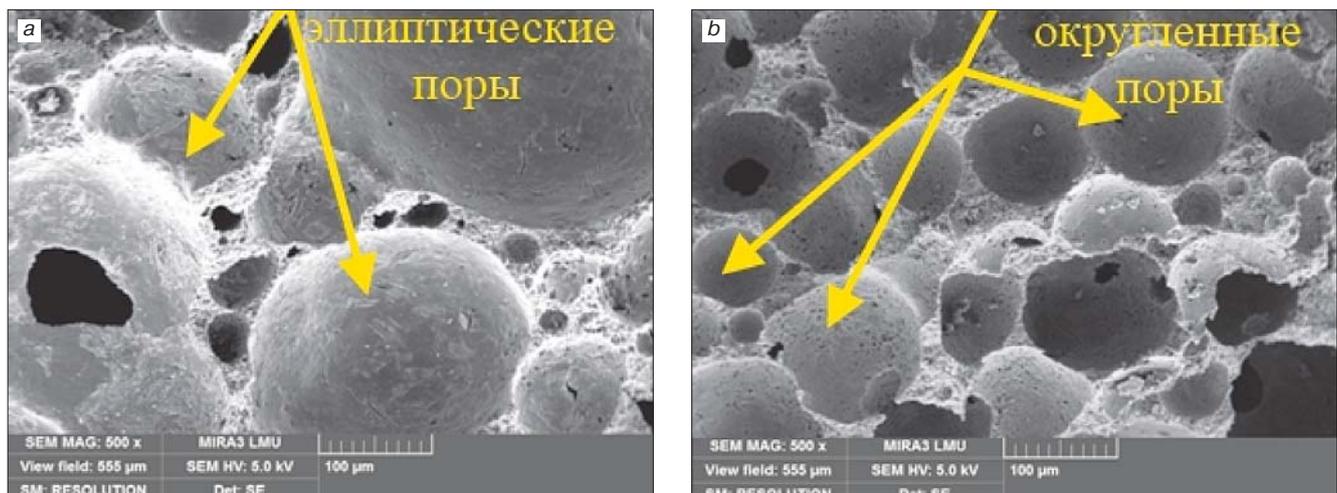


Рис. 3. Пористая структура пенобетонов в возрасте 28 сут: эллиптические поры (а) и округленные поры (b)
Fig. 3. Porous structure of foam concrete at the age of 28 days: elliptical pores (a) and rounded pores (b)

гидратацией клинкерных минералов цемента в присутствии тонкомолотых активных минеральных добавок. А крупные частицы минерального компонента и неразмолотые микросферы золы-уноса выполняют двойную функцию: служат центрами кристаллизации и выполняют роль микрозаполнителя, кольматируя поры.

Полученные низкоосновные гидросиликаты кальция дополнительно уплотняют в единице объема пустоты, а также упрочняют межфазную переходную зону между цементным камнем и заполнителем. Соответственно образуется плотная и прочная микроструктура композита, что подтверждается в том числе и в ходе исследования паропроницаемости (табл. 5).

Звукопоглощающие ячеистые бетоны

Для управления структурообразованием цементного композита необходимо применение нового сырья. Принимая во внимание, что в России накоплены огромные отвалы гидроудаленных золошлаковых смесей, была разработана технология их четырехступенчатой очистки с последующим получением алюмосиликатной добавки (АД).

С использованием алюмосиликатной добавки, а также двух видов заполнителей были разработаны составы изоляционных (1–4), конструктивно-изоляционных (5–8) и конструктивных (9–12) ячеистых бетонов. Замена части цемента подготовленной золошлаковой смесью осуществлялось в следующем количестве: составы 1, 5, 9 – 40%; остальные – 50%.

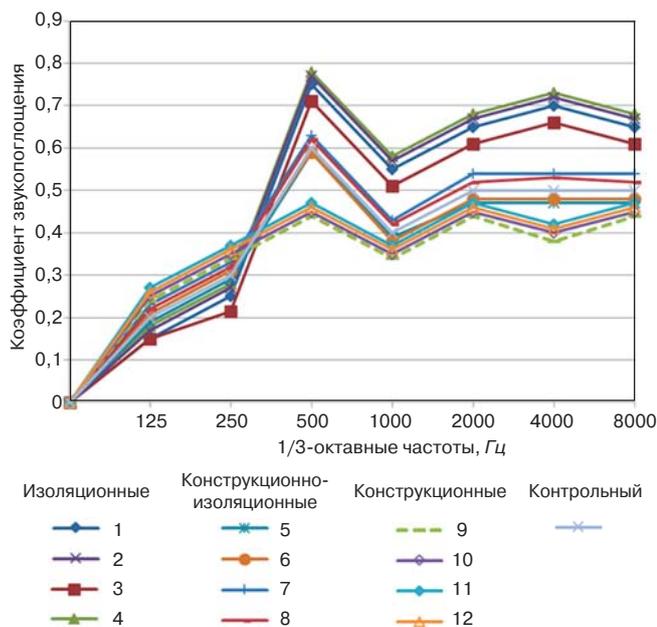


Рис. 4. Зависимость коэффициентов звукопоглощения разработанных составов от частот

Fig. 4. Dependence of the sound absorption coefficients of the developed compositions on frequencies

Водовязущее отношение для первой группы составов было принято 0,4, для второй – 0,45.

В табл. 6 показано, что общая пористость ячеистого бетона значительно влияет на прочность при сжатии.

Микроструктурный анализ пенобетонов показал, что просматриваются поры внутри межпоровых перегородок (рис. 3). Они имеют две различные формы: некоторые округлены, а другие эллипсоидальные. Округленные поры вызваны вовлеченным воздухом и не имеют поверхностных зарядов, поэтому не подвержены влиянию пор, образованных пеной, и, следовательно, более стабильны и не слипаются.

Эллиптические поры получены из пены суперпластификатора за счет локальных сил, вызывающих овальную форму. Кроме того, эти очень небольшие поры потенциально могут быть источником больших изменений размера пор в результате остwaldовского созревания.

Полученная микроструктура разработанных ячеистых бетонов позволяет добиться снижения уровня звукопоглощения практически на 80%.

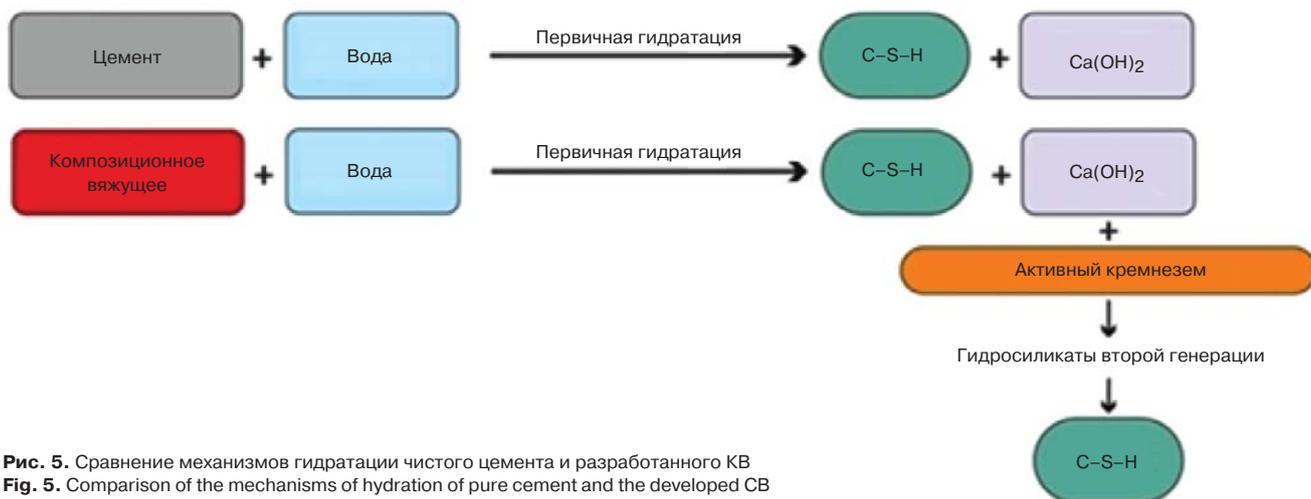


Рис. 5. Сравнение механизмов гидратации чистого цемента и разработанного КВ
Fig. 5. Comparison of the mechanisms of hydration of pure cement and the developed CB

Таблица 7
Table 7

Экспериментальные составы наномодифицированных фибробетонов
Experimental compositions of nano-modified fiber-reinforced concrete

Состав	ЦЕМ I	SiO ₂	Вода	Суперпластификатор	Кварцевый песок	Базальтовая фибра
ЦЕМ	100	–	40	–	300	–
ЦЕМ+С	100	–	39,88	0,2	–	–
ЦЕМ+Ф	100	–	40	–	300	1,5
ЦЕМ+С+Ф	100	–	39,86	0,22	300	1,5
001PF	99,99	0,01	39,8	0,33	300	1,5
005PF	99,95	0,05	39,67	0,55	300	1,5
01PF	99,9	0,1	39,53	0,77	300	1,5
025PF	99,75	0,25	39,47	0,88	300	1,5
05PF	99,5	0,5	39,4	0,99	300	1,5
1PF	99	1	39,34	1,1	300	1,5
2PF	98	2	39,07	1,55	300	1,5
3PF	97	3	38,68	2,2	300	1,5

Таблица 8
Table 8Характеристики ударной выносливости образцов
Characteristics of impact resistance of samples

Состав	Количество ударов до первой трещины N _{ff}	Ударная энергия (первая трещина), Дж	Количество ударов до разрушения образца N _{сд}	Ударная энергия (разрушение образца), Дж	Коэффициент ударной вязкости, μ (N _{сд} /N _{ff})
001PF	17(+6%)	1003	376(+17%)	22184	22(+10%)
005PF	23(+44%)	1357	498(+55%)	29382	22(+10%)
025PF	28(+75%)	1652	603(+88%)	35577	22(+10%)
05PF	29(+81%)	1711	763(+138%)	45017	26(+30%)
1PF	30 (+88%)	1770	990 (+208%)	58410	33 (+65%)
2PF	39(+144%)	2301	932(+190%)	54988	24(+20%)
3PF	43(+169%)	2537	1022(+218%)	60298	24(+20%)
ЦЕМ	5	295	25	1475	5
ПЦ+С	5	295	55	3245	11
ПЦ+С+Ф	16	944	321	18939	20

Наномодифицированные цементобетонные дорожные покрытия

Таблица 9
Table 9

С точки зрения научных положений трансдисциплинарной науки геоники (геомиметики) большие перспективы для применения в качестве компонентов для эффективных композиционных вяжущих имеет природное сырье, активизированное глубинными геологическими и космохимическими процессами. К такому сырью относится нанокремнезем, синтезированный из гидротермальных источников Камчатки проф. В.В. Потаповым [23]. Полученный нанопорошок добавлялся к цементу в количестве от 0,01 до 3% (табл. 7).

Все показатели зависимостей ударной выносливости разработанных составов улучшаются при возрастании количества введенного гидротермального нанокремнезема (табл. 8). Максимальное упрочнение достигается при наномодифицировании цементных композитов нанокремнеземом на уровне 3%.

В частности, для состава с 3% порошка нанокремнезема отмечается превышение количества ударов до начала трещинообразования на уровне 169% и до разрушения образца на 218%; коэффициент ударной вязкости на 20% больше, чем у контрольного состава, содержащего суперпластификатор и фибру.

Полученные результаты объясняются тем, что Са(ОН)₂, выделяющийся при гидратации алита и белита, связывается активным нанокремнеземом с образованием гидросиликатов второй генерации. На этой стадии под действием активного аморфного нанокремнезема интенсифицируются химические процессы, способствующие наномодифицированию твердеющей системы. В частности, в результате подобного управления структурообразованием снижается процентная доля слабых первичных кристаллогидратов (портландит, этtringит и высокоосновные гидросиликаты кальция) при одновременном росте количества более прочных мелкокристаллических низкоосновных гидросиликатов кальция (рис. 5).

Истираемость наномодифицированных композитов
Abrasion of nanomodified composites

Состав	Потеря массы, г/см ²	Марка по ГОСТу
ЦЕМ	0,92	G3
ЦЕМ+С	0,9	G3
001PF	0,86	G3
005PF	0,83	G3
01PF	0,78	G2
025PF	0,73	G2
05PF	0,71	G2
1PF	0,69	G1
2PF	0,67	G1
3PF	0,67	G1

Рис. 6. Исследование истираемости
Fig. 6. Studies of abrasion

Важнейшей характеристикой дорожных покрытий является истираемость (рис. 6). В ходе исследования выявлено, что значение истираемости снижается с повышением дозировки нанокремнезема (табл. 9). Это обеспечивается за счет создания более плотной и прочной структуры композита.

Выводы

1. Анализ мирового опыта строительства специальных сооружений показал, что обеспечение их эффективности невозможно без создания композиционных строительных материалов, обладающих специальным подбором необходимых эксплуатационных характеристик. Однако для конструкций всех специальных сооружений необходимы высокие физико-механические свойства, основные из которых прочность при сжатии и пористость.

2. С учетом теоретических положений геоники (геомиметики) разработаны фибробетоны на композиционных вяжущих, содержащих комплекс актив-

ных многокомпонентных добавок из нетрадиционных видов сырья. Полученные значения ударной выносливости дисперсно-армированных композитов более чем в восемь раз превышают показатели контрольных образцов.

3. Установлено повышение ударной вязкости и истираемости в составах композитов, наномодифицированных гидротермальным нанокремнеземом, что позволяет применять их при строительстве федеральных трасс и взлетно-посадочных полос.

4. В результате целенаправленного управления структурообразованием цементных композитов с применением золы-уноса и отсева дробления известняка, измельченных совместно с цементом в вариопланетарной мельнице, получены составы, малопроницаемые для пара и газа.

5. Возможность управления пористостью подтверждена при создании звукопоглощающих ячеистых бетонов, имеющих открытую пористость свыше 60%.

Список литературы

1. Haber Z.B., Muñoz J.F., De la Varga I., Graybeal B.A. Bond characterization of UHPC overlays for concrete bridge decks: laboratory and field testing // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 190, pp. 1056–1068. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.167
2. Riera J.D. On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces // *Nuclear Engineering and Design*. 1968. Vol. 8, pp. 415–426. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(68\)90039-3](https://doi.org/10.1016/0029-5493(68)90039-3)
3. Riera J.D. A Critical reappraisal of nuclear power plant safety against accidental aircraft impact // *Nuclear Engineering and Design*. 1980. Vol. 57, pp. 193–206. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(80\)90233-2](https://doi.org/10.1016/0029-5493(80)90233-2)
4. Королев Е.В., Очкина Н.А., Баженов Ю.М., Прошин А.П. Радиационно-защитные свойства особоотяжелых растворов на основе высокоглиноземистого цемента // *Строительные материалы*. 2006. № 4. С. 54–56.
5. Баженов Ю.М., Прошин А.П., Еремкин А.И., Королев Е.В. Сверхтяжелый бетон для защиты от радиации // *Строительные материалы*. 2005. № 8. С. 6–8.
6. Дубровский В.Б. Радиационная стойкость строительных материалов. М.: Стройиздат, 1973. 278 с.
7. Егер Т. Бетоны в технике защиты от излучений. М.: Атомиздат, 1960. 84 с.
8. Рояк С.М., Рояк Г.С. Специальные цементы. М.: Стройиздат, 1993. 392 с.
9. Загоруйко Т.В. К вопросу о термостойкости и огнестойкости строительных материалов. *Материалы IV Международной научно-практической конференции*. Воронеж, 2009. С. 85–87.
10. Zhurtov A.V., Khezhev T.A., Kokoev M.N. An investigation of the stress-strain state of two-layer armocement structures on the power and temperature effects during a fire // *Materials Science Forum*. 2018.

References

1. Haber Z.B., Muñoz J.F., De la Varga I., Graybeal B.A. Bond characterization of UHPC overlays for concrete bridge decks: laboratory and field testing. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 190, pp. 1056–1068. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.167
2. Riera J.D. On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces. *Nuclear Engineering and Design*. 1968. Vol. 8. pp. 415–426. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(68\)90039-3](https://doi.org/10.1016/0029-5493(68)90039-3)
3. Riera J.D. A Critical reappraisal of nuclear power plant safety against accidental aircraft impact. *Nuclear Engineering and Design*. 1980. Vol. 57, pp. 193–206. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(80\)90233-2](https://doi.org/10.1016/0029-5493(80)90233-2)
4. Korolev Ye.V., Ochkina N.A., Bazhenov Yu.M., Proshin A.P. Radiation-protective properties of very heavy mortars based on high-alumina cement. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2006. No. 4, pp. 54–56. (In Russian).
5. Bazhenov Yu.M., Proshin A.P., Yermkin A.I., Korolev Ye.V. Extra Heavy Concrete for Radiation Protection. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2005. No. 8, pp. 6–8. (In Russian).
6. Dubrovskiy V.B. Radiacionnaya stojkost' stroitel'nyh materialov [Radiation resistance of building materials]. Moscow: Stroyizdat. 1973. 278 p.
7. Eger T. Betony v tekhnike zashchity ot izlucheniya [Concrete in radiation protection technology]. Moscow: Atomizdat. 1960. 84 p.
8. Royak S.M., Royak G.S. Special'nye cementy [Special cements]. Moscow: Stroyizdat. 1993. 392 p.
9. Zagoruiko T.V. On the issue of heat resistance and fire resistance of building materials. *Materials of the IV international scientific and practical conference*. Voronezh. 2009, pp. 85–87. (In Russian).
10. Zhurtov A.V., Khezhev T.A., Kokoev M.N. An investigation of the stress-strain state of two-layer armocement structures on the power and temperature effects

- Vol. 931 MSF, pp. 219–225. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.219>
11. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н. Огнезащита строительных конструкций: современные средства и методы оптимального проектирования // *Строительные материалы*. 2002. № 6. С. 2–5.
 12. De la Varga I., Spragg R., Muñoz J.F., Graybeal B.A. Cracking, bond, and durability performance of internally cured cementitious grouts for prefabricated bridge element connections // *Sustainability*. 2018. Vol. 10. No. 11, pp. 3881. DOI: 10.3390/su10113881
 13. Yoo D.-Y., Banthia N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. // *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 73, pp. 267–280. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001>
 14. Yoo D.-Y., Banthia N., Yoon Y.-S. Predicting service deflection of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP bars // *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 99, pp. 381–397. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.013>
 15. Лесовик В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее // *Вестник МГСУ*. 2017. № 1. С. 9–16.
 16. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С., Гридчин А.М., Фишер Х.Б. Композиционные вяжущие и самоуплотняющиеся фибробетоны для защитных сооружений // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2018. № 7. С. 77–85.
 17. Лесовик В.С., Фомина Е.В., Айзенштадт А.М. Некоторые аспекты техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // *Строительные материалы*. 2019. № 1–2. С. 100–106. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-100-106>
 18. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. 287 с.
 19. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф. Биологическое сопротивление материалов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. 196 с.
 20. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Богатов А.Д. Бицидный портландцемент с улучшенными физико-механическими свойствами. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2012. Т. 8. № 3. С. 81–92.
 21. Котляревский В.А. Расчет надежности сейсмостойкости сооружений // *Наука и безопасность*. 2014. № 3 (12). С. 12–19.
 22. Котляревский В.А., Ганушкин В.И., Костин А.А. Убежища гражданской обороны: конструкция и расчет. М.: Стройиздат, 1989. 606 с.
 23. Лесовик В.В., Потапов В.В., Алфимова Н.И., Ивашова О.В. Повышение эффективности вяжущих за счет использования наномодификаторов // *Строительные материалы*. 2011. № 12. С. 60–62.
 - during a fire. *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931 MSF, pp. 219–225. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.219>
 11. Strakhov V.L., Garashchenko A.N. Fire protection of building structures: modern means and methods of optimal design. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2002. No. 6, pp. 2–5. (In Russian).
 12. De la Varga I., Spragg R., Muñoz J.F., Graybeal B.A. Cracking, bond, and durability performance of internally cured cementitious grouts for prefabricated bridge element connections. *Sustainability*. 2018. Vol. 10. No. 11, pp. 3881. DOI: 10.3390/su10113881
 13. Yoo D.-Y., Banthia N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 73, pp. 267–280. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001>
 14. Yoo D.-Y., Banthia N., Yoon Y.-S. Predicting service deflection of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP bars. *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 99, pp. 381–397. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.013>
 15. Lesovik V.S. Construction Materials. Present and future. *Vestnik MGSU*. 2017. No. 1, pp. 9–16. (In Russian).
 16. Fediuk R.S., Mochalov A.V., Lesovik V.S., Gridchin A.M., Fisher H.B. Composite binders and self-compacting fiber-reinforced concrete for protective structures. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. 2018. No. 7, pp. 77–85. (In Russian).
 17. Lesovik V.S., Fomina E.V., Ayzenshtadt A.M. Some aspects of technogenic metasomatism in construction material science. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 1–2, pp. 100–106. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-100-106> (In Russian).
 18. Lesovik V.S. Геоника (геомиметика). Primery realizacii v stroitel'nom materialovedenii [Geonics (geomimetics). Examples of implementation in building materials science]. Belgorod: Publishing house of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. 287 p.
 19. Solomatov V.I., Erofeev V.T., Smirnov V.F. Biologicheskoe soprotivlenie materialov [Biological resistance of materials]. Saransk: Publishing house of Mordov. University. 2001. 196 p.
 20. Erofeev V.T., Rodin A.I., Bogatov A.D. Biocidal Portland cement with improved physical and mechanical properties. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2012. Vol. 8. No. 3, pp. 81–92. (In Russian).
 21. Kotlyarevskiy V.A. Calculation of the reliability of seismic resistance of structures. *Nauka i bezopasnost'*. 2014. No. 3 (12), pp. 12–19. (In Russian).
 22. Kotlyarevskiy V.A., Ganushkin V.I., Kostin A.A. Ubezhischa grazhdanskoj oborony: konstrukciya i raschet [Civil defense shelters: design and calculation]. Moscow: Stroyizdat, 1989. 606 p.
 23. Lesovik V.V., Potapov V.V., Alfimova N.I., Ivashova O.V. Increasing the efficiency of binders through the use of nanomodifiers. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2011. No. 12, pp. 60–62. (In Russian).

В.Н. ЯРМАКОВСКИЙ, гл. научный сотрудник, почетный член РААСН, эксперт РАН, член Международной федерации по конструкционным бетонам «International Federation for Structural Concrete» (*fib*) (yarmakovsky@yandex.ru)

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

Мосты между наукой и практикой строительства

Приведен краткий аналитический обзор материалов (докладов, статей), опубликованных в сборнике трудов симпозиума Международной федерации по конструкционным бетонам (*fib*) «Concrete Structures for Resilient Society». Отмечены выдающиеся достижения мировой науки в области технологий строительства, проектирования инженерных сооружений следующих основных видов: мосты через морские проливы длиной до 52 км с подводными тоннелями (Китай); мосты через глубокие ущелья в горах (Япония); инновационные технологии восстановления мостов после землетрясений (Япония); технологии реконструкции мостов (Китай); мосты во фьордах Норвегии с конструкциями и пролетного строения, и опор при использовании в последние десятилетия преимущественно высокопрочного конструкционного легкого бетона на пористых заполнителях, в частности керамзитового гравия, взамен равнопрочного тяжелого бетона на плотных заполнителях из местных скальных пород (гранит, доломит и др.). Последнее обусловлено существенно более высокими показателями долговечности конструкционного легкого бетона (морозостойкости, водонепроницаемости и соответственно сопротивления проницаемости ионов хлора и магниезальных солей морской среды в поровую структуру бетона). Рассматриваются также морские платформы для добычи нефти, прежде всего в Северных приливных морях и морях Дальнего Востока: конструктивные схемы платформ, технологии их возведения; в последнее время – строительство отдельных конструктивных частей платформ в прибрежной зоне, в частности в сухом доке, с доставкой на плаву на место возведения платформы. Заслуживает внимания концептуальный подход (метод) проектирования морских платформ, разработанный норвежской фирмой (руководитель – д-р техн. наук, проф. Tor Ole Olsen). Это лучший и более последовательный способ проектирования по сравнению с прежним методом линейно-упругого анализа и нелинейного точечного проектирования. Последнее обеспечивает как более безопасное, так и более экономичное проектирование, позволяющее одновременно вести поэтапное строительство сразу нескольких платформ. Что касается инновационных технологий создания конструкционных бетонов новых наиболее эффективных в строительстве модификаций, отмечаются: физико-химические основы технологии бетонов, стойких к воздействию сверхнизких (до минус 196°C) криогенных температур, предназначенных в основном для использования в строительстве железобетонных резервуаров для хранения сжиженных природных газов в прибрежной Арктической зоне европейского континента (авторская разработка ФГБУ НИИСФ РААСН [2]); технология высокопрочного ($R_{28c}=180$ МПа) мелкозернистого бетона, изготавливаемого по так называемой порошковой технологии с применением высокодисперсного кварцевого песка, используемого учеными и проектировщиками Китая для возведения большепролетных мостов (Engineering Science and Technology Research Institute, Shanghai, China) [3].

Ключевые слова: бетоны, физико-химические основы, технологии, прочность, долговечность, конструкции, инженерные сооружения, мосты, нефтяные платформы.

Для цитирования: Ярмаковский В.Н. Мосты между наукой и практикой строительства // *Строительные материалы*. 2021. № 3. С. 18–35. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-18-35>

V.N. YARMAKOVSKY, Honorary Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Expert of the Russian Academy of Sciences, member of the International Federation for Structural Concrete (*fib*) (yarmakovsky@yandex.ru)
Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences
(21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

Bridges between Science and Practice of Building

A brief analytical summary of the materials (reports, articles), published in the Proceedings of the International Federation for Structural Concrete (*fib*) Symposium “Concrete Structures for Resilient Society” [1], is given. Outstanding achievements of the world scientific researches in the field of the technologies for the building, design of the engineering constructions and their reconstruction of the following main types are noted: bridges over sea straits with length up to 52 km with underwater tunnels (China); bridges over deep gorges in the mountains (Japan); innovative technologies for reconstruction of bridges after the earthquakes (Japan); bridge reconstruction technologies (China); bridges in the fjords of Norway with structures of both the span structures and supports with using in recent decades with mainly high-strength structural lightweight concrete with use of the porous aggregates – imported production (in particular, expanded clay gravel from Belarus) instead of the equal-strength normal weight concrete with use of the natural dense aggregates – from local rocks (granite, dolomite, etc.). This is due to significantly higher durability indicators of the structural lightweight aggregate concrete (frost resistance, water resistance, and, accordingly, resistance to the permeability of chlorine ions and magnesian salts solutions of the marine environment into the porous structure of concrete). There are considered offshore platforms for oil extraction, primarily in the Northern tidal seas and the seas of the Far East also; constructive schemes of the platforms, technologies for their building; recently – the construction of individual structural parts of platforms in the coastal zone, in particular, in dry dock, with the afloat delivery to the building place of the platform. The conceptual method for offshore platforms designing that was developed by the Norwegian company (the head – Dr., prof. Tor Ole Olsen) deserves attention. This is a better and more consistent method of design in the comparison with the previous method of linear elastic analysis and nonlinear point design. The latter provides more safer and more cost-effective design, allowing simultaneous phased construction of platforms. As for the innovative technologies for creating concrete of the new most effective modifications in construction, the following are noted: – physical-chemical bases of the technologies of concrete which is resistant to the of ultra-low (up to minus 196°C) cryogenic temperatures exposure, intended mainly for use in the construction of the reinforced concrete tanks for storing of the liquefied natural gases in the coastal Arctic zone of the European continent (author’s development of the NIISF RAACS [2]); – the technology of high-strength ($R_{28c}=180$ MPa) fine-grained concrete, produced by so called “powder’s technology” with ultrafine quartz powder, used by scientists and designers of China for the construction of large-span bridges (Engineering Science and Technology Research Institute, Shanghai, China) [3].

Keywords: concrete, physical-chemical bases, technologies, strength, durability, structures, engineering constructions, bridges, oil platforms.

For citation: Yarmakovsky V.N. Bridges between science and practice of building. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 3, pp. 18–35. (In Russian).

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-18-35>

Симпозиум Международной федерации по бетону и железобетону (*fib*) «Concrete Structures for Resilient Society», состоявшийся 22–24 ноября 2020 г. в г. Шанхае [1], прошел в формате онлайн под девизом «Мосты между наукой и практикой строительства», т. е. под девизом *fib*. В организации симпозиума и его проведении кроме Оргкомитета *fib* участвовали две организации Китая – «Tongji University» и «Concrete and Prestressed Concrete Institute of China Civil Engineering Society». В мероприятии приняли участие представители из 52 стран (минимум три участника от каждой страны, максимум девять – от Китая); от Российской Федерации – один участник, представитель ФГБУ НИИСФ РААСН – автор настоящей статьи. Заслушано шесть пленарных докладов:

1. К устойчивым железобетонным конструкциям в мире цифровых технологий. Профессор Luc Taerwe, Бельгия.

2. Поведение железобетонных колонн в условиях действия сейсмических нагрузок на сдвиг в различных направлениях. Профессор Xianglin Gu, Китай.

3. Устойчивость конструкций: задача комплексной сейсмостойкости и энергетической модернизации существующих зданий. Д-р Paolo Negro, Италия.

4. Вызов неметаллическим мостам. Д-р Akio Kasuga, Япония.

5. Бетон и изменение климата: как можно решить эту проблему? Профессор Jean Michel Torrenti, Франция.

6. Технология борьбы с трещинами в бетоне и ее применение при строительстве крупномасштабных монолитных туннелей. Профессор Kunpeng Gu, Китай.

Далее была организована работа восьми сессий симпозиума, в каждой по четыре секции:

– сессия № 1: 1) Фибробетон; 2) Обследование конструкций; 3) Сборные строительные конструкции; 4) Разрушение бетона и коррозия арматуры;

– сессия № 2: 1) Бетон ультравысокого качества; 2) Особенности поведения под нагрузкой элементов железобетонных конструкций (I); 3) Сборные конструкции мостов; 4) Устойчивость и надежность сооружений в эксплуатации;

– сессия № 3: 1) Рециклированный и самоуплотняющийся бетоны; 2) Особенности поведения под нагрузкой элементов железобетонных конструкций (II); 3) Сборные конструкции и узлы (сочленения); 4) Мониторинг поведения конструкций в эксплуатации и техническое обслуживание;

– сессия № 4: 1) Новые материалы для бетонов и материалы специального назначения (I); 2) Поведение конструкций при долговременных нагрузках; 3) Конструкции мостов; 4) Структурное упрочнение и модернизация;

– сессия № 5: 1) Новые материалы для бетонов и материалы специального назначения (II); 2) Огнестойкость бетонов; 3) Численное моделирование и анализ; 4) Долговечность и надежность строительных конструкций в эксплуатации;

The Symposium of the International Federation for Structural Concrete (*fib*) “Concrete Structures for Resilient Society” was held on November 22–24, 2020 in Shanghai in an on-line mode under the motto of *fib* “Bridges between science and construction practice” [1]. In addition to the *fib* Organizing Committee there were two Chinese organizations – Tongji University and the Concrete and the Prestressed Concrete Institute of China Civil Engineering Society participated in organizing and conducting the Symposium. The event was attended by the representatives from 52 countries (at least 3 participants from each country, and maximum 9 – from China); from the Russian Federation – one participant, sorry – representative of the NIISF RAACS.

There were presented 6 plenary reports:

1. Towards Resilient Concrete Structures in a Digitalized World. Professor Luc Taerwe, Belgium

2. Seismic Behavior of Shear-Critical RC Columns under Different Lateral Loading Directions. Professor Xianglin Gu, China.

3. Sustainability of Constructions: the Challenge of the Integrated Seismic Strengthening and Energy Upgrading of Existing Buildings. Dr. Paolo Negro, Italy.

4. A Challenge to Non-metallic Bridges, Dr. Akio Kasuga, Japan.

5. Concrete and Climate Change: How Can We Solve the Problem? Prof. Jean Michel Torrenti, France.

6. Concrete Crack Control Technology and its Application in Super-large Cast- in-situ Tunnel. Prof. Kunpeng Gu, China.

Then the work of 8 sessions of the Symposium was organized, each with 4 sections:

– Session No. 1: 1) Fiber-reinforced concrete; 2) Assessment of existing structures; 3) Precast building structures; 4) Concrete deterioration and reinforcement corrosion.

– Session No. 2: 1) Ultra high performance concrete; 2) Behavior of structural components (I); 3) Precast bridge structures; 4) Resilient and sustainable construction.

– Session No. 3: 1) Recycled and selfcompacting concrete; 2) Behavior of structural components (II); 3) Precast structures and connectors; 4) Structural monitoring and maintenance.

– Session No. 4: 1) New and Special Concrete Materials (I); 2) Long term behavior; 3) Bridge structures; 4) Structural strengthening and retrofitting.

– Session No. 5: 1) New and Special Concrete Materials (II); 2) Fire behavior and resistance; 3) Numerical model and analysis; 4) Structural durability and reliability (the author of this article together with postgraduate Kadiev D.Z. participated (on-line) in the work of this section).

– Special Joint Session of *fib* and the American Institute of Concrete (ACI) members, specializing in the application of fiber-reinforced concrete.

– Session No. 7: 1) Textile reinforced and geopolymer concrete; 2) Performance based design; 3) Tunnels and structural joints; 4) Fatigue behavior of structures.

– специальная совместная сессия членов *fib* и Американского института бетона (ACI), специализирующихся в области применения бетона, армированного фиброй;

– сессия № 7: 1) Текстильно-армированный (волокнуто-армированный) и геополимерный бетоны; 2) Совершенствование основ проектирования конструкций; 3) Туннели и стыки конструкций; 4) Усталостное поведение конструкций под многократно повторной нагрузкой;

– сессия № 8: 1) Сдвиг и кручение конструктивных элементов сооружений; 2) Поведение при ударных нагрузках и взрыве; 3) Инновационные технологии в строительстве; 4) Ремонт и восстановление конструкций.

По решению президиума симпозиума реорганизованы или вновь сформированы девять рабочих групп, целью которых является разработка нормативно-технических документов по новым технологиям и модификациям бетонов различных видов и назначения, по проектированию железобетонных конструкций из них, в основном для инженерных сооружений различного назначения. Это прежде всего многопролетные мосты, акведуки, аэропорты, туннели, морские гидротехнические сооружения. По итогам деятельности рабочих групп предусматривается разработка предложений или дополнений к развитию действующего *международного нормативного документа по расчету и проектированию железобетонных конструкций «Model Code 2020→2030»*.

По инициативе президента *fib*, д-ра техн. наук, проф. Tor Ole Olsen (Норвегия) была сформирована новая перспективная **рабочая группа TG 1.2 «Concrete structures in marine environments»**, основной задачей которой является разработка на основе использования последних (в период 2010–2020 гг.) достижений в мировой науке и практике строительства нормативно-технических документов по следующим проблемным актуальным направлениям:

– по технологиям создания конструкционных бетонов новых наиболее совершенных модификаций, стойких в условиях воздействия морской среды и низких климатических температур Арктических приливных морей (Норвежское море, Северное море, Баренцево море, Карское море), характеризующихся приливно-отливными явлениями течения Гольфстрим;

– по проектированию железобетонных конструкций из бетонов этих новых модификаций для морских гидротехнических сооружений преимущественно в Арктическом регионе и морях Дальнего Востока.

Актуальность создания вышеуказанной рабочей группы обусловлена прежде всего решением Норвегии в конце 2020 г. по резкому (в 3–4 раза) увеличению объемов добычи нефти в Арктических приливных морях и строительства новых нефтедобывающих платформ, что немаловажно для задач энергетического строительства и в зоне Арктического побережья России. В соответствии с решением руководите-

– Session No. 8: 1) Shear and torsion of structural elements; 2) Behavior under impact and explosion; 3) Innovative technologies for construction; 4) Structural repair and rehabilitation.

By decision of the Symposium Presidium there were reorganized or newly formed 9 working groups. The purpose of these groups is the development of normative-technical documents, devoted to new technologies and modifications of concrete of the different types and assignment, to designing reinforced concrete structures, mostly for engineering constructions of various purposes. These are, first of all, multi-spans bridges, aqueducts, viaducts, airports, tunnels, and marine hydrotechnical constructions. Based on the results of the working groups activity, it is planned the development of the “Proposals” or “Additions” to the actual *International Normative Document on the Calculation and Design of Reinforced Concrete Structures «Model Code 2020→2030»*.

By the initiative of the President of *fib*, Doctor of technical sciences, Prof. Tor Ole Olsen (Norway) a new perspective working group was formed – **TG 1.2 “Concrete structures in marine environments”**, the main task of which is to develop, basing on the use of the latest (in the period of 2010–2020) achievements in the world science and practice of construction, regulatory and technical documents on the following problematic topical directions:

– on the technologies for creating structural concrete of the new most advanced modifications that are resistant to the exposure of sea environment and low climatic temperatures of the Arctic tidal seas (the Norwegian Sea, the North Sea, the Barents Sea, the Kara Sea), characterized by tidal phenomena of the Gulf Stream;

– on the design of reinforced concrete structures made of concrete of these new modifications for marine hydrotechnical structures, mainly in the Arctic Region and the seas of the Far East.

The relevance of creating the above-mentioned working group is primarily due to Norway’s decision at the end of 2020 to increase significantly (3–4 times) the volume of oil production in the Arctic tidal seas and, accordingly, the construction of new oil production platforms, which is important for the tasks of energetic construction in the Arctic coast of Russia. In accordance with the decision of the head of this working group TG 1.2 – the president of *fib* Tor Ole Olsen, V.N. Yarmakovskiy is included in it. He is the chief researcher of the Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, a member of the International Federation for Structural Concrete (*fib*) since 1996, taking into account his main specialty by the diploma of the Moscow Institute of Civil Engineering (MISI) named after V.V. Kuybyshev – “Marine Hydrotechnical Building”. In addition, the following experience of V. N. Yarmakovskiy was taken into account:

– research experience in the relevant field (both in laboratory and in situ on the stands in the Kola Bay of the Barents Sea, Murmansk and its coastal area, the city of Severomorsk) in the “Soyuzmorniiproekt” of the Ministry of the Navy of the Russian Federation, then in

ля этой рабочей группы TG 1.2 – президента *fib* Тор Оле Олсен в нее включен В.Н. Ярмаковский – главный научный сотрудник ФГБУ НИИСФ РААСН, член Международной федерации по конструкционным бетонам (International Federation for Structural Concrete, *fib*) с 1996 г. с учетом его основной специальности по диплому МИСИ им. В.В. Куйбышева «Морское гидротехническое строительство». Кроме того, учитывался следующий опыт работы В.Н. Ярмаковского:

- опыт исследовательской работы по соответствующему направлению (как в лабораторных, так и в натурных условиях на стендах в Кольском заливе Баренцева моря, г. Мурманск, и в прибрежной его зоне, г. Североморск) в «Союзморниипроекте» Минморфлота РФ, далее – в НИИЖБ Госстроя РФ и в НИИСФ РААСН;

- участие в рабочей группе *fib* TG 8.1 «Руководство по проектированию конструкций из легких бетонов для инженерных сооружений», рекомендованного как дополнение по развитию международного нормативного документа *fib* по проектированию железобетонных конструкций зданий и инженерных сооружений «**Model Code 90**» (руководитель группы – д-р Ivar Holand, Норвегия. Создана в 1999 г. Бюл. № 8 *fib*, г. Штутгарт, 2000 г.) (рис. 1).

По итогам проведения симпозиума опубликовано 288 докладов и статей [1]. Из них большинство посвящено:

- принципиально новым конструктивным решениям мостов с использованием как высокопрочных тяжелых бетонов, так и преимущественно высокопрочных конструкционных легких бетонов на пористых заполнителях;

- инновационным технологиям восстановления пролетных строений мостов, разрушившихся после землетрясений;

- морским гидротехническим сооружениям, в частности платформам для добычи нефти в Северных приливных морях;

- инновационным технологиям в области бетоноведения, в том числе направленным на повышение стойкости бетонов в условиях действия агрессивной среды и низких, в том числе криогенных, отрицательных температур.

Безусловно, заслуживают внимания как *выдающиеся инженерные сооружения* большепролетные мосты через морские проливы, причем имеющие не только надводную, но и подводную часть для прохода морских судов. Здесь следует прежде всего отметить мост длиной около 52 км (с подводной частью – туннелем длиной около 7 км) между Гонконгом и материковой частью Китая (рис. 2, 3).

Далее следует отметить:

- действующие мосты во фьордах Норвегии, конструкции которых выполнены из высокопрочных (классов по прочности В40–В60) легких бетонов; с докладом об этих высококлассных сооружениях выступил на симпозиуме *fib* в Sandefjord (Норвегия,

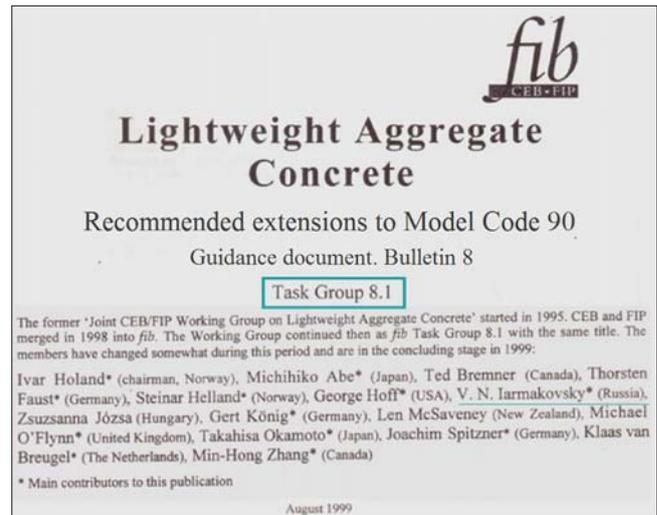


Рис. 1. Авторский коллектив членов *fib* по разработке нормативного документа «Руководство по проектированию конструкций из легких бетонов» для дополнения международного нормативного документа *fib* по проектированию железобетонных конструкций зданий и инженерных сооружений «Model Code 90» → «Model Code 2020 (2030)»

Fig. 1. The author's team of *fib* members on the development of the normative document «Guidelines for the design of structures made of lightweight aggregate concrete» to the supplement of the International Normative Document of *fib* on the design of reinforced concrete structures of buildings and engineering structures «Model Code 90» → «Model Code 2020 (2030)»

НИИЖБ of Gosstroy of the Russian Federation and NIISF RAACS;

- participation in the *fib* TG 8.1 working group “Guidelines for the design of Lightweight Aggregate Concrete Structures for Engineering Constructions”, recommended as the Supplement to the development of the *fib* International Standard Document for the Design of Reinforced Concrete Structures of Buildings and Engineering Structures “**Model Code 90**” (group leader – Dr. Ivar Holand, Norway: established in 1999, *fib* Bulletin No. 8, Stuttgart, 2000), (Fig. 1).

As a result of the Symposium, 288 reports and articles were published [1]. Most of them are dedicated to:

- fundamentally new design solutions for bridges with the use of high-strength normal weight concretes and, mainly, high performance structural lightweight aggregate concretes;

- innovative technologies for the restoration of bridge spans destroyed after earthquakes;

- marine hydrotechnical structures; in particular, oil production platforms in the Northern Tidal Seas;

- innovative technologies in the field of concrete science; including aimed at the concrete resistance increasing in conditions of aggressive environment and low, including cryogenic subzero temperatures.

Of course, the outstanding engineering structures, large-span bridges across the sea straits, and having not only surface, but also underwater parts for the passage of sea vessels, deserve attention. Here, first of all, we should note the 52 km long Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge (Fig. 2, 3).

Next, it should be noted:

- existing bridges in the fjords of Norway, whose structures are made of high-strength (strength classes



Рис. 2. Общий вид двухъярусного (с подводной частью) моста между Гонконгом и материковой частью Китая (Чжухай и Макао)

Fig. 2. General view of the two-tier (with underwater part) bridge between Hong Kong and mainland China (Zhuhai and Macau)

1995 г.) проф. J.A. Spitzner [4]; пример такого моста, выполненного с использованием монолитного керамзитобетона и построенного в одном из фьордов Норвегии, показан на рис. 4;

– мост «Coronado» (California, USA) протяженностью 3407 м и высотой 61 м; мост построен в 1969 г. из конструкционного легкого бетона на пористых заполнителях из вспученных глинистых сланцев (рис. 5).

Выбор проектными организациями Норвегии использования в конструкциях моста (не только для конструкций пролетного строения, но и для опор) именно легкого бетона на керамзитовом гравии, а не тяжелого бетона на местном плотном заполнителе из скальных пород Норвегии обусловлен следующим.

Результатами исследований, выполненных в России [5], опубликованных в том числе в зарубежных источниках [6], выполненных также в Японии [7],

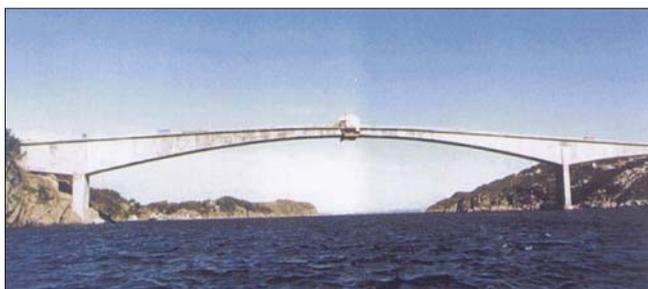


Рис. 4. Мост Stolma (Норвегия). Построен в 1998 г. (главный пролет 301 м). Центральная часть пролета длиной 184 м и опоры моста выполнены из высокопрочного (класс по прочности на сжатие LC55 марки по средней плотности D1900) конструкционного легкого бетона с использованием в качестве крупного пористого заполнителя HF Leca 800 – типа керамзитового гравия

Примечание. LC означает «Lightweight Concrete» – легкий бетон

Fig. 4. Stolma Bridge (Norway). Built in 1998 (main span 301 m). The central part of the span with a length of 184 m and the bridge supports are made of high-strength (compressive strength class LC55 of the average density grade D1900) structural lightweight aggregate concrete with the use of HF Leca 800 – type expanded clay gravel as a coarse porous aggregate, manufactured at the largest expanded clay production plant in Europe in Belarus (500 thousand m³/year) and supplied under the corresponding contract to Norway

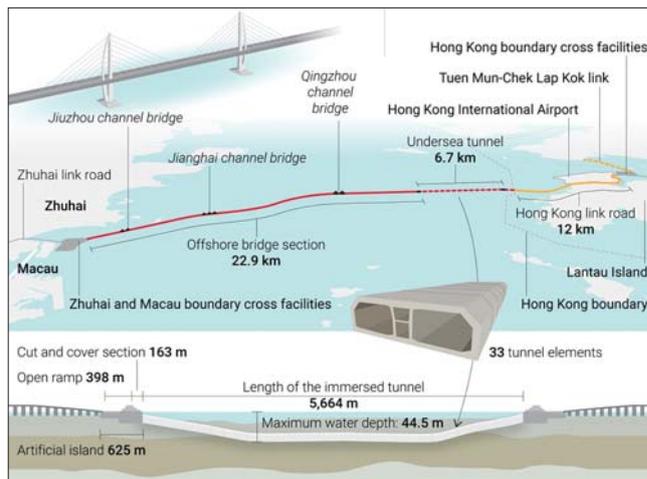


Рис. 3. Схема на карте моста Гонконг (Международный аэропорт) – Чжухай – Макао (Китай) с подводной частью – туннелем, построенном с участком максимальной глубины 44,5 м, начинающимся и заканчивающимся искусственными островами длиной 625 м каждый. Приведено сечение туннеля длиной 6,7 км, состоящего из 33 сборных железобетонных элементов

Fig. 3. Diagram on the map of the bridge «Hong Kong (International Airport) – Zhuhai – Macau (China)» with an underwater part – the tunnel built with a maximum depth of 44.5 m, starting and ending with artificial islands 625 m long each. The section of the tunnel with a length of 6.7 km, consisting of 33 precast concrete elements, is given

LC40-LC60) lightweight aggregate concrete; Professor J.A. Spitzner made a report on these high-class structures at the *fib* Symposium in Sandefjord (Norway, 1995) [4]; an example of such a bridge, made using monolithic expanded clay concrete and built in one of the fjords of Norway is shown in Fig. 4;

– Coronado Bridge (California, USA) with a length of 3407 m and a height of 61 m; the bridge was built in 1969 from structural lightweight concrete on the porous aggregates of expanded clay shale (Fig. 5).

Norwegian design organizations choice to use in bridge structures (not only for span structures, but also for supports) lightweight aggregate concrete with imported ex-



Рис. 5. Мост Коронадо (Калифорния, США) протяженностью 3407 м и высотой 61 м. Мост построен в 1969 г. из конструкционного легкого бетона класса по прочности LC40 и марки по средней плотности D1800 на пористых заполнителях из вспученных глинистых сланцев

Fig. 5. The Coronado Bridge (California, USA) with a length of 3407 m and a height of 61 m. The bridge was built in 1969 from structural lightweight aggregate concrete of the strength class LC40 and the average density grade D1800 on the porous aggregates of expanded clay shale

США [8–10], Канаде [10, 11] и странах Европы [12, 13], установлены существенные преимущества в физико-механических характеристиках, прежде всего в основных показателях долговечности – морозостойкости и водонепроницаемости, конструкционных легких бетонов на пористых заполнителях различных видов и петрогенеза в сравнении с равнопрочными тяжелыми бетонами на природных плотных заполнителях.

Как существенный вклад в решение актуальных вопросов развития на современном этапе разработки и внедрения в строительство инженерных сооружений и в гражданское строительство конструкционных легких бетонов, в том числе высокопрочных и высокодолговечных, следует отметить:

- Руководство *fib* по легким бетонам и конструкциям из них [14] (в переводе на русский язык издано в 1986 г. в Стройиздате под редакцией автора настоящей статьи);

- Руководство *fib* по проектированию конструкций из легких бетонов для инженерных сооружений, разработанное в 1999 г. Рабочей группой *fib* TG 8.1 как Дополнение к международному нормативному документу *fib* «Model Code 90» (см. выше);

- монографию французских ученых М. Arnould и М. Virlogeux [15], основные главы которой содержат технологию производства пористых заполнителей различных видов и петрогенеза, в том числе изготавливаемых на основе продуктов переработки техногенных образований (издана в 1986 г.);

- монографию, изданную по решению Ученого совета Отделения строительных наук РААСН (Издательство «Палеотип», 2013 г.) [16].

Исследованиями, выполненными в соответствии с задачами проекта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 09-08-13560 (руководитель проекта – В.Н. Ярмаковский с участием В.И. Кондращенко) «Разработка основ структурообразования и механики высокоэффективных конструкционных легких бетонов новых модификаций на пористых заполнителях – продуктах переработки отходов металлургии и тепловой энергетики (математические модели материалов и процессов, новые композиции и технологии)», определены условия формирования оптимальной структуры высокопрочных и высокодолговечных конструкционных легких бетонов с помощью структурно-имитационной модели (СИМ-модель) при действии кратковременной сжимающей нагрузки, в том числе при действии низких отрицательных температур.

На основании результатов вычислительных экспериментов на СИМ-модели по влиянию параметров макроструктуры конструкционного легкого бетона (КЛБ) и, для сравнения, тяжелого бетона) на прочность при осевом сжатии (рис. 6) сформулированы следующие основные условия формирования ее как оптимальные с позиции прочности бетона (перечисляются в порядке степени их влияния), которые, по существу, и определяют излагаемые ниже основы

panded clay gravel, rather than normal weight concrete on the local dense aggregate from Norwegian rocks, is due to the following.

The results of studies carried out in Russia [5], including published in foreign sources [6], carried out also in Japan [7], USA [8–10], Canada [10, 11] and Europe [12, 13] show the significant benefits in physical and mechanical properties (especially in the key indicators of durability – frost resistance and water resistance) of structural lightweight concrete with the porous aggregates of different types and petrogenesis in comparison with the equal-strength normal weight concrete with natural dense aggregates.

As a significant contribution to the solution of the topical issues at the present stage of the development and implementation in the building of engineering constructions and in the civil engineering of structural lightweight aggregate concrete, including high-strength and high-durability, the following should be noted:

- *fib* Guidelines on Lightweight Aggregate Concrete and Structures made of them [14] (translated into Russian published in 1986 in “Stroyizdat” (Moscow) under the editorship of the author of this article);

- *fib* Guidelines for the Design of Lightweight Aggregate Concrete Structures for Engineering Structures, developed in 1999 by the *fib* Working Group TG 8.1, as a Supplement to the *fib* International Regulatory Document “Model Code 90” (see above);

- the monograph by French scientists M. Arnould and M. Virlogeux [15], the main chapters of which contain the technology for the production of the porous aggregates of various types and petrogenesis, including manufactured on the basis of products of technogenic formations processing (published in 1986);

- the monograph published by the decision of the Scientific Council of the Department of Building Sciences of the RAACS (Paleotype Publishing House, 2013) [16].

By the researches carried out in accordance with the tasks of the project of the Russian Fund for Fundamental Researches (RFFI) No. 09-08-13560 Research results of the Laboratory of lightweight aggregate concretes and structures of the Research Institute for the Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) under the RFFI project No. 09-08-13560 (project manager – V.N. Yarmakovskiy with the participation of V.I. Kondrashchenko) “Development of the basics of structure formation and mechanics of high-performance structural lightweight aggregate concretes of new modifications with the porous aggregates (mathematical models of materials and processes, new compositions and technologies)”, determined the conditions for the formation of the optimal structure of high-strength and high-durability structural lightweight aggregate concrete (SLAC) using a structural-imitation model (SIM-model) under the action of a short-time compressive load, also including under the action of low subzero temperatures.

Based on the results of computational experiments on the SIM-model on the influence of parameters of SLAC macrostructure (and, for comparison, normal weight con-

технологических приемов получения высокопрочных конструкционных легких бетонов:

– обеспечение прочного (не ниже прочности компонентов) контакта матрицы затвердевшей растворной части бетона с включениями (зернами крупного заполнителя);

– улучшение поровой структуры компонентов бетона (и растворной части – матрицы бетона, и зерна заполнителя) в направлении уменьшения размера пор и их количества (пористости); как показали результаты исследований, выполненные автором статьи в НИИСФ, это условие обеспечивается во многом таким эффективным технологическим приемом, как использование при изготовлении высокопрочного легкого бетона модификатора его структуры [17], способствующего трансформации крупнопористой структуры бетона в мелкопористую с равномерным распределением пор по объему;

– обеспечение однородности включений, под которыми понимаются здесь зерна крупного пористого заполнителя; в рассмотренном случае – однородность по величине модуля упругости зерна.

Исходя из вышеизложенного нетрудно понять, что тяжелый бетон должен существенно проигрывать равнопрочному конструкционному легкому бетону в связи с трудностями формирования оптимальных макро- и микроструктур. Прежде всего это относится к такому важному параметру макроструктуры бетона, определяющему во многом его прочность, морозостойкость и водонепроницаемость, как *контактная зона крупного заполнителя с растворной частью*.

Вышеизложенные результаты вычислительных экспериментов с помощью СИМ-модели по определению условий формирования оптимальной с позиции высокой прочности и высоких показателей долговечности (морозостойкости и водонепроницаемости) макроструктуры равнопрочных легкого и тяжелого бетонов, показывающие существенные преимущества первого, подтверждаются результатами соответствующих экспериментальных исследований, выполненных в лабораториях легких бетонов и конструкций НИИЖБ, а затем и НИИСФ (руководитель той и другой лаборатории – автор настоящей статьи).

Так, исследования контактной зоны проводились на образцах КЛБ класса по прочности при сжатии В45, изготовленных на пористых заполнителях двух видов: высокопрочном керамзитовом гравии Новочебоксарского ДСК и пористом шлаковом гравии (ПШГ) с остеклованной оболочкой, изготовленном в шлакоперерабатывающем цехе Новолипецкого металлургического комбината по технологии, разработанной автором статьи и доложенной на симпозиуме *fib* в Sandfjord в 1995 г. [6].

Конструкционные легкие бетоны классов по прочности на сжатие LC30–LC40 на пористом шлаковом гравии с остеклованной оболочкой, изготавливаемом по вышеуказанной технологии автора статьи, использованы при возведении офисного зда-

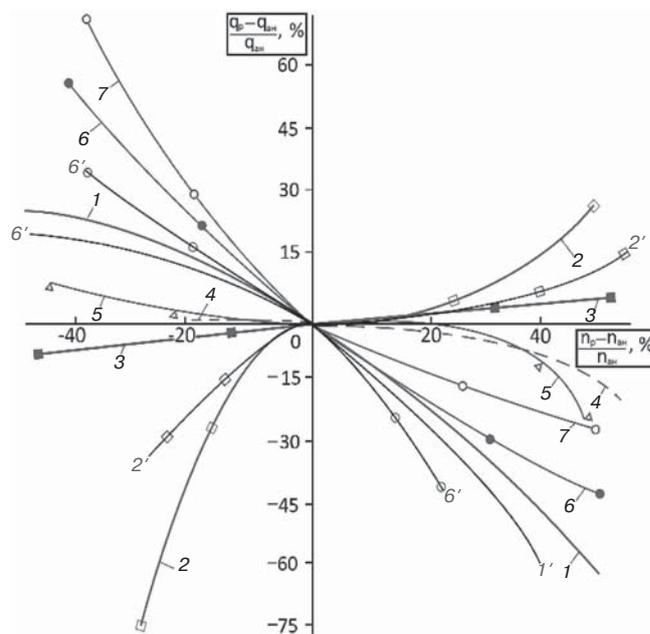


Рис. 6. Влияние параметров макроструктуры (n) конструкционного легкого бетона (КЛБ) и тяжелого бетона (ТБ) на прочность (q) при осевом сжатии – по результатам вычислительных экспериментов на СИМ-модели: 1 – неоднородность включений (КЛБ); 1' – неоднородность включений (ТБ); 2 – прочность контактной зоны (КЛБ); 2' – прочность контактной зоны (ТБ); 3 – ширина контактной зоны (КЛБ); 4 – коэффициент формы зерен (КЛБ); 5 – размер включений (КЛБ); 6 – размер пор (КЛБ); 6' – размер пор (ТБ); 7 – количество пор (КЛБ)

Fig. 6. Influence of the macrostructure parameters (n) of structural lightweight aggregate concrete (SLAC) and normal weight concrete (NWC) on the strength (q) under axial compression – according to the results of numerical experiments on the SIM model: 1 – inhomogeneity of inclusions (SLAC); 1' – inhomogeneity of inclusions (NWC); 2 – contact zone strength (SLAC); 2' – contact zone strength (NWC); 3 – width of the contact zone (SLAC); 4 – the coefficient of the grains forms (SLAC); 5 – inclusions size (SLAC); 6 – pores size (SLAC); 6' – pores size (NWC); 7 – number of pores (SLAC)

crete) on the strength under axial compression (Fig. 6) the following basic conditions for its formation as optimal from the point of view of concrete strength are formulated (listed in order of the influence degree). Those conditions, in essence, determine the following basics of technological techniques for high-strength structural lightweight aggregate concrete production, set out below:

– ensuring the strong (not less than the strength of the components) contact of the concrete hardened mortar matrix with the inclusions (grains of coarse aggregate);

– improvement of the concrete components (mortar part – the concrete matrix and the aggregates grains) pore structure in the direction of reducing the pores size and their number (porosity); as shown by the results of the researches carried out by the author of this article in NIISF, this condition is provided in large part by such the effective technological technique as the use of its structure modifier in the producing of high-strength lightweight aggregate concrete [17], contributing to the transformation of the concrete large-porous structure into the fine-porous structure with a uniform pores distribution by volume;

– providing the uniformity of inclusions, which are understood here as grains of the cporous aggregate; in the considered case – uniformity by the value of the elastic modulus of the grain.



Рис. 7. Здание «Scotia Plaza Tower» (69 этажей, 276 м) в финансовом районе г. Торонто (Канада). Перекрытия высокой огнестойкости (класс K_0 при $\tau_{огн}=2$ ч) выполнены из монолитного легкого бетона класса по прочности LC30–LC40 марки по плотности D1800–D1900 на основе пористого шлакового гравия (pelletized slag) с использованием шлаковых цементах (типа «blended cements»-ASTM, 1990 г.)

Fig. 7. The Scotia Plaza Tower (69 floors, 276 m) in the financial district of Toronto (Canada). The floor slabs of high fire resistance (class K_0 at $\tau_{fire}=2$ hours) are made of monolith lightweight aggregate concrete of strength class LC30–LC40 of density grade D1800–D1900 based on porous slag gravel (pelletized slag) with the use of slag cements (type «blended cements»-ASTM, 1990

ния «Scotia Plaza Tower» (69 этажей, 276 м) в финансовом районе г. Торонто (Канада) (рис. 7).

С помощью прибора-микротвердомера ПМТ-3 с алмазной пирамидкой автором статьи [6] были определены значения микронапряжений в зоне контакта зерна крупного пористого заполнителя с затвердевшей растворной частью бетона H_{μ}^{K3} и непосредственно в цементно-песчаном камне H_{μ}^{CK} – растворной части между зернами крупного заполнителя.

Максимальная величина микротвердости установлена в контактной зоне H_{μ}^{K3} , что обусловлено следующим характерным для КЛБ технологическим условием: $V_{ист}/Ц < V_3/Ц$, где $V_{ист}=V_0-V_3$ (V_0 – общая вода затворения бетонной смеси; V_3 – вода, поглощенная зерном пористого заполнителя в процессе приготовления смеси, которая в процессе твердения бетона

Based on the above, it is easy to understand that normal weight concrete should significantly lose to equal-strength structural lightweight aggregate concrete due to the difficulties of forming the optimal macro- and micro-structures. First of all, this applies to such an important parameter of concrete macrostructure as *the contact zone of the coarse aggregate with the mortar part of concrete*, which largely determines its strength, frost resistance and water resistance.

The above results of computational experiments using the SIM-model for determining the conditions for the formation of the optimal from the positions of high strength and high durability (frost resistance and water resistance) macrostructure of the equal-strength lightweight aggregate concrete and normal weight concrete showing significant advantages of the first, confirmed by the results of relevant experimental studies performed in the laboratories of lightweight aggregate concretes and structures in NIIZHB, and then in NIISF (the head of both – the author of this article).

Thus, the contact zone was studied on SLAC specimens of the LC45 compressive strength class which were made with use of two types of the porous aggregates: high-strength expanded clay gravel of the “Novocheboksarsky House-building Plant” and porous slag gravel (PSG) with the vitrified shell, produced in the slag processing workshop of the “Novolipetsk Metallurgical plant” according to the technology developed by the author of this article and presented at the *fib* Symposium in Sandefjord in 1995 [6].

Structural lightweight aggregate concretes of LC30–LC40 classes on the porous gravel with the vitrified shell, manufactured according to the above-mentioned this article author’s technology, were used in the construction of the office building “Scotia Plaza Tower” (69 floors, 276 m) in the financial district of Toronto (Canada) (Fig. 7).

Using microhardness device PMT-3 with a diamond pyramid there were determined the values of micro-stresses in the contact zone of the porous aggregate grain with the hardened mortar part of concrete H_{μ}^{CZ} and directly in the hardened cement-sand paste H_{μ}^{CP} – mortar part between the coarse aggregate grains. The maximum value of the microhardness is set in the contact zone H_{μ}^{CZ} , which is due to the following characteristic for SLAC technological condition: $V_{true}/C < V_a/C$, where $V_{true}=V_0-V_a$ (V_0 – water required for the preparation of concrete mix, V_a – the water absorbed by the porous aggregate grain during the production of the concrete mixture). During the hardening of the concrete mix absorbed water V_a migrates back to the mortar part and thereby contributes to favorable conditions for further hardening of the concrete and the formation of its fine-pored structure.

In the conducted experimental studies, the averaged values of H_{μ}^{CZ} were 1580 kNs/mm² for lightweight aggregate concrete with use of PSG, 1255 kNs/mm² – for expanded clay concrete, and the averaged values of H_{μ}^{CP} were 860 and 880 kNs/mm², respectively. Thus, the value of the ratio $H_{\mu}^{CZ}/H_{\mu}^{CP}$ is higher by more than 25% for concrete

мигрирует обратно в растворную часть и тем самым способствует благоприятным условиям дальнейшего формирования мелкопористой структуры бетона).

Осредненные значения $H_{\mu}^{к3}$ составили в проведенных экспериментальных исследованиях для легкого бетона на ПШГ – 1580 кНс/мм², для керамзитобетона – 1255 кНс/мм², а осредненные значения $H_{\mu}^{пк}$ – соответственно 860 и 880 кНс/мм². Таким образом, величина отношения $H_{\mu}^{к3}/H_{\mu}^{пк}$ выше более чем на 25% у бетона на пористом шлаковом гравии в сравнении с традиционным керамзитобетоном.

Последнее определяется следующими процессами и условиями образования и сохранения плотной и прочной контактной зоны в легком бетоне на пористых заполнителях из металлургических шлаков, в частности доменного производства:

а) гидратация минералов шлака (мелилита и др.) стекловидной оболочки зерна ПШГ в присутствии сильного активатора (цементного клинкера) – образование высокопрочных гидрогранатов и гидросиликатов кальция $C_2SH(A)$ и $CSH(B)$;

б) преимущественное содержание в оболочке зерна ПШГ шлаковых стекол наиболее гидравлически активной изотропной разновидности системы $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-Fe_2O_3$;

в) близость значений модулей упругости и коэффициентов линейного температурного расширения компонентов бетона, определяемая близостью значений минералогического состава цементного камня и доменного шлака, из расплавов которого производится пористый заполнитель.

Указанными характеристиками контактной зоны зерен пористых заполнителей (особенно шлаковых) с растворной частью КЛБ и обусловлены существенные преимущества в показателях и водонепроницаемости и морозостойкости конструкционных легких бетонов, в том числе высокопрочных, в сравнении с равнопрочными тяжелыми бетонами на природных плотных заполнителях. Что касается преимущества в морозостойкости КЛБ в сравнении с равнопрочным тяжелым бетоном, то оно обусловлено, как показано в работах научной школы проф. В.М. Москвина и др. [18–20], дополнительно наличием буферной зоны (поровой структуры заполнителя), которая в значительной степени может снижать эффект развития гидравлического давления в порах-капиллярах растворной части бетона при фазовом переходе в лед содержащейся в них воды, сопровождающемся, как известно [18], перестройкой молекул воды с увеличением в объеме.

На конечном этапе работы определяли с использованием метода ультразвуковых волн, распространяющихся по поперечной и продольной плоскостям в разных сечениях опытных образцов бетонных призм, нижнюю R_t^o и верхнюю R_t^v границы областей микротрещинообразования конструкционного легкого бетона класса по прочности при сжатии до В45 включительно. При этом для изготовления КЛБ использовали различные виды заполнителей: керамзи-

with porous slag gravel in comparison with traditional SLAC with use of the expanded clay gravel.

The latter is defined by the following processes and conditions of formation and preservation of the dense and durable contact zone in the lightweight concrete on porous aggregates from metallurgical slag, in particular the blast furnace slag:

a) hydration of vitreous shell slag minerals (melilite etc.) of the PSG grain in the presence of the strong activator (cement clinker) – formation of high strength hydrogranates and calcium hydrosilicates $C_2SH(A)$ and $CSH(B)$;

b) predominant content in the PSG grain shell slag glasses of the most hydraulically active isotropic varieties of the system $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-Fe_2O_3$;

c) the proximity of the elastic modulus and coefficients of linear thermal expansion values of the concrete components, determined by the closeness of the values of the mineralogical composition of cement and blast furnace slag from melts of which the porous aggregate is produced.

These characteristics of the porous aggregates (especially slag gravel) with the mortar part of the SLAC contact zone are due to the significant advantages in terms of both water resistance and corrosion resistance of the SLAC, including high-strength ones, in comparison with equally-strength normal weight concretes with the natural dense aggregates. As for the advantage in frost resistance of SLAC in comparison with equal-strength normal weight concrete, it is due to, as it is shown in the works of the scientific school of Prof. V.M. Moskvina and others [18–20], the presence of a buffer zone (the pore structure of the aggregate), which can significantly reduce the effect of the hydraulic pressure development in the capillary pores of the concrete mortar part during the phase transition of the water contained in them to ice. It is, as known, accompanied by the rearrangement of water molecules with the increasing in volume.

At the final stage of the work, using the method of ultrasonic waves propagating along the transverse and longitudinal planes in different cross-sections of the concrete prisms prototypes, the lower R_t^o and upper R_t^v boundaries of the micro-cracking areas of the structural lightweight aggregate concrete with the compressive strength classes up to LC45 were determined. At the same time, various types of aggregates were used for the production of SLAC: expanded clay gravel with porous sand (in one version) and with a dense sand (in the other), on porous slag gravel with a vitrified shell (slag-glass granulate gravel) and quartz sand, on fly-ash gravel and quartz sand. For comparison, the boundaries of the microcracking areas of equal-strength normal weight concrete were determined.

It is established that the values of the stress levels that determine these areas for SLAC are: R_t^o/R_{pr} – from 0.34 to 0.5; R_t^v/R_{pr} – from 0.82 to 0.89, raising with compressive strength of concrete increasing. All these values are significantly higher than for the equal-strength normal weight concrete, which corresponds to the appropriate state of the contact zone of equal-strength lightweight aggregate concrete and normal weight concrete [20–21].

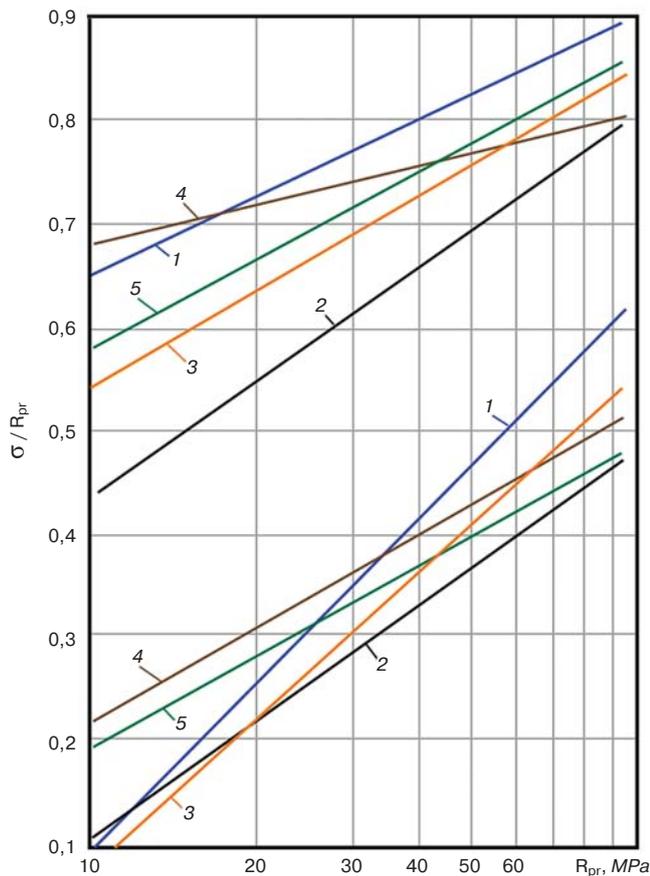


Рис. 8. Нижняя (R_t^0/R_{pr}) и верхняя (R_t^V/R_{pr}) границы области микротрещинообразования конструкционного легкого бетона, изготовленного на пористых заполнителях различных видов, в зависимости от его призмочной прочности (R_{pr}), в сравнении с равнопрочным тяжелым бетоном: 1 – бетон на шлакостеклогрануляте и кварцевом песке; 2 – тяжелый бетон на природных плотных заполнителях; 3 – керамзитобетон на пористом песке; 4 – керамзитобетон на кварцевом песке; 5 – бетон на безобжиговом зольном гравии и кварцевом песке

Fig. 8. The lower (R_t^0/R_{pr}) and upper (R_t^V/R_{pr}) boundaries of microcracks formation of structural lightweight aggregate concrete with porous aggregates of different types, depending on its prism strength (R_{pr}), compared to equal-strength normal weight concrete: 1 – concrete with slag-glass granulate gravel and quartz sand; 2 – normal weight concrete with natural dense aggregates; 3 – expanded clay gravel concrete on porous sand; 4 – expanded clay gravel concrete on quartz sand; 5 – fly-ash gravel concrete and quartz sand

товый гравий с пористым (в одном варианте) и с плотным (в другом) песками, на пористом шлаковом гравии с остеклованной оболочкой (шлакостеклогрануляте) и кварцевом песке, на безобжиговом зольном гравии и кварцевом песке. Для сравнения определялись границы области микротрещинообразования равнопрочных тяжелых бетонов.

Установлено, что величины уровней напряжений, определяющих эти области для КЛБ, составляют: R_t^0/R_{pr} – от 0,34 до 0,5; R_t^V/R_{pr} – от 0,82 до 0,89, повышаясь с увеличением прочности бетона при сжатии. Все эти значения существенно выше, чем для равнопрочного тяжелого бетона, что коррелируется с соответствующим состоянием контактной зоны равнопрочных легкого и тяжелого бетонов [20–21].

Наибольшие величины уровней напряжений R_t^0/R_{pr} и R_t^V/R_{pr} установлены при использовании в легком бетоне в качестве заполнителя шлакостеклогранулята (рис. 8). Последнее хорошо коррелируется

The highest values of the stress levels of R_t^0/R_{pr} and R_t^V/R_{pr} are established when using slag-glass granulated gravel as an aggregate in lightweight concrete (Fig. 8). The latter corresponds well with the above-mentioned results of studies of the SLAC contact zone on porous aggregates of various types. It is established that these characteristics for SLAC with slag-glass granulated gravel are approximated by the equations:

$$R_t^0/R_{pr} = 0,525 \lg R_{pr} - 0,327;$$

$$R_t^V/R_{pr} = 0,239 \lg R_{pr} + 0,517.$$

The joint analysis of the dependence graphs of the axial compression stress levels σ/R_{pr} , corresponding to the lower and upper boundaries of the microcracks formation areas on the prismatic strength value R_{pr} shows, that in contrast to normal weight concrete, structural lightweight aggregate concretes have the less pronounced lower area of the microcracks formation area R_t^0 . This is especially true for the structural lightweight aggregate concrete with the slag-glass granulated gravel and the corresponding porous fine aggregate. Here, this boundary is somewhat blurred in the stress range from 0.2 to 0.4 R_{pr} . This is quite understandable, taking into account:

- firstly, that the contact zone strength of this type of concrete is significantly higher than that the lightweight aggregate concretes with use of other types of aggregates;
- secondly, that the lower boundary determines, as it's known, the level of the stresses, corresponding to the development of partially reversible microcracks, and the upper boundary – already irreversible microcracks, which with an increasing of the loading level σ/R_{pr} are merging into the main crack, that leads to the concrete destruction.

As it can be seen from fig. 8, the stress levels of R_t^0/R_{pr} and R_t^V/R_{pr} , as well as for other types of concrete, exceed the corresponding characteristics of the equal-strength lightweight aggregate concrete by 15–30%, especially at the high values of R_{pr} . This corresponds to the significant advantage of the lightweight aggregate concretes (especially produced on the slag-glass granulate gravel base) in the strength of the contact zone compared to the equally strong normal weight concretes with the use of natural dense aggregates.

Below it is given the bridge with the cable-stayed span structure of the support structure with the use of high supports structures across the deep gorge in Ikuno (Japan) with the general design scheme of the bridge (Fig. 9).

Further, reports on the reconstruction of the bridges are of some interest. For example, the report on the reconstruction of the Aso Choyo-Ohashi four-span bridge, damaged by the 7-magnitude earthquake in Kumamoto (Japan) in 2016 (Fig. 10, 11).

Serious damage to the Aso Choyo-Ohashi Bridge due to the subsidence of the supports: the appearance of cracks and delaminations in the concrete of the support structures and their destruction, the appearance of cracks on the surfaces of the boxed reinforced concrete beam were reported. The bridge was completely restored in during one year and 4 months and put into operation 27.08.2017.

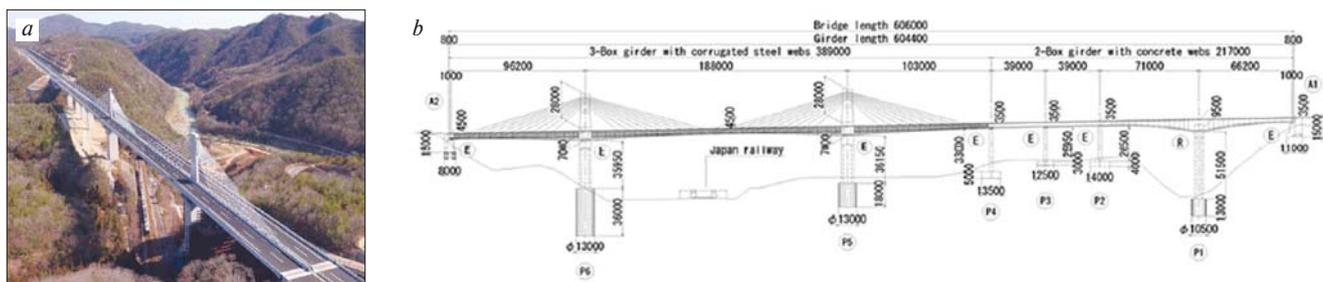


Рис. 9. Мост Ikuno Bridge (Япония) вантовой конструкции через глубокое ущелье (а) и расчетная схема моста (b)
 Fig. 9. Ikuno Bridge (Japan) cable-stayed structure over the deep gorge (a) and the design scheme of the bridge (b)

руется с вышеизложенными результатами исследований контактной зоны КЛБ на пористых заполнителях различных видов. Установлено, что эти характеристики для КЛБ на шлакопесткогрануляте аппроксимируются уравнениями:

$$R_t^0/R_{pp} = 0,525 \lg R_{pp} - 0,327;$$

$$R_t^y/R_{pp} = 0,239 \lg R_{pp} + 0,517.$$

Совместный анализ графиков зависимостей уровня напряжений осевого сжатия σ/R_{pp} , соответствующих нижней и верхней границам области микротрещинообразования, от величины призмочной прочности R_{pp} показал, что в отличие от тяжелого бетона конструкционные легкие бетоны имеют менее выраженную нижнюю границу области микротрещинообразования R_t^0 . Особенно это относится к конструкционному легкому бетону на шлакопесткогрануляте и соответствующем пористом мелком заполнителе. Здесь эта граница как бы несколько размывта в области напряжений от 0,2 до 0,4 R_{pp} . Это вполне объяснимо, учитывая:

– во-первых, прочность контактной зоны этого вида бетона существенно выше, чем для легких бетонов на других видах заполнителей;

– во-вторых, нижняя граница определяет, как известно, уровень напряжений, соответствующих развитию частично обратимых микротрещин, а верхняя граница – уже необратимых микротрещин, которые при повышении уровня нагружения σ/R_{pp} сливаются в магистральную трещину, что и приводит к разрушению бетона.

Как видно из рис. 8, уровни напряжений R_t^0/R_{pp} и R_t^y/R_{pp} , так же как и для других видов бетонов, превышают соответствующие характеристики равнопрочного тяжелого бетона на 15–30%, особенно при высоких значениях R_{pp} . Это коррелируется со значительным преимуществом легких бетонов (особенно на основе шлакопесткогранулята) в прочности контактной зоны по сравнению с равнопрочными тяжелыми бетонами на природных плотных заполнителях.

Ниже приведен мост с вантовой конструкцией поддержки легкобетонного пролетного строения с использованием высоких опор через глубокое ущелье в Икуно (Япония) с общей расчетной схема моста (рис. 9).

In connection with the above reviewed articles on unique examples of the bridges building and reconstruction, the results of the researches were presented in the article of Yuanbo Liang, Chengqi Wang of the influence of ultrafine quartz powder on the properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC) are used in reinforced concrete structures of the bridge spans. In connection with the development of the long-span bridges building, more and more attention is paid to the UHPC due to its ultra-high strength and durability. The performed researches showed: when replacing a part of the cement with an equal amount of ultrafine quartz powder, its positive effect on the workability, uniformity and mechanical properties of UHPC was observed. At a UHPC steam curing temperature of about 100°C and the humidity above 90%, in addition to ensuring of aggregate grains tight packing in the concrete, some part of the ultrafine quartz powder can it can enter into a chemical reaction with the cement minerals, contributing to the increasing in the bond strength between the UHPC components, and thereby further improving the mechanical properties of the UHPC. When the content of ultrafine quartz powder was 10–15% of the cement part in the concrete mixture, the prepared concrete mixture had a slump of 270 mm, the flow – of about 680 mm, and a viscosity value of 2700 to 3100 MPa·s, meeting the requirements for pumping of the mixture by the concrete pump. UHPC had a fairly high uniformity of structure, and the distribution of steel fibers in the concrete was uniform, which ensured the overall high quality of the concrete structure. The produced UHPC was characterized by the compressive strength of more than 180 MPa and the ending strength of more than 28 MPa at the 28 days of normal-humidity curing, which more than satisfied to the general requirements for the concrete of a long-span bridge reinforced concrete structures.

The report-article of the *President of fib Tor Ole Olsen “Important duties of marine concrete structures”* deserves special attention. The author of the article suggests using the process of so-called “conceptual design” in relation to the structures made of concrete and reinforced concrete for the marine engineering constructions.

The process of the marine engineering structures conceptual design provides for the fact that the main large-scale elements of their structural system are manufactured

Далее представляют определенный интерес доклады о работах по восстановлению и реконструкции мостов, например доклад о работе по восстановлению четырехпролетного моста Асо Чойо Охаси, поврежденного семибалльным землетрясением в Кумамото (Япония) в 2016 г. (рис. 10, 11).

Сообщалось о серьезных повреждениях моста Асо Чойо Охаси в результате просадки опор: появлении трещин и расслоений в бетоне опорных конструкций и их разрушении, появлении трещин в бетоне коробчатой железобетонной балки. Мост был полностью восстановлен за 1 год 4 мес и введен в эксплуатацию 27.08.2017 г.

В связи с вышерассмотренными статьями по уникальным примерам строительства и реконструкции мостов представляют определенный интерес результаты исследований, изложенных в статье Yuanbo Liang, Chengqi Wang [3] по влиянию ультрадисперсного кварцевого порошка на свойства бетона Ultra High Performance Concrete (UHPC), используемого в железобетонных конструкциях пролетного строения моста. В связи с развитием строительства длиннопролетных мостов все большее внимание уделяется бетону такого вида УНРС в связи с его сверхвысокими показателями прочности и долговечности.

Выполненные исследования показали, что при замене части цемента равным количеством ультрадисперсного кварцевого порошка наблюдалось положительное влияние его на обрабатываемость, однородность и механические свойства УНРС. При температуре пропаривания УНРС около 100°C и относительной влажности выше 90%, помимо обеспечения плотной упаковки зерен заполнителей в бетоне, часть ультрадисперсного кварцевого порошка может вступать в химическую реакцию с минералами цемента, способствуя повышению прочности связи между компонентами УНРС и тем самым еще больше повышая механические свойства УНРС. Когда содержание ультрадисперсного кварцевого порошка составляло 10–15% от части цемента в смеси, приготовленная бетонная смесь имела осадку конуса 270 мм, расплыв — около 680 мм, а значение вязкости от 2700 до 3100 мПа·с, отвечающее требованиям по перекачке смеси с помощью бетононасоса. УНРС обладал довольно высокой



Рис. 10. Вид на мост Асо Чойо Охаси во время его восстановления после землетрясения
Fig. 10. View of the Aso Choyo-Ohashi Bridge during its reconstruction after the earthquake



Рис. 11. Строительные леса и сооружение для подъема техники на высоту моста (а); завершённая работа по восстановлению опоры моста (б)
Fig. 11. Scaffolding and lifting facility to the height of the bridge (a); completed work on the restoration of the bridge support (b)

at the building site in the coastal zone, for example — in a dry dock (see below) and then sent afloat for the assembly at the site of the marine engineering structure planned operation place, in particular, the offshore platform for the oil extraction. This process is described in sufficient detailed, including methods for constructing various design schemes of structural systems of marine engineering constructions, which take into account, first of all, the problem of their significant.

The Conceptual design is very important process from the point of view of the necessity to ensure the durability of structures and reliability in the operation of such engineering structures of various sizes and functions: from the Gullfaks oil production platform with a mass of 1.5 million tons, which accommodates a huge plant and is exposed to 30-meter waves, to a small bucket for salmon breeding in the closed environment, in the fjord protected from the of sea waves (Fig. 12).

Construction systems of the marine platforms for oil extraction are rarely built at their final location for the obvious reasons. Small composite structures of offshore

однородностью структуры, а распределение волокон стальной фибры в бетоне было равномерным, что обеспечивало общее высокое качество бетонной конструкции. Полученный УНРС характеризовался прочностью при сжатии более 180 МПа и прочностью при изгибе более 28 МПа в возрасте 28 сут нормально-влажностного твердения, что более чем соответствовало общим требованиям к бетону железобетонных конструкций длиннопролетного строения моста.

Заслуживает отдельного внимания доклад-статья президента *fib* Tor Ole Olsen «Important duties

of marine concrete structures» (Важные функции бетонных конструкций морских инженерных сооружений). Автор статьи предлагает использовать применительно к конструкциям из бетона и железобетона морских инженерных сооружений процесс так называемого *концептуального проектирования*.

Процесс концептуального проектирования морских инженерных сооружений предусматривает тот момент, что основные крупноразмерные фрагменты их конструктивной системы изготавливаются на строительной площадке прибрежной зоны, например в сухом доке (см. ниже), и далее направляются на плаву для сборки на месте запланированной эксплуатации морского инженерного сооружения, в частности морской платформы для добычи нефти. Этот процесс описан достаточно подробно, включая методы построения различных расчетных схем конструктивных систем морских инженерных сооружений, в которых учитываются прежде всего проблема их значительной массы.

Концептуальное проектирование — очень важный процесс с позиции необходимости обеспечения долговечности конструкций и надежности в эксплуатации таких инженерных сооружений различных размеров и функций, от платформы для добычи нефти «Gullfaks» массой 1,5 млн т, вмещающей огромный завод и подвергающейся воздействию 30-метровых волн, до небольшого ковша для разведения лосося в закрытой среде, в защищенном от воздействия морских волн фьорде (рис. 12).

Конструктивные системы морских платформ для добычи нефти редко строятся в своем конечном местоположении по понятным причинам. Небольшие составные конструкции морских платформ могут быть построены в прибрежной зоне, затем подняты для флотирования к месту строительства и эксплуатации платформы с помощью морского передвижного крана. Наиболее крупные составные части морских платформ могут быть построены в сухом доке и спущены в морские баржи для доставки на место эксплуатации морских платформ для добычи



Рис. 12. Платформа для добычи нефти «Gullfaks» массой 1,5 млн т. Надводная часть платформы и завод с системой мощных насосов для перекачки нефти построена в норвежском порту Stavanger и затем флотирована к месту строительства платформы «Gullfaks oil field» в Норвежском море

Fig. 12. The Gullfaks oil extraction platform with mass of 1.5 million tons. The surface part of the platform with the plant equipped with the system for the oil pumping is built in the Norwegian port of Stavanger and then floated to the building site of the “Gullfaks oil field” platform in the Norwegian Sea

platforms can be built in the coastal area, then lifted for floating to the construction site and operating the platform using an offshore mobile crane. The largest components of offshore platforms can be built in a dry dock and lowered into offshore barges for delivery to the site of operation of offshore platforms for oil production. The most common way of the large components of the offshore platforms building is in the dry dock intended for the construction of the marine vessels.

Fig. 13 shows the so-called “Condeep platforms” for oil extraction, the main part of the structural system of which is built in dry docks.

Condeep is an abbreviation for a concrete deep-water structure. A condeep typically consists of a base of concrete oil storage tanks, from which one, three, or four concrete shafts rise. The Condeep base always rests on the sea floor, and the mines rise about 30 meters above sea level.

At the stage of *conceptual design of the offshore platforms* for oil extraction, it was possible to solve the issues of the most important designing situations, taking into account the fact that detailed design and their construction can occur simultaneously. The well-prepared and generally accepted design specification is a prerequisite for the proper conceptual design. The important input material in the addition to the construction method is the power load. Data about the marine environment surrounding the platform should be obtained as input data for an appropriate hydrodynamic analysis, which determines the load on the considered construction from the effects of sea waves.

Fig. 14 shows the “Troll A” condeep platform, carrying 22 thousand tons of the cargo with technological facilities mounted on it, and, above all, with the plant for the extraction and shipment of oil to ship carriers.

As for the construction and operation of the platforms for oil production in the Northern Tidal Seas and the seas of the Far East, this problem (its state and prospects for solving it) are covered in the commissioned article of the Far Eastern Federal University of the Russian Federation, published in the journal “Bulletin of the DVFU Engineering School” [21].

нефти. Самый распространенный способ строительства крупных составных частей морских платформ – в сухом доке, предназначенном для строительства морских судов.

На рис. 13 показаны так называемые Condeep platforms (кондип-платформы для добычи нефти), основная часть конструктивной системы которых построена в сухих доках.

Condeep – это словообразование от «бетонного глубоководного сооружения». Condeep обычно состоит из основания бетонных резервуаров для хранения нефти, из которых поднимаются одна, три или четыре бетонные шахты. База Condeep всегда опирается на морское дно, а шахты возвышаются примерно на 30 м над уровнем моря.

На этапе *концептуального проектирования* морских платформ для добычи нефти удалось решить вопросы наиболее важных проектных ситуаций с учетом того, что детальное проектирование и их строительство могут происходить одновременно. Хорошо подготовленная и общепринятая проектная спецификация является обязательным условием для правильного концептуального проектирования. Важным входным материалом в дополнение к методу строительства является силовая нагрузка. Данные об окружающей платформу морской среде должны быть получены в качестве входных данных для соответствующего гидродинамического анализа, по результатам которого определяется нагрузка на рассматриваемое сооружение от воздействия морских волн.

На рис. 14 показана кондип-платформа «Troll A», несущая 22 тыс. т груза со смонтированными на ней технологическими сооружениями, и прежде всего заводом по добыче и отгрузке нефти в судовозы.

Что касается строительства и эксплуатации платформ для добычи нефти в Северных приливных морях и морях Дальнего Востока РФ, то эта проблема (состояние ее и перспектива решения) освещена в заказной (НИИСФу) статье Дальневосточного Федерального университета РФ, опубликованной в журнале «Вестник Инженерной школы ДВФУ» [21].

Гражданское строительство:

В зарубежных странах, в частности в странах Европы и США:

– используются высокопрочные конструкционные легкие бетоны (класс по прочности на сжатие LC45–LC60) в различных уникальных сооружениях, таких как, например, складчатые оболочечные покрытия таких зданий, как, например, здание «Assembly Hall» Иллинойского университета (рис. 15);

– *возводятся высотные здания, причем в последние десятилетия в отличие от практики строительства в России, учитывая требования сохранения здоровья граждан и комфортности проживания, преимущественно только офисного назначения.*



Рис. 13. Выстроенная в Северном море линия кондип-платформ для добычи нефти (1975–1995). Проект д-ра техн. наук Olav Olsen

Fig. 13. Line-up of the Condeep platforms installed in the North Sea (1975–1995) – Doctor of technical sciences, Prof. Tor Ole Olsen

As for civil engineering:

In foreign countries, in particular in Europe and the United States:

– structural lightweight aggregate concretes (class of compressive strength LC45–LC60) are used in various unique structures, such as, for example, the folded shell coverings of buildings such as the “Assembly Hall” building of the University of Illinois (Fig. 15);



Рис. 14. Кондип-платформа «Troll A»

Fig. 14. The «Troll A» Condeep platform



Рис. 15. Складчатое оболочечное покрытие здания «Assembly Hall» Иллинойского университета. 24 изогнутых сегментных пластины из легкого бетона класса LC20 на заполнителях из вспученных глинистых сланцев (lyonit) марки по средней плотности D1700 связаны предварительно напряженной кольцевой балкой (внешний диаметр 122 м, внутренний – 6,5 м)

Fig. 15. Folded shell covering of the University of Illinois building «Assembly Hall». 24 curved segment plates made of light concrete of the LC20 class on the aggregates made of expanded clay shale (lyonit), grade of the average density D1700, are connected by the prestressed annular beam (outer diameter 122 m, inner diameter 6.5 m)

В [1] только в одной статье рассматривается возведение высотного здания офисного назначения. При этом заслуживает внимания технология возведения этого здания, а именно: в отличие от отечественной практики, где высотные здания строятся преимущественно с конструктивной системой из монолитного бетона, в данном случае используется технология конструктивной схемы здания со сборными конструкциями этажа [22]. Они изготавливаются на специальной строительной площадке с доставкой их на место возведения здания с последующим подъемом на этаж (рис. 16). При этом *срок окончания возведения этажа не превышает трех дней*. Таким образом, кроме сокращения сроков возведения здания повышается качественный уровень их конструктивной схемы, надежность в эксплуатации.

Среди *секционных докладов по инновационным технологиям* в области бетоноведения, укладки бетонных смесей в опалубку конструкций представляют интерес:

- технология в статье «Effect of the ultrafine quartz powder on UHPC properties of steel-concrete composite bridge deck» [1, с. 46] применения в элементах пролетных строений мостов высокопрочного мелкозернистого бетона с прочностью при сжатии R_{28c} более 150 МПа, изготовленного по «порошковой технологии» с использованием высокодисперсного кварцевого песка;
- моделирование с использованием метода конечных элементов для технологии 3D-печати элементов сборных бетонных конструкций (рис. 17) в [23].

На секции симпозиума *fib* «Долговечность и надежность строительных конструкций в эксплуатации» доложен ряд работ, посвященных вопросам коррозионной стойкости бетонов конструкций инженерных сооружений в различных условиях службы. Это вопросы стойкости бетонов различных видов и модификаций к проникновению в структуру их пор и капилляров ионов хлоридов, сульфидов, а также магнезиальных солей, в частности морской среды [24, 25].

Далее можно отметить изданную в сборнике трудов симпозиума [2] весьма актуальную для развития

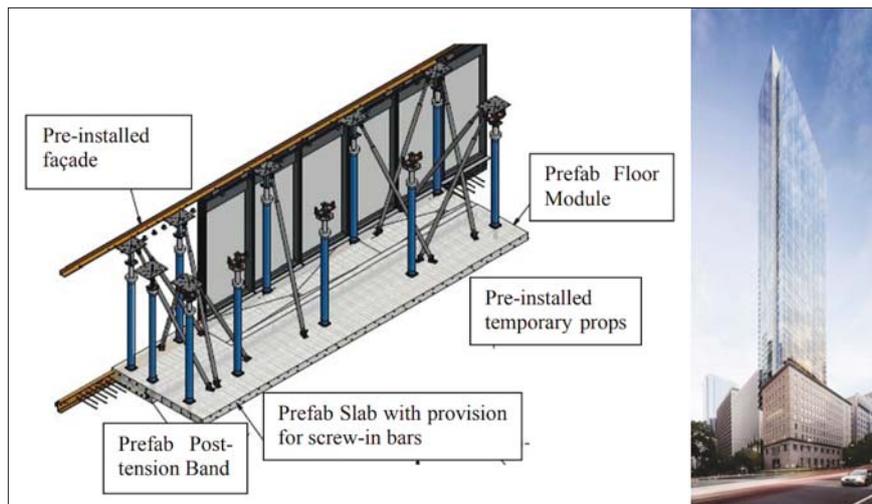


Рис. 16. Сборный модуль высотного 58-этажного офисного здания «High Collins» (Австралия) и общий вид возведенного здания [22]

Fig. 16. Prefabricated module of the 58-storey high-rise office building «High Collins» (Australia) and a general view of the erected building [22]

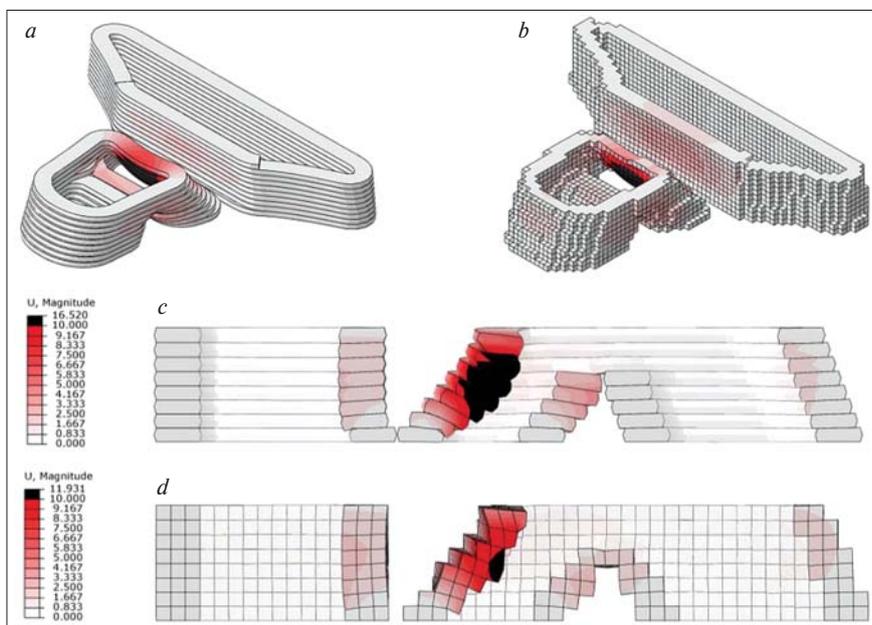


Рис. 17. Результаты численного моделирования для технологии формирования элементов бетонных конструкций методом 3D-печати со скоростью 80 мм/с: а, с – печать «CobraPrint»; б, д – печать «VoxelPrint»

Fig. 17. Results of the numerical simulation for the technology of concrete structures elements forming by 3D printing method at a speed of 80 mm/s: а, с – «CobraPrint» printing; б, д – «VoxelPrint» printing

– *high-rise buildings are being built, and in recent decades, in contrast to the practice of building in Russia, taking into account the requirements of preserving the health of citizens and the comfort of living – mainly only for office purposes.*

In the [1] the construction of the high-rise office building is considered only in one article. At the same time, the technology of construction of this building deserves attention, namely: in contrast to the domestic practice, where high-rise buildings are built mainly with a structural system of monolithic concrete, in this case, the technology of the structural scheme of the building with prefabricated storey structures is used [22]. They are man-

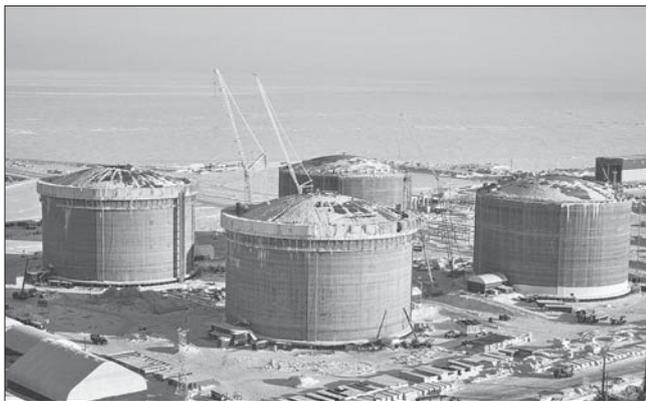


Рис. 18. Железобетонные резервуары для хранения сжиженного природного газа «Ямал СПГ» и для дальнейшей погрузки на плавучий терминал для транспортирования к судовозам, направляющимся по Северному морскому пути в Китай

Fig. 18. Reinforced concrete tanks for storage of “Yamal SPG” liquefied natural gas and for further loading in the floating terminal and transportation to ships heading along the Northern Sea Route to China

энергетического строительства разработку НИИСФ РААСН, первоначально посвященную физико-химическим основам стойкости бетонов соответствующих модификаций к воздействию сверхнизких (до минус -196°C) криогенных температур. Эта разработка использована, по существу, как научная база для создания бетонов модифицированной структуры, предназначенных прежде всего для проектирования конструкций и строительства железобетонных резервуаров для хранения природных газов с технологической температурой в сжиженном состоянии до -196°C в прибрежной Арктической зоне России, территориально г. Мурманск и полуостров Ямал (рис. 18).

Высокий научный уровень этой разработки подтверждает тот факт, что она доложена, получила одобрение научного комитета организованной Итальянским отделением Американского института бетона (ACI) Международной конференции по долговечности и стойкости бетонных конструкций. Опубликовано в Трудах American Concrete Institute «SP-326. Durability and Sustainability of Concrete Structures – 2nd Workshop Proceedings» [26].

Резюме

Подводя итоги рассмотрения докладов, опубликованных в [1], следует отметить выдающиеся достижения ученых различных стран, и прежде всего Китая, Японии, стран Западной Европы, США, в области научных разработок в вопросах технологий строительства, реконструкции и проектирования инженерных сооружений следующих видов:

- мосты длиной до 52 км с подводными туннелями в морских проливах (Китай), мосты через глубокие ущелья в горах (Япония), инновационные технологии восстановления мостов после землетрясений (Япония), технологии реконструкции мостов, например уширения пролетной части (Китай);

- мосты во фьордах Норвегии с конструкциями и опор при использовании в

уфактурованном на специальном строительном участке и доставленном к месту возведения здания, за которым последовало поднятие на этаж (рис. 16). В этом случае, время для завершения строительства этажа не превышает 3 дней. Таким образом, помимо сокращения времени строительства здания, качество уровня их проектной схемы и надежности в эксплуатации увеличилось.

Как для *презентаций инновационных технологий* в области науки о бетоне и укладки готовой бетонной смеси в конструкции опалубки следующие являются интересными:

- технология, обсужденная в статье «Влияние ультрамелкого кварцевого порошка на свойства УВБС композитной стальной бетонной конструкции мостового пролета» [1, с. 46] использование высокопрочного мелкозернистого бетона с прочностью R_{28d} более 180 MPa , изготовленного по «технологии порошка» с использованием ультрамелкого кварцевого песка в элементах пролетов мостов;

- моделирование с помощью метода конечных элементов для 3D-печати элементов сборных бетонных конструкций (рис. 17). в статье бельгийских ученых [23].

На *симпозиуме* «Структурная долговечность и надежность», ряд работ о коррозионной стойкости бетонных конструкций в различных условиях эксплуатации были представлены. Это вопросы бетонов различных типов и модификаций к проникновению ионов хлоридов, сульфидов, солей магния и др., в частности, в морской среде, в структуру их пор и капилляров [24, 25].

Дальше работы НИИСФ РААСН, опубликованные в Труды симпозиума [2] следует отметить. Это очень актуально для развития энергетики и было посвящено физико-химическим основам бетонов с соответствующими модификациями к воздействию сверхнизких (до -196°C) криогенных температур. Это развитие используется, по существу, как научная база для создания модифицированной структуры, предназначенной прежде всего для проектирования и строительства железобетонных резервуаров для хранения сжиженного природного газа с технологической температурой до -196°C в прибрежной Арктической зоне России (г. Мурманск и полуостров Ямал), см. рис. 18.

Высокий научный уровень этого развития подтверждает тот факт, что он был представлен на Международной конференции по долговечности и устойчивости бетонных конструкций, организованной Итальянским отделением Американского института бетона, с участием ассоцированного профессора Московского государственного университета гражданской инженерии Л.И. Елшина и опубликованной в Труды симпозиума «SP-326. Durability and Sustainability of Concrete Structures – 2nd Workshop Proceedings» [26].

Resumé

Подводя итоги рассмотрения докладов, опубликованных в [1], следует отметить выдающиеся достижения ученых различных стран, в первую очередь Китая, Японии, Западной Европы, США в области научных разработок в области технологий строительства, проектирования инженерных сооружений

последние десятилетия преимущественно высокопрочного конструкционного легкого бетона на пористых заполнителях взамен равнопрочного тяжелого бетона на плотных заполнителях из местных скальных пород (гранит, доломит и др.); это обусловлено, как показано в работах отечественных и зарубежных исследователей [5, 8–11, 13, 16, 21], более высокими показателями долговечности конструкционного легкого бетона (морозостойкости, водонепроницаемости и соответственно сопротивления проницаемости ионов хлора и магнезиальных солей морской среды в капиллярно-пористую структуру бетона);

– морские платформы для добычи нефти, прежде всего в Северных приливных морях (Норвежское море, Северное море, Баренцево море), конструктивные схемы платформ, технологии их возведения; в последнее время – строительство отдельных конструктивных частей платформ в прибрежной зоне, в частности в сухом доке, с доставкой на плавучую платформу; здесь следует отметить концептуальный метод проектирования морских платформ, разработанный под руководством д-ра техн. наук Tor Ole Olsen (Норвегия); это лучший и более последовательный способ проектирования по сравнению с прежде используемым методом линейно-упругого анализа и нелинейного точечного проектирования; последнее обеспечивает как более безопасное, так и более экономичное проектирование, позволяющее одновременно вести поэтапное строительство нескольких платформ;

– технологии создания модифицированных бетонов, стойких к воздействию сверхнизкой (до минус 196°C) криогенной температуры, предназначенных для использования в строительстве железобетонных резервуаров для хранения сжиженных природных газов в прибрежной Арктической зоне европейского континента, в том числе России.

Список литературы / References

1. Concrete Structures for Resilient Society. Edited by Bin Zhao and Xin-lin Lu. *Proceedings of the fib Symposium 2020, 22 to 24 November, 2020*. Shanghai.
2. Yarmakovskiy V.N., Kadiev D.Z. Physical-chemical and technological bases of concrete resistance to the ultra-low cryogenic (up to -196°C) technical temperatures. *Proceedings of the fib Symposium 2020 «Concrete Structures for Resilient Society»*. Edited by Bin Zhao and Xinlin Lu. Shanghai, 2020. pp. 2139–2146.
3. Liang Y., Wang C. Effect of the ultrafine quartz powder on UHPC properties of steel-concrete composite bridge deck. *Proceedings of the fib Symposium 2020 «Concrete Structures for Resilient Society»*. Edited by Bin Zhao and Xinlin Lu. Shanghai, 2020. pp. 46–51.
4. Spitzner J.A. Review of the development of lightweight aggregate concrete – History and Actual Survey. *International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Sandefjord. Norway. 2000, pp. 13–22.
5. Ярмаковский В.Н. Физико-химические и структурно-технологические основы получения высокопрочных и высокодолговечных конструкционных легких бетонов // *Строительные материалы*. 2016. № 6. С. 6–11.
5. Yarmakovskiy V.N. Physical-chemical and structural-technological bases of producing high-strength and high-durable structural light-weight concretes. *Construction Materials [Stroitel'nyye Materialy]*. 2016. No. 6, pp. 6–11. (In Russian).
6. Yarmakovskiy V.N. New types of the porous slag aggregates and lightweight concretes with their application. *Proceedings of International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Sandefjord. Norway, 1995, pp. 363–372.

7. Ikeda S. Development of lightweight aggregate concrete in Japan. *Proceedings of International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Sandefjord, Norway. 1995, pp. 42–51.
8. Holm T.A. Long-term Service Performance of lightweight aggregate concrete bridge structures. *Proceedings of International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Sandefjord, Norway. 1995, pp. 22–31.
9. Hoff G.C., Nunez R.E., Walum R. The Use of structural lightweight aggregates in offshore concrete platforms. *Proceedings of International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Sandefjord, Norway. 1995, pp. 349–362.
10. Bremner T.W., Holm T.A. Aggregate-matrix interaction in concrete subject to severe exposure. *Proceedings of FIP-CPCI International Symposium on Concrete Sea Structures in Arctic Regions*. Calgary, Canada. 1984.
11. Бремнер Т.У. (Нью-Брансуик, Канада), Ярмаковский В.Н. Легкий бетон: настоящее и будущее. Перспективные области применения конструкционных легких бетонов // *Строительный эксперт*. 2005. № 21 (2008). С. 5–7.
11. Bremner T.U. (New Brunswick, Canada), Yarmakovskiy V.N. Light-weight concrete: present and future. Promising areas of application of structural lightweight concretes. *Construction Expert*. 2005. No. 21 (2008), pp. 5–7. (In Russian).
12. Bardhan-Roy B.K. Lightweight aggregate concrete in UK. *Proceedings of International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Sandefjord, Norway, 1995, pp. 52–70.
13. Helgesen K.H. Lightweight aggregate concrete in Norway. *Proceedings of International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Sandefjord, Norway. 1995, pp. 70–81.
14. FIP Manual of lightweight aggregate concrete. *Surrey University Press*. 1983. 259 p.
15. Arnould M. et Virlogeux M. Granulats et betons legers. *Presses De L'Ecole Nationale Des Ponts Et Chausses*. Paris. 1986. 513 p.
16. Петров В.П., Макридин Н.И., Ярмаковский В.Н., Соколова Ю.А. Технология и материаловедение пористых заполнителей и легких бетонов. М.: Палеотип, 2013. 331 с.
16. Petrov V.P, Makridin N.I., Yarmakovskiy V.N. Tekhnologiya i materialovedenie poristyh zapolniteley i legkih betonov [Technology and materials science of porous aggregates and lightweight concrete]. Moscow: Paleotip, 2013. 331 p.
17. Патент РФ на изобретение 2421421. *Модификатор бетона и способ его получения*. Ярмаковский В.Н., Торпищев Ш.К., Торпищев Ф.Ш. / Заявл. 27.10.2009. Опубл. 20.06.2011. Бюл. № 17.
17. Patent RF for invention 2421421. *Concrete modifier and method of its preparation*. Yarmakovskiy V.N., Torpishchev Sh.K., Torpishchev F.Sh. Declared 27.10.2009. Publ. 20.06.2011. Bul. No. 17.
18. Москвин В.М., Савицкий А.Н., Ярмаковский В.М. Бетоны для строительства в суровых климатических условиях. Л.: Стройиздат, 1973. 169 с.
18. Moskvin V.M., Savickiy A.N., Yarmakovskiy V.M. Betony dlya stroitel'stva v surovyyh klimaticheskikh usloviyakh [Concrete for construction in severe climatic conditions]. Leningrad: Stroyizdat, 1973. 169 p.
19. Голубых Н.Д. Методы оценки стойкости бетона в суровых климатических условиях и агрессивной среде. Дис. ... канд. техн. наук. М., 1975.
19. Golubykh N.D. Metody ocenki stoykosti betona v surovyyh klimaticheskikh usloviyakh i agressivnoy srede [Methods for assessing the resistance of concrete in harsh climatic conditions and aggressive environment]. Cand. Diss. (Engineering). Moscow. 1975. (In Russian).
20. Ярмаковский В.Н. Прочностные и деформативные характеристики бетона при низких отрицательных температурах // *Бетон и железобетон*. 1971. № 10.
20. Yarmakovskiy V.N. Strength and deformation characteristics of concrete at low negative temperatures. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 1971. No. 10, pp. 9–15. (In Russian).
21. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н. Конструкционные легкие бетоны для нефтедобывающих платформ в Северных приливных морях и морях Дальнего Востока // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2015. № 2 (23) С. 16–21.
21. Karpenko N.I., Yarmakovskiy V.N. Structural lightweight aggregate concrete for oil production platforms in the Northern Tidal Seas and the seas of the Far East. *Vestnik inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*. 2015. No. 2 (23), pp. 16–21. (In Russian).
22. Kumar S. Innovative prefabricated construction of a 58 level building in Melbourne Australia. *Proceedings of the fib Symposium 2020 «Concrete Structures for Resilient Society»*. Shanghai. 2020, pp. 1729–1736.
23. Vantyghem G., Ooms T., De Corte W. FEM modeling techniques for simulation of 3D concrete printing. *Proceedings of the fib Symposium 2020 «Concrete Structures for Resilient Society»*. Shanghai. 2020, pp. 1021–1028.
24. Xiang-Lin Gu. Modeling the effect of fatigue damage on chloride diffusion coefficient of concrete. *Proceedings of the fib Symposium 2020 «Concrete Structures for Resilient Society»*. Shanghai. 2020, pp. 2147–2156.
25. Zhao X. Numerical simulation of dual time-dependent chloride diffusion in concrete with ANSYS. *Proceedings of the fib Symposium 2020 «Concrete Structures for Resilient Society*. Shanghai. 2020, pp. 2179–2187.
26. Elshina L.I., Yarmakovskiy V.N. Scientific assistance of hazardous construction in Russian Arctic region. *American Concrete Institute “SP-326. Durability and Sustainability of Concrete Structures – 2nd Workshop Proceedings”*. 2018, pp. 921–930.



К юбилею кафедры «Производство строительных изделий и конструкций» Тверского государственного технического университета

To the anniversary of the department "Production of construction materials and structures" Tver State Technical University

Кафедра «Производство строительных изделий и конструкций» основана в 1970 г. До этого времени (с 1965 г.) подготовка специалистов строительно-технологического профиля велась на кафедре строительного производства, из числа преподавателей которой, помимо кафедры ПСК, были образованы и некоторые другие кафедры университета.

Основателем и первым заведующим (до 1992 г.) кафедрой производства строительных изделий и конструкций Калининского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института являлся ученый с мировым именем, создатель теории формования асбоцементных изделий, получившей международное признание, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор **Иван Иванович Берней** (1917–1997).

Под руководством И.И. Бернея на высоком учебно-методическом уровне был организован учебный процесс, все студенты старших курсов специальности ПСК стали проводить учебно-исследовательскую работу, что способствовало повышению качества подготовки специалистов.

Каждый понедельник Иван Иванович приходил на работу с пачкой плотно исписанных листов, где каждому сотруднику давался подробнейший перечень заданий и описание методик проведения новых работ. Каждую неделю все должны были отчитываться о выполненной работе. И так год за годом! Конечно, это не всем могло понравиться.

Сам Иван Иванович не знал усталости, он посвящал научной работе все свое время и требовал того же от окружающих. Он считал, что отпуска сотрудников и каникулы студентов слишком продолжительны и часть их, конечно же, нужно тратить на научную работу. Он был уверен, что преподаватель, не занимающийся наукой, не сможет научить студента, а студент не сможет стать хорошим специалистом, не поработав с ученым.

На лекциях профессор И.И. Берней поражал студентов огромной эрудицией и разносторонностью. И лекции у него были особые. Студентам приходилось готовиться к ним, как к хорошему зачету. Лектор мог спросить любого по уже разобранному материалу, знание предыдущего курса тоже было обязательно.

Для дипломников знание последних статей в отечественных и зарубежных журналах считалось нормой. Студенты втягивались в напряженную работу и привыкали к своему требовательному шефу. Любить же его им было трудно... Да и сам профессор ценил результаты превыше эмоций.

Со дня основания на кафедре ПСК трудились талантливые педагоги и ученые: кандидаты техн. наук, доценты В.М. Петров, В.В. Богданов, Г.М. Мешалкин, А.В. Исаев; старшие преподаватели: Н.А. Коренева, Т.С. Какаулина, Н.Г. Кедрова и др.

С 1993 г. кафедрой ПСК заведует ученик И.И. Бернея д-р техн. наук, профессор **Владимир Владимирович Белов** – специалист в области разработки малоэнергоемких ресурсосберегающих технологий стеновых и теплоизоляционных материалов с учетом закономерностей структурообразования в дисперсных системах.

В настоящее время кафедра ПСК является выпускающей по направлению подготовки бакалавров – 08.03.01 Строительство, профиль «Производство строительных материалов, изделий и конструкций»; по направлению подготовки магистров – 08.04.01 Строительство, профиль «Технология строительных материалов, изделий и конструкций»; по направлению подготовки кадров высшей квалификации (аспирантура) – 08.06.01 Техника и технологии строительства, направленность (профиль) «Строительные материалы и изделия».



И.И. Берней (справа) и В.А. Долгов

Из воспоминаний Евгения Иосифовича Ильмера об Иване Ивановиче Бернее:

На многих людей Иван Иванович производил ошеломляющее впечатление. Мне он напоминал огромный рычащий бульдозер, сметающий все на своем пути. Раньше не приходилось видеть человека, который бы непрерывно, в буквальном смысле этого слова, и так напряженно работал над научными и техническими проблемами. Эту работу он пытался втянуть всех – и преподавателей, и студентов. Его требования были не под силу большинству окружающих, и с ним оставались самые стойкие, самые преданные делу и Учителю...

Очень тепло сказал о нем доцент Ю.А. Шлапаков: «Очень редко, но бывают ученые особого полета, и обычные правила к ним неприменимы. Их работы всегда ярки и свежи, а в сознании других людей их мощный научный облик с годами приумножается, отливая новыми гранями. Вот таким ученым и был Иван Иванович Берней, не только ярчайший педагог, но и Учитель. Это человек, для которого главным занятием являлась творческая работа, приносящая ему необыкновенное удовольствие и радость. Все это выделяло его на фоне других, даже талантливых людей. Я искренне горжусь, что являюсь его учеником, и с благодарностью вспоминаю те годы, которые проработал вместе с ним».

Основное научное направление кафедры – использование местных ресурсов и отходов промышленности для получения эффективных экологически безопасных строительных материалов нового поколения. Умелое повторное использование отходов промышленности, вовлечение их в технологический процесс, в перспективе – создание безотходных технологий – все эти важнейшие исследования и инновационные разработки в области строительства и строительных материалов успешно выполняются коллективом кафедры ПСК в составе **Академического научно-творческого центра «Тверьстройнаука» РААСН при ТвГТУ**.

Для осуществления научной-исследовательской деятельности кафедра ПСК оснащена современным научным и испытательным оборудованием. Ежегодно преподаватели и студенты кафедры ПСК участвуют в работе международных, всероссийских и региональных симпозиумов, конференций и семинаров, что позволяет преподавателям и будущим молодым специалистам получать знания и обмениваться опытом по новейшим разработкам в области современных высоких технологий производства строительных материалов и изделий.

На кафедре активно ведется научно-исследовательская работа студентов, организована подача студентами заявок на выдачу патентов на изобретения. Студенческие научные работы и дипломные проекты по кафедре ПСК ежегодно участвуют в региональных и всероссийских конкурсах, где награждаются почетными грамотами, дипломами и медалями.

Вот лишь некоторые из последних разработок кафедры ПСК, запатентованные или патентуемые в настоящее время и предлагаемые для промышленного внедрения:

- стеновые и облицовочные изделия на основе безобжигового гипса из техногенных отходов;
- высокопрочные мелкозернистые бетоны и фибробетоны;
- новые виды сухих строительных смесей: вспучивающиеся с волокнистым наполнителем для изготовления дисперсно-армированного неавтоклавнога газобетона; общестроительные смеси улучшенного качества, модифицированные отечественной полимерной добавкой;
- неавтоклавный ячеистый бетон на основе отвалных зол гидроудаления, волокнистых и пылевидных базальтовых отходов.

В 2010 г. на базе кафедры ПСК организован **Научно-испытательный центр «Строительная лаборатория кафедры ПСК»**, оснащенный современным научным и испытательным оборудованием как зарубежных, так и отечественных фирм, что позволяет решать задачи по улучшению качества выпускаемой заводами стройиндустрии продукции, в том числе и новой, с применением новых технологий. НИЦ «Строительная лаборатория кафедры ПСК» с момента образования регулярно проходит аттестацию в Тверском центре стандартизации и метрологии на наличие условий для выполнения измерений и испытаний в области строительных материалов и изделий.

Основная цель работы кафедры в настоящее время – сохранить и по возможности приумножить достижения как в учебно-методической, так и в научной и производственной работе. Кафедра имеет устойчивый кадровый состав. Идет постоянный процесс омоложения кадров и повышения их квалификации.





Комитет Торгово-промышленной палаты РФ
по предпринимательству в сфере строительства
АО «ЦНИИЭП жилища – институт комплексного проектирования
жилых и общественных зданий» (АО «ЦНИИЭП жилища»)
Объединенная редакция научно-технических журналов
«Жилищное строительство» и «Строительные материалы»®



XI Международная научно-практическая конференция «InterConPan-2021: индустриальное домостроение для комплексного развития территорий»

InterConPan-2021

International Conference of Large-panel Construction

28–30 Июня 2021 г. / June 28–30, 2021

Отель «Золотое кольцо» Управления делами Президента РФ (Москва, ул. Смоленская, 5)



ТЕМАТИКА:

- Оборудование и технологии для модернизации предприятий индустриального домостроения
- Инновационные строительные системы
- BIM-технологии в сборном домостроении
- Современные бетоны, добавки и пигменты
- Архитектурно-планировочные решения
- Решения фасадов и внутренней отделки
- Качественное и энергоэффективное индустриальное строительство
- Комплексное развитие территорий застройки
- Малоэтажное индустриальное строительство

ПРОГРАММА:

- 1-й день** Пленарное заседание
Секции: «Архитектура крупнопанельных зданий и комплексное развитие территорий»; «Инновационная технология предприятий индустриального домостроения»; «BIM-технологии в индустриальном домостроении»
- 2-й день** Выездная сессия на предприятия индустриального домостроения Москвы и Московской области
- 3-й день** Выездная сессия на объекты строительства Москвы и Московской области

Постоянный спонсор

PROGRESS GROUP

Постоянный партнер

ALLBAU
software

Партнеры

SOMMER
PRECAST TECHNOLOGY

К проведению конференции готовятся тематические номера журналов «Жилищное строительство» № 5 и «Строительные материалы» № 5, в которых будут опубликованы основные пленарные и секционные доклады. Представление докладов в виде статей до 20.04.2021 г.

www.interconpan.ru

Организационный комитет: +7 (499) 976-20-36, 976-22-08
kpd-conf@mail.ru; mail@rifsm.ru www.rifsm.ru

Адрес для корреспонденции: 127434, Москва, Дмитровское ш., д. 9, стр. 3, оф. 408, редакция журнала «Жилищное строительство»

Х.Т. ЛЕ¹, аспирант (huutuan1511@gmail.com), В.А. ГЛАДКИХ¹, канд. техн. наук (gladkich_87@mail.ru);
Е.В. КОРОЛЕВ², д-р техн. наук (korolev@nocnt.ru); А.Н. ГРИШИНА¹, канд. техн. наук (grishinaan@mgsu.ru)

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4)

Водостойкость сероасфальтобетона. Результаты исследования и особенности определения

В работе представлены данные о кинетике набора прочности сероасфальтобетонов, а также о его водостойкости. Показано, что достижение максимальной прочности сероасфальтобетонов завершается на 6-е – 7-е сутки. Причем величина прочности и скорость ее набора зависят от содержания серы: максимальные значения и скорости набора прочности характерны для сероасфальтобетона, содержащего 40% серы. Экспериментально установлено, что замещение битума технической серой на 20–40% приводит к снижению коэффициента водостойкости сероасфальтобетона при длительном водонасыщении. Вычислены кинетические и энергетические параметры процесса деструкции асфальтобетона и сероасфальтобетона. Показано, что введение серы повышает чувствительность структуры сероасфальтобетона к воздействию воды. Сформулированы основные гипотезы снижения водостойкости сероасфальтобетонов: физико-химическая гипотеза, химическая гипотеза и комплексная гипотеза.

Ключевые слова: сероасфальтобетон, асфальтобетон, водостойкость, техническая сера, прочность.

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

Для цитирования: Ле Х.Т., Гладких В.А., Королев Е.В., Гришина А.Н. Водостойкость сероасфальтобетона. Результаты исследования и особенности определения // *Строительные материалы*. 2021. № 3. С. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-39-44>

H.T. LE¹, graduate student (huutuan1511@gmail.com), V.A. GLADKIKH¹, Candidate of Sciences (Engineering) (gladkich_87@mail.ru);

E.V. KOROLEV², Doctor of Sciences (Engineering) (korolev@nocnt.ru); A.N. GRISHINA¹, Candidate of Sciences (Engineering) (grishinaan@mgsu.ru)

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

² Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, Vtoraya Красноармейская Street, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation)

Moisture Resistance of Sulfur-Extended Asphalt Concrete. Results of the Study and Features of Definition

The paper presents data on the kinetics of strength gain of sulfur-extended asphalt concrete, as well as its moisture resistance. It is shown that the achievement of the maximum strength of sulfur-extended asphalt concrete is completed on the 6-7th day. Moreover, the value of strength and the rate of its gain depend on the sulfur content: the maximum values and rate of strength gain are characteristic of sulfur-extended asphalt concrete containing 40% sulfur. It has been experimentally established that the replacement of technical sulfur bitumen by 20–40% leads to a decrease in the coefficient of moisture resistance of sulfur-extended asphalt concrete with prolonged water saturation. Kinetic and energy parameters of the process destruction of asphalt concrete and sulfur-extended asphalt concrete have been calculated. It is shown that the use of sulfur increases the sensitivity of the structure of sulfur-extended asphalt concrete to water. The main hypotheses of a decrease in the moisture resistance of sulfur-extended asphalt concrete are formulated: physicochemical hypothesis, chemical hypothesis and complex hypothesis.

Keywords: sulfur-extended asphalt concrete, asphalt concrete, moisture resistance, technical sulfur, compressive strength.

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project: Theoretical and experimental design of new composite materials to ensure safety during the operation of buildings and structures under conditions of technogenic and biogenic threats #FSWG-2020-0007).

For citation: Le H.T., Gladkikh V.A., Korolev E.V., Grishina A.N. Moisture resistance of sulfur-extended asphalt concrete. Results of the study and features of definition. *Stroitel'nyye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 3, pp. 39–44. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-39-44>

Развитие экономики часто сопряжено с транспортной инфраструктурой, в частности с протяженностью и качеством автомобильных дорог [1, 2]. Перспективным направлением повышения качества асфальтобетона является применение серы в качестве компонента асфальтобетона, который получил название «сероасфальтобетон» [3, 4]. Ее применение позволяет значительно повысить эксплуатационные свойства асфальтобетона, связанные со стойкостью к механическим нагрузкам, например колееобразованию [5–9]. При этом водостойкость сероасфальтобетона изучена недостаточно, несмотря на то что водостойкость асфальтобетона, предназначенного для устройства верхних слоев покрытия, является одним из важнейших показателей, характеризующих его долговечность [10–19]. Это определяет необходимость исследования структурообразования сероасфальтобетона при эксплуатации в условиях воздействия жидких сред, в частности воды. Полученные знания позволяют

расширить представления о процессах структурообразования такого вида композитных строительных материалов, выявить закономерности изменения параметров структуры и разработать научно обоснованные технологические решения по повышению эксплуатационных свойств сероасфальтобетона.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является модифицированный технической серой плотный асфальтобетон типа Б для II дорожно-климатической зоны, спроектированный в соответствии с требованиями ГОСТ 9128–2013 «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия» и изготовленный с использованием:

– битума нефтяного дорожного БНД 60/90 производства ООО «Московский нефтеперерабатывающий завод», соответствующего требованиям

ГОСТ 22245–90 «Битумы нефтяные дорожные. Технические условия»;

– щебня из габбро-диабазы карельского месторождения Новый Поселок с размером фракций от 5 до 20 мм, соответствующего требованиям ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ»;

– гранитного песка, соответствующего ГОСТ 8736–93 «Песок для строительных работ»;

– неактивированного доломитового минерального порошка МП-1, соответствующего требованиям ГОСТ 52129–2003 «Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия»;

– кристаллической серы, соответствующей требованиям ГОСТ 127.1–93 «Сера техническая. Технические условия».

Физико-механические свойства определяли согласно ГОСТ 9128–2013 «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия», ГОСТ 12801–98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного строительства. Методы исследования» при температуре 20°C.

Результаты исследования

Для оценки водостойкости сероасфальтобетона были изготовлены образцы сероасфальтобетона с содержанием серы: 20; 30 и 40% от массы битума¹, а также контрольный состав асфальтобетона без содержания серы. Предварительно проведено исследование кинетики изменения прочности модифицированного и контрольного составов, результаты которого представлены на рис. 1.

Анализ экспериментальных данных (рис. 1) показывает, что изменения прочности материала адекватно описываются математической моделью вида:

$$R(t) = R_{\max} - be^{-kt}, \quad (1)$$

где R_{\max} – максимальная прочность; t – продолжительность хранения образцов после изготовления; b, k – эмпирические коэффициенты.

Физический смысл коэффициентов b и k заключается в следующем:

– при $t = 0$ прочность материала равна: $R(0) = R_{\max} - b$. Отсюда $b = R_{\max} - R(0)$, что соответствует максимальному увеличению прочности материала, т. е. $b = \Delta R_{\max}$;

– коэффициент k характеризует интенсивность изменения прочности материала. Так, при $t^* = n/k$ (здесь $n = 1, 2, 3 \dots n$) из (1) увеличение прочности материала составит:

$$R(t^*) = R(0) + \Delta R_{\max} \frac{(e^n - 1)}{e^n}, \quad (2)$$

где e – число Эйлера (величина $(e-1)/e = 0,632$ получила название «постоянная времени» (Большая советская энциклопедия)).

С увеличением продолжительности хранения, которую можно представить как увеличение n , прочность материала будет возрастать до величины R_{\max} . Однако скорость роста прочности уменьшается:

$$\frac{dR}{dn} = \frac{1}{e^n}. \quad (3)$$

Значения эмпирических коэффициентов формулы (1) приведены в табл. 1.

Анализ рис. 1 и табл. 1 показывает, что наибольшее значение коэффициента $b = \Delta R_{\max}$, характеризующее максимальное увеличение прочности материала, наблюдается при содержании серы 30% в составе сероасфальтобетона, а у контрольного состава – наименьшее. Следует отметить, что при увеличении содержания серы в составе сероасфальтобетона наблюдается существенное увеличение его прочности, тогда как прочность контрольного состава изменяется в пределах 10%, а сероасфальтобетон с содержанием серы 20% увеличивает прочность на 21%; при содержании серы 30% – на 45%, при содержании серы 40% – на 27%. Кроме этого, при увеличении содержания серы отмечается возрастание значений коэффициента k , характеризующего интенсивность увеличения прочности сероасфальтобетонов. Однако, независимо от количества серы, увеличение прочности сероасфальтобетонов на $\Delta R_{\max} (e-1)/e = 0,632 \Delta R_{\max}$

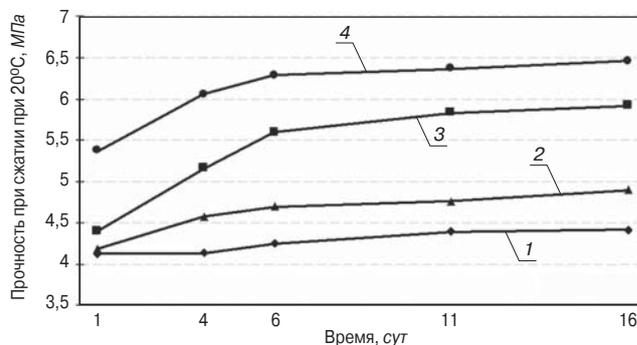


Рис. 1. Кинетика набора прочности модифицированного и контрольного составов: 1 – контрольный состав; 2 – содержание серы 20%; 3 – то же, 30%; 4 – то же, 40%

Fig. 1. Kinetics of strength gain for modified and control formulations: 1 – control composition; 2 – sulfur content 20%; 3 – the same, 30%; 4 – the same, 40%;

Таблица 1
Table 1

Значения эмпирических коэффициентов Empirical coefficient values

Эмпирический коэффициент	Контрольный состав	Содержание серы, %		
		20	30	40
R_{\max} , МПа	4,42	4,90	5,91	6,51
b , МПа	0,41	0,89	2,01	1,48
k , сут ⁻¹	0,15	0,269	0,275	0,292

¹ Особенностью проектирования и изготовления сероасфальтобетона является замена серой части нефтяного битума. При этом абсолютный объем вяжущего вещества (нефтяной битум+техническая сера для сероасфальтобетона или нефтяного битума для асфальтобетона) остается постоянным [15].

(при $n=1$) наблюдается на $t^*=3-4$ сут, а контрольного состава с наименьшим значением k – на 6-е – 7-е сут, т. е. в два раза медленнее. Эти результаты также показывают, что наиболее активно рост прочности сероасфальтобетонов происходит в первые 3–4 сут, а контрольного состава – на 6-е – 7-е сут. Характер измерения прочности и причины, обуславливающие этот процесс, описаны в [14].

Таким образом, следует отметить, что асфальтобетон при хранении незначительно изменяет свою прочность, однако использование серы приводит к значимому изменению прочностных характеристик материала. Указанное демонстрирует некорректность использования методики определения водостойкости образцов, подверженных хранению, принимая для расчетов начальную прочность материала (рис. 2, 3).

Анализ данных рис. 2 и 3 показывает, что водостойкость материала, определенная на основании его прочности в возрасте 1 сут, удовлетворяет требованиям ГОСТ 9128–2013 по водостойкости (для II дорожно-климатической зоны), однако учет структурообразования сероасфальтобетона указывает на протекание в материале конкурирующих процессов, которые могут быть классифицированы как конструктивный и деструктивный. Причем баланс по данным рис. 3 смещен в область деструктивных процессов. Сопоставление данных рис. 1 и 3 указывает, что причиной возникновения конкурирующих процессов является изменение параметров структуры асфальтобетона, источник которых – техническая сера.

Оценку интенсивности деструктивных процессов модифицированного и контрольного составов проводили по методике, предложенной в [20]. В соответствии с указанной методикой базовыми кинетическими и энергетическими параметрами, характеризующими процесс деструкции, являются:

- кинетический коэффициент деструкции k_d ;
- энергетический потенциал стойкости материала U ;
- удельное количество энергии эксплуатационного воздействия, поглощенной материалом для структурообразования в эксплуатационный период ΔS .

Расчет указанных и вспомогательных параметров производится по формулам:

$$\Delta k_{ст} = \left(1 - \frac{1-n}{F_0^{1-n}} k_d t\right)^{\frac{1}{1-n}}, \quad (4)$$

где F_0 – начальная прочность материала; n – константа, $n=1+c$; c – эмпирический коэффициент; k_d – кинетический коэффициент деструкции, рассчитываемый по формуле:

$$k_d = F_0^n e^{\frac{B_E}{RT}} = \frac{b}{c} F_0^{-c}, \quad (5)$$

где $B_E = \Delta S T - U$ – энергетический показатель процесса деструкции:

$$B_E = RT \Delta \ln\left(\frac{b}{c} F_0^{-2c-1}\right); \quad (6)$$

U – энергия активации процесса деструкции:

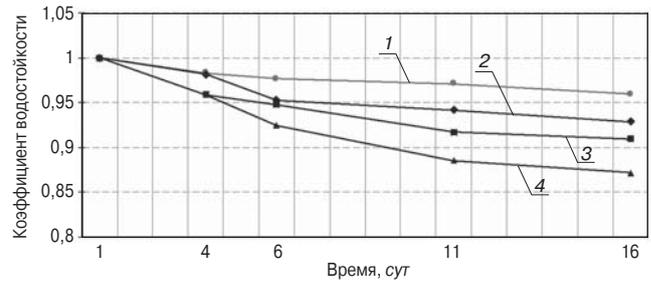


Рис. 2. Водостойкость модифицированного и контрольного составов без учета изменения их прочности во времени: 1 – контрольный состав; 2 – содержание серы 20%; 3 – то же, 30%; 4 – то же, 40%

Fig. 2. Moisture resistance of modified and control formulations without taking into account the change in their strength over time: 1 – control composition; 2 – sulfur content 20%; 3 – the same 30%; 4 – the same 40%

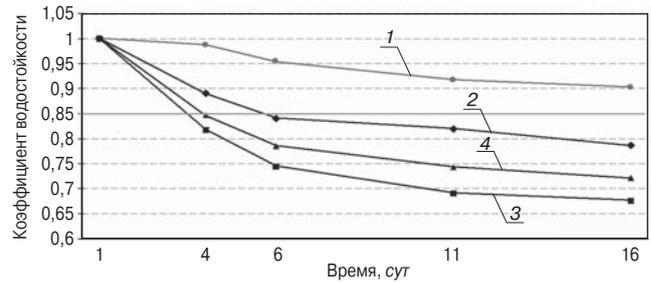


Рис. 3. Водостойкость модифицированного и контрольного составов с учетом изменения их прочности: 1 – контрольный состав; 2 – содержание серы 20%; 3 – то же, 30%; 4 – то же, 40%

Fig. 3. Moisture resistance of modified and control formulations taking into account changes in their strength: 1 – control composition; 2 – sulfur content 20%; 3 – the same 30%; 4 – the same 40%

$$U = RT \Delta \ln\left(\frac{c}{b} F_0^c\right); \quad (7)$$

ΔS – удельное количество поглощенной материалом энергии:

$$\Delta S = R \ln(F_0^{-1-c}), \quad (8)$$

где b – эмпирический коэффициент; $T \Delta$ – температура среды; R – универсальная газовая постоянная.

Материал считается долговечным при выполнении следующих условий:

$$K_E = \frac{U}{|\Delta S T|} = \max \text{ и } |\Delta S| = \min.$$

Значения эмпирических коэффициентов b и c определяются по результатам аппроксимации экспериментальной кинетики изменения прочности материала при воздействии анализируемой эксплуатационной среды:

$$k_{ст} = \frac{1}{\sqrt[a+b]{t}}, \quad (9)$$

где $k_{ст}$ – коэффициент эксплуатационной стойкости материала; t – продолжительность экспозиции образцов; a, b, c – эмпирические коэффициенты.

Значения эмпирических коэффициентов для модифицированного и контрольного составов представлены на табл. 2.

Значения кинетических и энергетических параметров процесса деструкции модифицированного и контрольного составов представлены в табл. 3 и 4.

Между параметрами деструкции определены значения коэффициентов линейной корреляции, представленные на рис. 4.

Таблица 2
Table 2

Значения эмпирических коэффициентов
Empirical coefficient values

Эмпирический коэффициент	Содержание серы, %			
	0	20	30	40
<i>a</i>	1	1	1	1
<i>b</i>	$-1,85 \cdot 10^{-5}$	$-2,62 \cdot 10^{-5}$	$-4,54 \cdot 10^{-5}$	$-3,76 \cdot 10^{-5}$
<i>c</i>	$-2,51 \cdot 10^{-3}$	$-1,74 \cdot 10^{-3}$	$-1,70 \cdot 10^{-3}$	$-1,75 \cdot 10^{-3}$

Анализ рис. 4 показывает, что максимальное значение коэффициента линейной корреляции наблюдается между количеством поглощенной материалом энергии и коэффициентом эксплуатационной его стойкости. При этом удельное количество поглощенной материалом энергии $\Delta S < 0$, что свидетель-

ствует о его переходе под действием эксплуатационного воздействия в термодинамически выгодное состояние. Отсюда следует, что модифицирование материала технической серой является основным источником формирования параметров его структуры, приводящих к повышению восприятия материалом воздействия эксплуатационной среды (абсолютные значения ΔS возрастают). На основании изложенного с учетом физико-химических свойств серы можно сформулировать основные гипотезы снижения водостойкости сероасфальтобетонов:

1. Физико-химическая гипотеза. В процессе изготовления сероасфальтобетона происходит частичное растворение серы в расплаве нефтяного битума. После охлаждения композиции нефтяной битум+техническая сера будет происходить разделение фаз, которое приведет к кристаллизации серы и образованию в битуме каналов для проник-

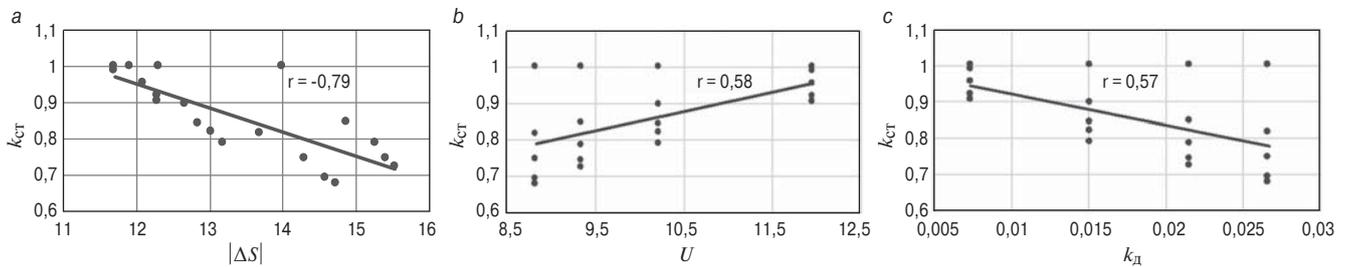


Рис. 4. Коэффициенты корреляции параметров деградации: а - $k_{СТ}=f(|\Delta S|)$; б - $k_{СТ}=f(U)$; в - $k_{СТ}=f(k_{Д})$
Fig. 4. Coefficients of correlation of parameters of destruction: а - $k_{СТ}=f(|\Delta S|)$; б - $k_{СТ}=f(U)$; в - $k_{СТ}=f(k_{Д})$

Таблица 3
Table 3

Энергетические параметры процесса деградации
Energy parameters of the destruction process

Содержание серы, мас. %	Показатель									
	F_0					<i>n</i>				
	Время, сут					Время, сут				
	1	4	6	11	16	1	4	6	11	16
0	4,1	4,1	4,3	4,4	4,4	0,99749	0,99749	0,99749	0,99749	0,99749
20	4,2	4,6	4,7	4,8	4,9	0,99826	0,99826	0,99826	0,99826	0,99826
30	4,4	5,2	5,6	5,8	5,9	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983
40	5,4	6	6,3	6,4	6,4	0,99825	0,99825	0,99825	0,99825	0,99825
Содержание серы, мас. %	Показатель									
	$k_{Д}$					ΔS				
	Время, сут					Время, сут				
	1	4	6	11	16	1	4	6	11	16
0	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	-11,7	-11,7	-12,10	-12,29	-12,29
20	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	-11,91	-12,67	-12,84	-13,02	-13,19
30	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	-12,3	-13,68	-14,30	-14,59	-14,73
40	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	-14	-14,87	-15,28	-15,41	-15,53
Содержание серы, мас. %	Показатель									
	V_E					<i>U</i>				
	Время, сут					Время, сут				
	1	4	6	11	16	1	4	6	11	16
0	-15,38	-15,38	-15,5	-15,55	-15,55	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95
20	-13,71	-13,93	-13,98	-14,03	-14,08	10,22	10,21	10,21	10,21	10,21
30	-12,43	-12,84	-13,02	-13,1	-13,14	8,83	8,83	8,83	8,83	8,83
40	-13,45	-13,7	-13,82	-13,86	-13,9	9,35	9,35	9,35	9,35	9,35

Таблица 4
Table 4Значения коэффициента K_E
Coefficient values K_E

Время, сут	Содержание серы, %			
	0	20	30	40
1	3,49	2,93	2,45	2,28
4	3,49	2,75	2,2	2,15
6	3,37	2,71	2,11	2,09
11	3,32	2,68	2,07	2,07
16	3,32	2,64	2,05	2,05

новения воды в асфальтобетон. Естественным следствием этого процесса должно являться повышение водопоглощения и проницаемости материала.

2. Химическая гипотеза. Сера как химически активный компонент вступает во взаимодействие с дисперсными фазами асфальтобетона и нефтяным битумом с образованием водорастворимых соединений.

3. Комплексная гипотеза. Предполагает протекание указанных как химического, так и физико-химического процессов.

Список литературы

1. Васильев Ю.Э., Ивачев А.В., Братищев И.С. Исследование устойчивости дорожно-строительных материалов к износному колееобразованию в условиях, приближенных к эксплуатационным // *Вестник евразийской науки*. 2014. № 5 (24). С. 20.
2. Котлярский Э.В., Гридчин А.М., Лесовик Р.В. Факторы, способствующие разрушению структуры асфальтобетона в процессе эксплуатации дорожных асфальтобетонных покрытий. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2012. 187 с.
3. Gladkikh V, Korolev E and Smirnov V. Structure and physical properties of sulfur with nanoscale carbon modifiers // *E3S Web of Conferences 91*. 2019. 07014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199107014>
4. Тураев Ф.Т., Бекназаров Х.С., Джалилов А.Т. Исследование модификации дорожного битума элементарной серой // *Universum: технические науки*. 2019. № 2 (59). С. 65–69.
5. Gladkikh V., Korolev E., Husid D., Sukhachev I. Properties of sulfur-extended asphalt concrete // *MATEC Web of Conferences IPICSE*. 2016. 86. DOI: 10.1051/matecconf/20168604024
6. Васильев Ю.Э. Методологические основы автоматизации процессов промышленного производства сероасфальтобетонных смесей с оптимизацией компонентов минеральной части по granulometricкому составу. Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2012. 337 с.
7. Yang R., Ozer H., Ouyang Y., Alarfaj A., Islam K., Khan M.I., Khan K.M., and Shalabi F.I. Life-cycle assessment of using sulfur-extended asphalt (sea) in pavements // *Airfield and Highway Pavements*. 2019, pp. 183–192. DOI: 10.1061/9780784482476.020
8. Андронов С.Ю., Васильев Ю.Э., Тимохин Д.К., Репин А.М., Репина О.В., Талалай В.В.

На основе результатов проверки указанных гипотез может быть сформулировано научно обоснованное технологическое решение, обеспечивающее повышение стойкости сероасфальтобетона к воздействию жидких агрессивных сред.

Заключение и обсуждение

Экспериментально установлено, что добавление технической серы в асфальтобетон в количестве 20–40% от массы битума приводит к снижению коэффициентов водостойкости сероасфальтобетонов при длительном водонасыщении. Рассчитаны кинетические и энергетические параметры процесса деструкции асфальтобетона и сероасфальтобетона. Показано, что с увеличением содержания технической серы интенсивность процесса деструкции возрастает. Сформулированы основные гипотезы снижения водостойкости сероасфальтобетонов, проверка которых является основанием для разработки научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего повышение стойкости сероасфальтобетонов к воздействию жидких агрессивных сред.

References

1. Vasil'yev Yu.E., Ivachev A.V., Bratishchev I.S. Investigation of the stability of road-building materials to wear rutting under conditions close to operational. *Vestnik yevraziyskoy nauki*. 2014. No. 5 (24), p. 20. (In Russian).
2. Kotlyarskiy E.V., Gridchin A.M., Lesovik R.V. Faktory, sposobstvuyushchie razrusheniyu struktury asfal'tobetona v protsesse ekspluatatsii dorozhnykh asfal'tobetonnykh pokrytii [Factors contributing to the destruction of the structure of asphalt concrete during the operation of road asphalt pavements]. Belgorod: BSTU. 2012. 187 p.
3. Gladkikh V, Korolev E and Smirnov V. Structure and physical properties of sulfur with nanoscale carbon modifiers. *E3S Web of Conferences 91*. 2019. 07014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199107014>
4. Turayev F.T., Beknazarov K.S., Dzhalilov A.T. Study of the modification of road bitumen with elemental sulfuric. *Universum: tekhnicheskiye nauki*. 2019. No. 2 (59), pp. 65–69. (In Russian).
5. Gladkikh V., Korolev E., Husid D., Sukhachev I. Properties of sulfur- extended asphalt concrete. *MATEC Web of Conferences IPICSE*. 2016. 86. DOI: 10.1051/matecconf/20168604024
6. Vasiliev Yu.E. Methodological fundamentals of automation of processes of industrial production of sulfur-asphalt concrete mixtures with optimization of the components of the mineral part according to particle size distribution. Diss. Dr. of Sciences (Engineering). Moscow. 2012. 337 p.
7. Yang R., Ozer H., Ouyang Y., Alarfaj A., Islam K., Khan M.I., Khan K.M., and Shalabi F.I. Life-cycle assessment of using sulfur-extended asphalt (sea) in pavements. *Airfield and Highway Pavements*. 2019, pp. 183–192. DOI: 10.1061/9780784482476.020
8. Andronov S.Y., Vasiliev Y.E., Timokhin D.K., Repin A.M., Repina O.V. and Talalay V.V. Production

- Производство и применение сероасфальтобетонных композиционных покрытий на автомобильных дорогах и мостах // *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*. 2016. Т. 8. № 3. <http://naukovedenie.ru/PDF/104TVN316.pdf>
9. Yeoh D., Boon Koh Heng, Jamaluddin N. Exploratory study on the mechanical and physical properties of concrete containing sulfur // *Journal Technology Sciences & Engineering*. 2015. 77:32, pp. 179–188. DOI: 10.11113/jt.v77.7009
 10. Pat. 2585540 United States. A method providing for a low release of H₂S during the preparation of sulfur-extended asphalt. Majid Jamshed Chughtai, Helen Jayne Davies, Richard Walter May and David Strickland. Publ. 05.01.2013.
 11. Gladkikh V.A., Korolev E.V. Suppressing the hydrogen sulfide and sulfur dioxide emission from sulfur-bituminous concrete // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1040, pp. 387–392. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.387>
 12. Pat. 3960585 United States. Reducing H₂S-emission from hot cast sulfur-asphalt mixtures. Publ. 06.01.1976.
 13. Timm D., Tran N., Taylor A., Robbins M., Powell R. Evaluation of mixture performance and structural capacity of pavements using shell Thiopave®. Report No. 09-05. National Center for Asphalt Technology. Auburn University. 2009.
 14. Гладких В.А. Сероасфальтобетон, модифицированный комплексной добавкой на основе технической серы и нейтрализаторов эмиссии токсичных газов. Дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 222 с.
 15. Исраилова З.С., Цамаева П.С., Страхова Н.А. Влияние химического состава битумов на водостойкость асфальтобетона // *Естественные и технические науки*. 2008. № 5 (37). С. 246–248.
 16. Ерофеев В.Т., Ликомаскина М.А. Оценка долговечности асфальтобетонов при испытаниях в климатических условиях с переменной влажностью, ультрафиолетовым облучением и агрессивной морской водой // *Вестник МГСУ*. 2016. № 6. С. 63–79.
 17. Никонова О.Н., Дука О.А., Руденский А.В. Повышение водостойкости дорожных асфальтобетонов введением порошкообразных активаторов // *Строительные материалы*. 2009. № 5. С. 21–23.
 18. Золотарев В.А., Кудрявцева С.В., Ефремов С.В., Агеева Е.Н. Совместное влияние полимеров и поверхностно-активных веществ на сцепление битумов и водостойкость асфальтобетонов // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2007. № 3 (42). С. 33–35.
 19. Gladkikh V., Korolev E., Gladkikh V. Green sulfur-extended asphalt concrete: mix design of the complex binder // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86:04023. p. 6. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20168604023>
 20. Королев Е.В., Баженов Ю.М., Альбакасов А.И. Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы. Пенза; Оренбург: ИПК ОГУ, 2010. 364 с.
 - and use of sulfur-asphalt composite coatings on roads and bridges. *Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE»*. 2016. Vol. 8. No. 3. <http://naukovedenie.ru/PDF/104TVN316.pdf>
 9. Yeoh D., Boon Koh Heng, Jamaluddin N. Exploratory study on the mechanical and physical properties of concrete containing sulfur. *Journal Technology Sciences & Engineering*. 2015. 77:32, pp. 179–188. DOI: 10.11113/jt.v77.7009
 10. Pat. 2585540 United States. A method providing for a low release of H₂S during the preparation of sulfur-extended asphalt. Majid Jamshed Chughtai, Helen Jayne Davies, Richard Walter May and David Strickland. Publ. 05.01.2013.
 11. Gladkikh V.A., Korolev E.V. Suppressing the hydrogen sulfide and sulfur dioxide emission from sulfur-bituminous concrete. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1040, pp. 387–392. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.387>
 12. Pat. 3960585 United States. Reducing H₂S-emission from hot cast sulfur-asphalt mixtures. Publ. 06.01.1976.
 13. Timm D., Tran N., Taylor A., Robbins M., Powell R. Evaluation of mixture performance and structural capacity of pavements using shell Thiopave®. Report No. 09-05. National Center for Asphalt Technology. Auburn University. 2009.
 14. Gladkikh V.A. Sulfur-asphalt concrete modified with a complex additive based on technical sulfur and neutralizing agents for the emission of toxic gases. Diss. Cand. (Engineering). Moscow. 2015. 222 p. (In Russian).
 15. Israilova Z.S., Tsamayeva P.S., Strakhova N.A. The effect of the chemical composition of bitumen on the water resistance of asphalt concrete. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2008. No. 5 (37), pp. 246–248. (In Russian).
 16. Erofeev V.T., Likomaskina M.A. Evaluation of the durability of asphalt concrete when tested in climatic conditions with variable humidity, ultraviolet irradiation and aggressive sea water. *Vestnik MGSU*. 2016. No. 6, pp. 63–79. (In Russian).
 17. Nikonova O.N., Duka O.A., Rudenskiy A.V. Increasing the water resistance of road asphalt concrete by the introduction of powdered activators. *Stroitel'nyye Materialy* [Construction Materials]. 2009. No. 5, pp. 21–23. (In Russian).
 18. Zolotarev V.A., Kudryavtseva S.V., Yefremov S.V., Ageyeva Ye.N. The combined effect of polymers and surfactants on the adhesion of bitumen and water resistance of asphalt concrete. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*. 2007. No. 3 (42), pp. 33–35. (In Russian).
 19. Gladkikh V., Korolev E.V., Gladkikh V.G. Green sulfur-extended asphalt concrete: mix design of the complex binder. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86:04023. p. 6. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20168604023>
 20. Korolev E.V., Bazhenov Yu.M., Albakasov A.I. Radiatsionno-zashchitnyye i khimicheski stoykiye sernyye stroitel'nyye materialy [Radiation-protective and chemically resistant sulfur building materials]. Penza, Orenburg: ИПК OSU, 2010. 364 p.

УДК 692.829

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-45-51>

А.П. КОНСТАНТИНОВ, канд. техн. наук (apkonst@yandex.ru), И.С. АКСЕНОВ, магистр (аспирант)

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Анализ существующих подходов к назначению и определению воздухопроницаемости окон

В работе проведен аналитический обзор вопроса определения и назначения воздухопроницаемости оконных конструкций. Для этого были рассмотрены как положения действующей нормативно-технической документации ряда стран, так и результаты проведенных научных исследований по рассматриваемой тематике. В результате установлено, что в настоящее время нормативное значение воздухопроницаемости окон определяется только из условий энергосбережения. При этом данная характеристика назначается для среднестатистических условий эксплуатации. Существующие методы расчета и определения воздухопроницаемости окон не отвечают их реальным условиям эксплуатации, так как не учитывают весь комплекс климатических воздействий, которым подвергаются окна (перепад температуры наружного воздуха, пульсация ветрового давления). Опыт эксплуатации, а также ряд проведенных исследований показывают, что по указанным выше причинам в зимнее время происходит значительное повышение воздухопроницаемости оконных конструкций, это приводит к нарушению комфортности микроклимата вблизи окна (сквознякам и пр.). В практику проектирования следует внедрять нормативное значение воздухопроницаемости, определяемое из условий обеспечения комфортного микроклимата, а также универсальный расчетный метод определения воздухопроницаемости окон, отвечающий их реальным условиям эксплуатации и учитывающий их конструктивные особенности.

Ключевые слова: воздухопроницаемость, окно, тепловая защита, температурные деформации, ветровая нагрузка, энергоэффективность.

Для цитирования: Константинов А.П., Аксёнов И.С. Анализ существующих подходов к назначению и определению воздухопроницаемости окон // *Строительные материалы*. 2021. № 3. С. 45–51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-45-51>

A.P. KONSTANTINOV, Candidate of Sciences (Engineering) (apkonst@yandex.ru), I.S. AKSENOV, Master's degree (postgraduate student)
National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Analysis of Existing Approaches to Specifying and Determining of Window Air Permeability

The paper presents an analytical review of the issue of determining and assigning the air permeability of window structures. For this purpose, both the provisions of the current regulatory and technical documentation of a number of countries, as well as the results of scientific research on the subject under consideration, were considered. As a result, it was established that the current standard value of windows air permeability is specified based only on considerations of energy saving. At the same time, this characteristic is assigned for the statistically average operating conditions. The existing methods for calculating and determining the air permeability of windows don't correspond to the real operating conditions because they don't take into account the whole complex of climatic influences to which the windows are exposed (outside temperature variations, wind pressure pulsation). The experience of operation, as well as a number of studies conducted, shows that for the above reasons, in winter there is a significant increase in the air permeability of window structures, this leads to a violation of the comfort of the microclimate near the window (drafts, etc.). The normative value of windows air permeability specified based on the comfort conditions of microclimate should be introduced in design practice, as well as a universal calculation method for determining the air permeability of windows that meets their real operating conditions and takes into account their design features.

Keywords: air permeability, windows, thermal protection, temperature deformations, wind load, energy efficiency.

For citation: Konstantinov A.P., Aksenov I.S. Analysis of existing approaches to specifying and determining of window air permeability. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 3, pp. 45–51. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-45-51>

Постановка задачи

Воздухопроницаемость является одной из ключевых технико-эксплуатационных характеристик окна. Для климатических условий РФ ее значение особенно остро ощущают в зимний период эксплуатации, когда поступающий внутрь помещения сквозняк неплотности в окне уличный воздух может привести как к снижению качества микроклимата помещения (из-за появления сквозняков, а также снижения температуры на внутренней поверхности окна и образования конденсата), так и к увеличению нагрузки на систему отопления здания [1]. В последнее время актуальным является вопрос обеспечения воздухообмена в помещениях, остекленных совре-

менными типами окон, отличающимися повышенной герметичностью, что также требует обоснования необходимой воздухопроницаемости оконных конструкций [2, 3]. Несмотря на это, вопросом назначения воздухопроницаемости окон на стадии их проектирования в настоящее время уделяется значительно меньшее внимание, чем, например, сопротивлению теплопередаче [4–6]. Во многом это связано с отсутствием системных исследований рассматриваемого вопроса и, как следствие, отсутствием комплексных методик по назначению и определению воздухопроницаемости окон. Целью данной работы является анализ проведенных исследований, касающихся вопроса назначения требуемой и

определения фактической воздухопроницаемости окон, а также разработка перспективных направлений дальнейших исследований в этой области.

Анализ существующего подхода

к назначению требуемой воздухопроницаемости окон

В настоящее время как в отечественной, так и в зарубежной практике строительства требуемая воздухопроницаемость, точнее, сопротивление воздухопроницанию окон назначается только исходя из условий энергосбережения. Данная характеристика используется для расчета потребности в теплоте на нагревание поступающего в помещение уличного воздуха. При этом для ее расчета используются усредненные расчетные климатические условия района строительства (в СП 50.13330 «Тепловая защита зданий» это температура наиболее холодной пятидневки и максимальная из средних скоростей ветра за январь). Данный подход применим для оценки показателей тепловой защиты здания, прежде всего удельных, однако не позволяет гарантированно обеспечить комфортные условия микроклимата вблизи проемов при более жестких расчетных сочетаниях климатических условий. Это особенно актуально в современных условиях, характеризующихся постоянным увеличением размеров оконных конструкций в жилых и общественных зданиях. Следует отметить, что на территории РФ действует ГОСТ Р ИСО 7730 «Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта» (национальная версия международного стандарта ИСО 7730), позволяющий выполнять оценку приемлемости условий окружающей среды для обеспечения теплового комфорта человека. Одним из нормируемых показателей этого документа является локальный дискомфорт из-за сквозняка, который характеризуется локальной скоростью движения воздуха. Очевидно, что при назначении нормируемой воздухопроницаемости оконных конструкций необходимо учитывать данный показатель. Аналогичный подход был предложен еще в 1960-х гг. в [7], где в качестве одного из критериев для определения нормативной воздухопроницаемости окон предлагается использовать скорость воздушной струи, истекающей из щели в притворе окна. Она ограничивается значением 0,1 м/с на расстоянии 400 мм от проема. На основе этого условия можно определить значения воздухопроницаемости окон, обеспечивающие отсутствие ощутимого сквозняка в помещении. Однако данный подход не получил дальнейшего развития и не был внедрен на практике. В [8] авторы настоящей статьи расширяют предлагаемый в [7] подход и дают общую формулировку задачи по разработке подхода, который позволит учесть требования микроклимата при назначении нормативной воздухопроницаемости оконных конструкций.

Анализ существующего подхода

к определению фактической воздухопроницаемости окон

На данный момент еще не разработан универсальный метод расчета фактической воздухопроницаемости окон, который бы базировался на фундаментальных законах и уравнениях аэродинамики [9] и был представлен в виде функции ряда переменных (климатических условий эксплуатации и конструктивных особенностей окна).

Из-за отсутствия подобного метода расчета фактическая воздухопроницаемость окон в настоящее время может быть определена только экспериментальным путем в лабораторных условиях. При этом используются стандартные методики испытаний (в РФ – ГОСТ 26602.2 «Методы определения воздухо- и водопроницаемости», в Европе – EN 1026, в США – ASTM E283 и др.). Существует также ряд стандартов, позволяющих оценить воздухопроницаемость окон в натуральных условиях (ГОСТ 31167 «Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях», ISO 9972, ASTM E779 и др.). Суть всех рассмотренных методов определения воздухопроницаемости окон заключается в создании статической разности давлений по обе стороны испытываемого образца окна и измерении объема воздуха, проходящего сквозь окно при установившемся перепаде давления. Такие измерения повторяют несколько раз при различных перепадах давления воздуха, но при неизменных температурах наружного и внутреннего воздуха. Исходя из этого можно говорить, что испытания проводятся при квазистационарном режиме изменения давления воздуха. Полученные в ходе испытаний зависимости объема проходящего сквозь конструкцию окна воздуха при различных перепадах давления (но при одной температуре наружного и внутреннего воздуха) используются в дальнейшем при определении тепловых потерь здания, рассчитываемых уже для определенных климатических условий эксплуатации.

Следует отметить, что в [7, 10] с использованием вышеуказанного подхода к определению воздухопроницаемости предложены расчетные зависимости между разностью давлений по обе стороны окна ΔP и их объемной воздухопроницаемостью Q в виде квадратичного (1) и степенного (2) уравнения:

$$\Delta P = \alpha Q + \beta Q^2; \quad (1)$$

$$Q = K \Delta P^n, \quad (2)$$

где n – показатель режима фильтрации, равный 0,5–1; α и β – коэффициенты, постоянные для конкретной конструкции окна, определяемые экспериментально.

Каждая из этих зависимостей применима только к конкретному типу окна (с определенными размерами, типом профилей, количеством контуров уплотнения и пр.), поэтому не является универсальной.

При этом квадратичное уравнение может быть получено теоретическим путем [11, 12], в то время как степенное является чисто эмпирическим.

Степенное уравнение в настоящий момент применяется при описании воздухопроницаемости строительных конструкций шире, нежели квадратичное, что связано прежде всего с его удобством. В частности, уравнение данного вида используется при расчете требуемого и фактического сопротивления воздухопроницанию в СП 50.13330. Тем не менее из-за того, что оно не базируется на четко определенной физической модели, методологически неверно строить на нем теоретические рассуждения. Этому есть целый ряд причин:

- коэффициенты этого уравнения не могут быть привязаны к конструктивным особенностям окон (например, к геометрической форме и размерам канала между фальцом створки и рамы окна и пр.);

- показатель режима фильтрации n не является постоянной величиной (меняется от 1 при ламинарном режиме течения до 0,5 при турбулентном) [13] и таким образом сам является функцией от ΔP ;

- данное уравнение не имеет физического смысла [14, 15] и вступает в противоречие с фундаментальным законом механики жидкости и газа – законом подобия Рейнольдса [16];

- кроме того, существует ряд исследований, которые подтверждают, что уравнение (1) лучше согласуется с результатами экспериментальных измерений и CFD-расчетов чем уравнение (2) [11, 17–19].

Обзор прочих факторов, влияющих на фактическую воздухопроницаемость окон

Очевидно, что представленный выше подход к определению воздухопроницаемости окон является сильно упрощенным. При этом возникает ряд вопросов:

- какие еще факторы необходимо учитывать для разработки универсального метода определения воздухопроницаемости окон, отвечающие их реальным условиям эксплуатации (в том числе насколько значительно их влияние на воздухопроницаемость окна и при каких условиях их можно не учитывать)?

- каковы границы применимости рассмотренного выше стандартного подхода к определению воздухопроницаемости окон, а когда нужно учитывать дополнительные факторы?

Ряд проведенных научных исследований показывает, что на воздухопроницаемость окон (помимо гравитационного давления и статического ветрового давления, учитываемых при назначении нормируемой воздухопроницаемости окон исходя из условий энергосбережения) при определенных условиях существенное влияние может оказывать частота порывов ветра (пульсация ветрового давления) [20, 21] и эксплуатационные перепады температуры [22–27]. При этом в [20, 21] установлено, что влияние пульсации ветрового давления на инфильтрацию воздуха

через проемы в наружных ограждающих конструкциях в значительной степени зависит от размеров щелей, расположения проемов, а также режима вентиляции помещений. Очевидно, что этот вопрос требует детального изучения для различных расчетных ситуаций.

Целый ряд исследований показывает, что в зимних условиях эксплуатации воздухопроницаемость оконных конструкций может значительно увеличиваться. Причиной этого являются температурные деформации профильных элементов окна, а также ухудшение плотности прилегания уплотнительных элементов к оконным профилям под действием перепада температуры наружного и внутреннего воздуха. Результаты экспериментальных исследований [28–30] показали, что деформации профильных элементов современных типов окон, прежде всего ПВХ, от действия температурных нагрузок сопоставимы с деформациями от ветровой нагрузки. По видимому, впервые этот феномен был исследован в работе [31], где экспериментально было установлено, что воздухопроницаемость увеличивается при снижении температуры наружного воздуха. Была предложена формула, описывающая изменение воздухопроницаемости при действии отрицательных температур наружного воздуха:

$$Q = Q_0 + S \cdot Q_0 \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где Q – воздухопроницаемость при перепаде температуры по обе стороны окна ΔT ; Q_0 – воздухопроницаемость окна при $\Delta T=0$; S – константа, зависящая от типа окна.

Данная формула, как и формула (2), является чисто эмпирической, коэффициент S в ней может быть определен исключительно экспериментальным путем, и сама она может быть применена к окнам только той конструкции, для которых проводятся экспериментальные исследования.

Следует отметить, что в работе [32] предложен новый метод к определению воздухопроницаемости окон при действии отрицательных температур наружного воздуха, который в настоящее время представлен в американском стандарте ASTM E1424 и существует параллельно со стандартом ASTM E283, определяющим метод испытания на воздухопроницаемость при стандартных условиях. Близкая по идеологии со стандартом ASTM E283 методика определения воздухопроницаемости оконных конструкций с учетом температурных воздействий была запатентована в 2012 г. на территории РФ сотрудниками НИИСФ РААСН [33]. Несмотря на наличие подобных методов испытаний, они практически не применяются на практике из-за отсутствия соответствующих требований в действующей нормативно-технической документации.

Известен также ряд работ зарубежных исследователей, которые представляют результаты испытания окон различной конфигурации и материала на

воздухопроницаемость при различных перепадах температуры [22–24]. Эти исследования демонстрируют факт влияния температурных нагрузок на воздухопроницаемость окон (согласно полученным в этих работах результатам, воздухопроницаемость окон может повышаться в 2–7 раз при снижении температуры наружного воздуха до -30°C). Однако с момента опубликования в 1998 г. исследования [25] к изучению данной темы в США и Канаде больше не возвращались. В упомянутой работе было установлено, что увеличение воздухопроницаемости окон при температурных нагрузках несущественно влияет на энергопотребление зданий. Однако данное заключение было сделано для относительно высоких зимних температур наружного воздуха (-5°C), для которых как раз и выполняется расчет тепловых потерь зданий на территории Канады.

В России, напротив, проблеме изменения воздухопроницаемости оконных конструкций при действии температурных нагрузок начали уделять внимание только в последние 10 лет. Это вызвано массовым применением в отечественном строительстве современных конструкций окон из ПВХ и алюминиевых профилей, а также рядом тенденций в архитектуре и строительстве (существенное увеличение размеров окон, переход на профильные системы с шириной профиля 70 мм и более [34]). С тех пор был проведен ряд экспериментальных исследований отечественных ученых [26, 27, 35], которые подтверждают выводы, сделанные иностранными коллегами: воздухопроницаемость оконных конструкций может увеличиваться в 3–10 раз при снижении температуры наружного воздуха до $-30 - -50^{\circ}\text{C}$. Отечественным ученым принадлежат также первые попытки теоретического описания температурных деформаций оконных конструкций. Упрощенная аналитическая модель, представленная в [36], позволяет определить прогиб ПВХ импоста от линейного перепада температуры между внутренней и наружной его поверхностью. В [37] рассмотрена модель деформации окон из ПВХ профилей, которая учитывает наличие в импосте армирующего вкладыша. Моделирование и прочностная оценка температурного воздействия на оконный блок средствами программного комплекса ANSYS были произведены в [38].

Обсуждение полученных результатов, разработка перспективных направлений исследований

Анализ проведенных исследований показывает, что воздухопроницаемость современных типов окон, особенно из ПВХ профилей, значительно повышается в зимний период эксплуатации вследствие влияния отрицательных температур наружного воздуха. При этом ряд исследований утверждает, что это приводит не только к снижению сопротивления теплопередаче окон, но и к образованию конденсата и изморози на внутренней поверхности оконных профилей [39]. Таким образом,

феномен повышения воздухопроницаемости окон при отрицательных температурах наружного воздуха является достаточно важным и его следует учитывать при назначении конструктивного решения окон, особенно для климатических регионов, отличающихся холодными зимами. Этот феномен также может служить одной из причин введения такого параметра, как климатическая применимость оконных конструкций для различных регионов строительства [35].

По результатам проведенного обзора можно сделать вывод, что для создания универсального метода расчета воздухопроницаемости окон, который наиболее полно описывает процесс инфильтрации воздуха через оконные конструкции в зимних условиях эксплуатации, необходимо следующее:

1. Уточнить модель деформации окна от действия температурных нагрузок путем выявления наиболее значимых факторов (например, влияние температуры на свойства ПВХ и материал уплотнителей).

2. Уточнить модель деформации окна от действия ветровой нагрузки (существующий в настоящее время метод расчета прогибов при действии ветрового давления не учитывает многокомпонентности окна и не отражает его реальной работы под нагрузкой [40]).

3. Объединить обе модели и создать метод расчета деформаций окна от одновременного действия ветровых и температурных нагрузок.

4. Установить взаимосвязь между характером деформаций окна и интенсивностью инфильтрации воздуха через окно.

5. Обосновать расчетные сочетания ветровых и температурных нагрузок, а также нормативное значение воздухопроницаемости оконных конструкций с учетом требования микроклимата помещений.

Выводы

Обзор вопроса назначения нормируемого и определения фактического сопротивления теплопередаче окон показал следующее:

1. В настоящее время нормативное значение воздухопроницаемости окон назначается только из условий энергосбережения. При этом данная характеристика рассматривается для среднестатистических условий эксплуатации.

2. Существующие методы расчета и определения воздухопроницаемости окон не отвечают их реальным условиям эксплуатации, так как не учитывают весь комплекс климатических воздействий, которым подвергаются окна (перепад температуры наружного воздуха, пульсация ветрового давления).

3. Опыт эксплуатации, а также ряд проведенных исследований показывают, что из-за указанных выше причин в зимнее время происходит значительное повышение воздухопроницаемости. Это приводит к нарушению комфортности микроклимата вблизи окна (сквознякам и пр.).

4. Очевидно, что в практику проектирования следует внедрять нормативное значение воздухопроницаемости из условий обеспечения комфортности микроклимата, а также универсальный рас-

четный метод определения воздухопроницаемости окон, отвечающий их реальным условиям эксплуатации и учитывающий конструктивные особенности.

Список литературы

1. Константинов А.П., Верховский А.А. Влияние отрицательных температур на теплотехнические характеристики оконных блоков из ПВХ профилей // *Строительство и реконструкция*. 2019. № 3 (83). С. 72–82. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-83-3-72-82>
2. Дацюк Т.А., Гримитлин А.М. Влияние воздухопроницаемости ограждающих конструкций на энергопотребление жилых зданий // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 6 (65). С. 182–187.
3. Сайфутдинова А.М., Куприянов В.Н. Качественные характеристики воздухообмена жилых помещений и их зависимость от объемно-планировочных и конструктивных решений зданий // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2014. № 1 (27). С. 113–118.
4. Куприянов В.Н., Иванцов А.И. Анализ расчетных методов по оценке сопротивления теплопередаче светопрозрачных ограждающих конструкций // *Приволжский научный журнал*. 2018. № 1 (45). С. 33–42.
5. Коркина Е.В. Критерий эффективности замены стеклопакетов в здании с целью энергосбережения // *Жилищное строительство*. 2018. № 6. С. 6–9.
6. Савин В.К., Савина Н.В. Архитектура и энергоэффективность окна // *Строительство и реконструкция*. 2015. № 4 (60). С. 124–130.
7. Семенова Е.И. Воздухопроницаемость окон жилых и общественных зданий. М.: Стройиздат, 1969. 81 с.
8. Аксёнов И.С., Константинов А.П. Физико-технические основы расчета воздухопроницаемости оконных конструкций. *Актуальные проблемы строительной отрасли и образования: Национальная конференция*. Москва. 2020. С. 810–815.
9. Савин В.К. Строительная физика: аэродинамика и теплообмен при взаимодействии потоков и струй со зданиями. М.: Лазурь, 2008. 480 с.
10. Thomas D.A., Dick J. B. Air infiltration through gaps around windows // *JIHFE*. 1953. Vol. 21. No. 214, pp. 85–97.
11. Hopkins L.P., Hansford B. Air flow through cracks // *Build. Serv. Engr.* 1974. Vol. 42, pp. 123–129.
12. Etheridge D., Sandberg M. Building ventilation: theory and measurement. Chichester: John Wiley & Sons. 1996. p. 754.

References

1. Konstantinov A.P., Verkhovsky A.A. Influence of negative temperatures on the thermal characteristics of PVC windows. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2018. Vol. 83. No. 3, pp. 72–82. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-83-3-72-82>.
2. Datsyuk T.A., Grititlin A.M. The effect of the enclosing structure air permeability value on the energy consumption of residential building. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017. No. 6(65), pp. 182–187. (In Russian).
3. Sayfutdinova A.M., Kupriyanov V.N. Qualitative characteristics of air exchange of premises and their dependence on space-planning and constructive solutions of buildings. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2014. No. 1 (27), pp. 113–118. (In Russian).
4. Kupriyanov V. N., Ivantsov A. I. Analysis of calculating methods for estimation of resistance of light-transparent constructions to heat transfer. *Privolzhskij nauchnyy zhurnal*. 2018. No. 1 (45), pp 33–42.
5. Korkina E.V. Criterion of Efficiency of Glass Units Replacing in the Building with the Purpose of Energy Saving. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2018. No. 6, pp. 6–9. (In Russian).
6. Savin V.K., Savina N.V. Architecture and energy efficiency of a window. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2015. No. 4 (60), pp. 124–130. (In Russian).
7. Semenova E.I. *Vozdukhopronitsaemost' okon zhilykh i obshchestvennykh zdaniy* [Air permeability of residential and public buildings windows]. Moscow: Stroizdat, 1969. 81 p.
8. Aksekov I.S., Konstantinov A.P. Physical and technical basis for calculating the air permeability of window structures. *Actual problems of the construction industry and education: National conference*. Moscow. 2020, pp. 810–815. (In Russian).
9. Savin V.K. *Stroitel'naya fizika: aerodinamika i teploobmen pri vzaimodeistvii potokov i strui so zdaniyami* [Building physics: aerodynamics and heat transfer in the interaction of streams and jets with buildings]. Moscow: Lazur', 2008. 480 p.
10. Thomas D.A., Dick J. B. Air infiltration through gaps around windows. *JIHFE*. 1953. Vol. 21. No. 214, pp. 85–97.
11. Hopkins L.P., Hansford B. Air flow through cracks. *Build. Serv. Engr.* 1974. Vol. 42, pp. 123–129.
12. Etheridge D., Sandberg M. Building ventilation: theory and measurement. Chichester: John Wiley & Sons. 1996, p. 754.

13. Honma H. Ventilation of Dwellings and its Disturbances. Stockholm: Faibo Grafiska. 1975.
14. Лобанов В.А. Проблемы нормирования воздухопроницаемости светопрозрачных ограждающих конструкций зданий. *Энергосбережение и экология в строительстве и ЖКХ, транспортная и промышленная экология: Международная конференция*. Москва. 2020. С. 101–108.
15. Савин В.К. Строительная физика: энергоперенос, энергоэффективность, энергосбережение М.: Лазурь. 2005. 432 с.
16. Etheridge D.W. Crack Flow Equations and Scale Effect // *Building and Environment*. 1977. Vol. 12, pp. 181–189.
17. Baker P. H., Sharples S., Ward I. C. Air Flow Through Cracks // *Building and Environment*. 1987. Vol. 4. No. 22, pp. 293–304.
18. Chiu Y.-H., Etheridge D. W. Calculations and notes on the quadratic and power law equations for modelling infiltration // *International Journal of Ventilation*. 2002. Vol. 1, pp. 65–77.
19. Etheridge D.W. A note on crack flow equations for ventilation modelling // *Building and Environment*. 1998. Vol. 33. No. 5, pp. 325–328.
20. Kraniotis D., Thiis T. K., Aurlien T. A Numerical study on the impact of wind gust frequency on air exchanges in buildings with variable external and internal leakages // *Buildings*. 2014. Vol. 4, pp. 27–42.
21. Etheridge D. Unsteady flow effects due to fluctuating wind pressures in natural ventilation design – Mean flow rates // *Building and Environment*. 2000. Vol. 35. No. 2, pp. 111–133.
22. Fleury G., Thomas M. Variation to window air permeability according to outside temperature // *Cahiers Du Centre Scientifique et Technique Du Batiment*. 1972. No. 132.
23. Elmahdy A.H. Air leakage characteristics of windows subjected to simultaneous temperature and pressure differentials. *Conf. Proc. Window Innovations*. 1995, pp. 146–163.
24. Air Infiltration rate of windows under temperature and pressure differentials // CANMET Report. Natural Resources Canada, 1995.
25. Henry R., Patenaude A. Measurements of Window Air Leakage at Cold Temperatures and Impact on Annual Energy Performance of a House // *ASHRAE trans*. 1998. Vol. 104 (1b), pp. 1254–1260.
26. Шеховцов А.В. Воздухопроницаемость оконного блока из ПВХ профилей при действии отрицательных температур // *Вестник МГСУ*. 2011. № 3–1. С. 263–269.
27. Konstantinov A., Verkhovsky A. Assessment of the Negative Temperatures Influence on the PVC Windows Air Permeability. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. 022092. doi:10.1088/1757-899X/753/2/022092
28. Verkhovskiy A., Bryzgalin V., Lyubakova E. Thermal deformation of window for climatic conditions of Russia. *IOP Conf. Series: Materials Science and*
13. Honma H. Ventilation of Dwellings and its Disturbances. Stockholm: Faibo Grafiska. 1975.
14. Lobanov V.A. Problems of normalizing the air permeability of translucent building structures. *Energy saving and ecology in construction and utilities sector, transport and industrial ecology: International conference*. Moscow. 2020, pp. 101–108.
15. Savin V.K. Stroitel'naya fizika: energoperenos, energoeffektivnost', energosberezhenie [Construction physics: energy transfer, energy efficiency, energy saving]. Moscow: Lazur'. 2005. 432 p.
16. Etheridge D.W. Crack Flow Equations and Scale Effect. *Building and Environment*. 1977. Vol. 12, pp. 181–189.
17. Baker P. H., Sharples S., Ward I. C. Air Flow Through Cracks. *Building and Environment*. 1987. Vol. 4. No. 22, pp. 293–304.
18. Chiu Y.-H., Etheridge D. W. Calculations and notes on the quadratic and power law equations for modelling infiltration. *International Journal of Ventilation*. 2002. Vol. 1, pp. 65–77.
19. Etheridge D.W. A note on crack flow equations for ventilation modeling. *Building and Environment*. 1998. Vol. 33. No. 5, pp. 325–328.
20. Kraniotis D., Thiis T. K., Aurlien T. A Numerical study on the impact of wind gust frequency on air exchanges in buildings with variable external and internal leakages. *Buildings*. 2014. Vol. 4, pp. 27–42.
21. Etheridge D. Unsteady flow effects due to fluctuating wind pressures in natural ventilation design—Mean flow rates. *Building and Environment*. 2000. Vol. 35. No. 2, pp. 111–133.
22. Fleury G., Thomas M. Variation to window air permeability according to outside temperature. *Cahiers Du Centre Scientifique et Technique Du Batiment*. 1972. No. 132.
23. Elmahdy A.H. Air leakage characteristics of windows subjected to simultaneous temperature and pressure differentials. *Conf. Proc. Window Innovations*. 1995, pp. 146–163.
24. Air Infiltration rate of windows under temperature and pressure differentials. CANMET Report. Natural Resources Canada, 1995.
25. Henry R., Patenaude A. Measurements of Window Air Leakage at Cold Temperatures and Impact on Annual Energy Performance of a House. *ASHRAE trans*. 1998. Vol. 104 (1b), pp. 1254–1260.
26. Shekhovtsov A.V. Air permeability of an PVC-window when exposed to freezing temperatures. *Vestnik MGSU*. 2011. No. 3–1, pp. 263–269. (In Russian).
27. Konstantinov A., Verkhovsky A. Assessment of the Negative Temperatures Influence on the PVC Windows Air Permeability. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. 022092. doi:10.1088/1757-899X/753/2/022092.
28. Verkhovskiy A., Bryzgalin V., Lyubakova E. Thermal deformation of window for climatic conditions of Russia. *IOP Conf. Series: Materials Science and*

- Engineering*. 2018. Vol. 463. 032048. doi:10.1088/1757-899X/463/3/032048
29. Konstantinov A., Verkhovsky A. Assessment of the Wind and Temperature Loads Influence on the PVC Windows Deformation. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. 032022. doi:10.1088/1757-899X/753/3/032022
 30. Елдашов Ю.А., Сесюнин С.Г., Ковров В.Н. Экспериментальное исследование типовых оконных блоков на геометрическую стабильность и приведенное сопротивление теплопередаче от действия тепловых нагрузок // *Вестник МГСУ*. 2009. № 3. С. 146–149.
 31. Bursey T., Green G.H. Combined thermal and air leakage performance of double hung windows // *ASHRAE trans*. 1970. Vol. 76. No. 2, pp. 215–226.
 32. Kehrli D.W. Window air leakage performance as a function of differential temperatures and accelerated environmental aging // *Thermal performance of exterior envelopes of building III*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1985. pp. 872–890.
 33. Патент РФ 2445610 С1. Способ определения воздухопроницаемости строительных ограждающих конструкций / Верховский А.А., Шубин И.Л., Шеховцов А.В. Заявл. № 2010151153/28 от 15.12.2010. Опубл. 20.03.2012.
 34. Куренкова А.Ю. Уроки 2010 года, или особенности изготовления оконных блоков из ПВХ-профилей шириной более 68 мм // *Светопрозрачные конструкции*. 2011. № 1–2. С. 10–12.
 35. Верховский А.А., Зимин А.Н., Потапов С.С. Применимость современных светопрозрачных ограждающих конструкций для климатических регионов России // *Жилищное строительство*. 2015. № 6. С. 16–19.
 36. Власенко Д.В. Почему коробит окно. Кто виноват и что делать? // *Оконное производство*. 2014. № 39. С. 42–44.
 37. Калабин В.А. Оценка величины тепловой деформации ПВХ-профиля. Ч. 1. Зимние поперечные деформации // *Светопрозрачные конструкции*. 2013. № 1–2. С. 6–9.
 38. Сесюнин С.Г., Елдашов Ю.А. Моделирование сопряженной задачи термоупругости на примере анализа вариантов конструктивного оформления оконного блока зданий // *Светопрозрачные конструкции: Интернет-журнал*. № 4. 2005.
 39. Константинов А.П., Крутов А.А., Тихомиров А.М. Оценка теплозащитных характеристик оконных блоков из ПВХ профилей в зимний период эксплуатации // *Строительные материалы*. 2019. № 8. С. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-65-72>.
 40. Константинов А.П. Вопросы расчета оконных блоков из ПВХ на ветровую нагрузку // *Перспективы науки*. 2018. № 1 (100). С. 26–30.
 - Engineering*. 2018. Vol. 463. 032048. doi:10.1088/1757-899X/463/3/032048.
 29. Konstantinov A., Verkhovsky A. Assessment of the Wind and Temperature Loads Influence on the PVC Windows Deformation. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. 032022. doi:10.1088/1757-899X/753/3/032022.
 30. Eldashov Y.A., Sesyunin S.G., Kovrov V.N. Experimental study of typical window blocks on geometric stability and reduced resistance to heat transfer from the action of thermal loads. *Vestnik MGSU*. 2009. No. 3, pp. 146–149. (In Russian).
 31. Bursey T., Green G.H. Combined thermal and air leakage performance of double hung windows. *ASHRAE trans*. 1970. Vol. 76. No. 2, pp. 215–226.
 32. Kehrli D.W. Window air leakage performance as a function of differential temperatures and accelerated environmental aging. *Thermal performance of exterior envelopes of building III*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1985, pp. 872–890.
 33. Patent RF 2445610 C1. *Sposob opredeleniya vozdukhopronitsaemosti stroitel'nykh ograzhdayushchikh konstruksii* [Method for determining the air permeability of building enclosing structures]. Verkhovskii A.A., Shubin I.L., Shekhovtsov A.V. Declared 15.12.2010. Published. 20.03.2012. (In Russian).
 34. Kurenkova A.Yu. Lessons from 2010, features of manufacturing window blocks from PVC with a width more than 68 mm. *Svetoprozrachnye konstruksii*. 2011. No 1–2, pp. 10–12. (In Russian).
 35. Verkhovsky A.A., Zimin A.N., Potapov S.S. The applicability of modern translucent walling for the climatic regions of Russia. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2015. No. 6, pp. 16–19. (In Russian).
 36. Vlasenko D.V. Why it warps the windows. Who is to blame and what to do? *Okonnoe proizvodstvo*. 2014. No. 39, pp. 42–44. (In Russian).
 37. Kalabin V.A. Assessment of PVC profile thermal deformation. Part 1. Winter transverse deformations. *Svetoprozrachnye konstrukcii*. 2013. No. –2, pp. 6–9. (In Russian).
 38. Sesyunin S.G., Eldashov Yu.A. Modeling of a thermo elasticity conjugate problem on the example of various variants of window block structural design. *Svetoprozrachnye konstruksii: Internet-journal*. 2005. No. 4. (In Russian).
 39. Konstantinov A.P., Krutov A.A., Tikhomirov A.M. Assessment of the PVC windows thermal characteristics in winter. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 8, pp. 65–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-65-72>
 40. Konstantinov A.P. Calculation of PVC window blocks for wind load. *Perspektivy nauki*. 2018. No. 1 (100), pp. 26–30. (In Russian).

Т.Ю. УМАРОВ, канд. техн. наук (utulkun@mail.ru), С.З. РАЗЗОКОВ, инженер

ООО «Научно-исследовательский и инжиниринговый центр «УзстройматериалЛИТИ» (100047, г. Ташкент, ул. Таффакур, 68а)

Регенерация хризотил-асбеста из техногенных отходов хризотилцементной промышленности

Рассматриваемая работа выполнена на основе патента № IP 03210 «Способ извлечения асбеста из асбозурита – отхода производства асбестоцементных изделий». Опытно-промышленная линия изготовлена и смонтирована в соответствии с разработанным технологическим регламентом последовательной очистки асбестоцементных отходов от цемента, начиная с их отмывки на вибросите водой до завершающей процесс химической обработки. В результате было получено хризотилевое волокно чистотой 95–95%. Замена товарного хризотила в смеси при производстве шифера регенерированным волокном в количестве 10–15% позволила получить кондиционный шифер, отвечающий ГОСТ 30340–2012. Для осуществления поставленной задачи были разработаны специальное четырехполочное вибросито, позволяющее при небольших габаритах 1×2×2 м отмывать до 10 м³ шлама/ч; четырехкамерная мельница-барaban, растирающая фарфоровыми шарами без разрушения все поступающие от вибросита волокна; система химической обработки хризотил-асбеста, нейтрализации, обезвоживания и упаковки готовой продукции. Комплект оборудования установлен в крытом помещении на бетонном основании. Линию обслуживают три оператора в смену. Режим работы непрерывный, в соответствии с режимом работы шиферного цеха. Производительность опытно-промышленной линии составляет 800–1000 кг/сут.

Ключевые слова: асбестоцемент, хризотилевое волокно, шифер, отходы.

Для цитирования: Умаров Т.Ю., Раззиков С.З. Регенерация хризотил-асбеста из техногенных отходов хризотилцементной промышленности // *Строительные материалы*. 2021. № 3. С. 52–56. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-52-56>

T.Yu. UMAROV, Candidate of Sciences (Engineering) (utulkun@mail.ru), S.Z. RAZZOKOV, Engineer
LLC Research and Engineering Center "UzbuildmaterialLITI" (68a, Taffakur Street, Tashkent, 100047, Republic of Uzbekistan)

Chrysotile-Asbestos Regeneration from Technogenic Waste of the Chrysotile-Cement Industry

The work under consideration is based on Patent No. IP 03210 "Method for extracting asbestos from diatomaceous-silica asbestos - waste from the production of asbestos-cement products". The pilot production line is manufactured and installed in accordance with the developed technological regulations for the sequential cleaning of asbestos-cement waste from cement, starting with their washing on a vibrating screen with water until the final chemical treatment process. As a result, chrysotile fiber was obtained with a purity of 95–95%. The replacement of commercial chrysotile with regenerated fiber in the amount of 10–15% in the mixture when producing the slate made it possible to obtain a conditioned slate that meets GOST 30340–2012. To implement this task, a special four-shelf vibrating screen which makes it possible to wash up to 10 m³ of sludge/h with a small size of 1×2×2 m; a four-chamber drum mill that grinds all the fibers coming from the vibrating screen with porcelain balls without destruction; a system of chemical treatment of chrysotile-asbestos, neutralization, dewatering and packaging of finished products have been developed. The set of equipment is installed in a covered room on a concrete base. The line is served by three operators per shift. The operating mode is continuous, in accordance with the operating mode of the slate shop. The production capacity of the pilot production line is 800–1000 kg/day.

Keywords: asbestos-cement, chrysotile fiber, slate, waste.

For citation: Umarov T.Yu., Razzikov S.Z. Chrysotile-asbestos regeneration from technogenic waste of the chrysotile-cement industry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 3, pp. 52–56. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-52-56>

Для решения задач ускоренного развития промышленности строительных материалов в Республике Узбекистан была выполнена работа по созданию технологии извлечения из влажных асбестоцементных отходов волокон асбеста с целью их повторного использования в производстве асбестоцементных изделий. Работа выполнена научно-исследовательским и инжиниринговым центром «УзстройматериалЛИТИ» с привлечением республиканского гранта Министерства инновационного развития на переработку местных промышленных отходов [1]. Цель данного исследования связана с отсутствием в Узбекистане своих месторождений хризотил-асбеста; импорт его осуществляется из соседних государств и поэтому хризотил-асбест является дорогой составляющей производимой продукции.

К так называемым влажным отходам относятся отходы отстойника и относительно обезвоженные

отходы отвалов. В общей сложности в отходы уходит в среднем 1,5–2% от массы смеси цемента и хризотила (сухие отходы – бой шифера и труб – составляют до 4%).

Влажные отходы образуются в листоформовочных машинах (ЛФМ) в самом начале образования хризотилцементной пленки на сетчатых барабанах. Чистый сетчатый барабан, вращаясь, погружается в хризотилцементную пульпу, через сетку проходят цементный раствор и часть волокон хризотил-асбеста. При дальнейшем погружении барабана волокна быстро забивают отверстия сетки 0,35×0,35 мм, интенсивность прохождения массы внутрь барабана замедляется, пленка утолщается, и при полном обороте барабана образовавшаяся пленка толщиной 2–3 мм снимается идущим поверху сеточного барабана сукном, сетка очищается и в очередной раз погружается в массу; цикл повторяется.



Рис. 1. Шламохранилище Ахангаранского шиферного завода
Fig. 1. Sludge storage of Akhangaran Shifter Plant

Часть массы, которая с каждым оборотом собирается внутри барабана, откачивается в большие металлические отстойники, где цемент и хризотил-асбест осаждаются; 1/3 осевшей массы возвращается в ЛФМ, а 2/3 идут в отстойник. В каждой ЛФМ по три сетчатых барабана; Ахангаранский шиферный комбинат имеет шесть линий, работающих круглосуточно. Когда работают 70–80% ЛФМ, за сутки образуется 70–100 м³ мокрых отходов. В бетонированных отстойных бассейнах суспензия оседает, и грейферный кран сначала выгребает загустевшую массу на наклонную в сторону бассейна площадку, а после ее обезвоживания загружает отходы в самосвалы, которые отвозят их в отвалы.

На Ахангаранском отвале мокрые и сухие отходы накапливаются почти 55 лет и, по разным источникам, превышают 1 млн т (рис. 1).

На Кувасайском шиферном заводе, который работает более 60 лет, действуют пять машин. Отходами засыпали горную лощину, объем скопившихся отходов, по оценкам экспертов, составляет также около 1 млн т. В Бекабаде самый старый завод имеет две линии, объем накопленных отходов составляет около 250 тыс. т.

Всего в настоящее время в Республике Узбекистан построено порядка 40 шиферных линий, а общий объем отходов по приблизительным расчетам специалисты оценивают в 2,5–3 млн т.

Длительными исследованиями специалистами центра установлена возможность выделения асбестовых волокон из продуктов гидратации цемента с сохранением при этом армирующих характеристик волокон, что и позволяет использовать их в технологии повторно. Это вторичное сырье снизит цену шифера и уменьшит объемы ввозимого в страну хризотил-асбеста. При решении поставленной задачи проведены:

- разработка и изготовление технологического оборудования для максимальной и бережной очистки асбестовых волокон от продуктов гидратации цемента с сохранением их адгезионных и когезионных свойств;
- отработка технологии выделения асбестовых волокон из влажных продуктов уноса асбеста и цемента.

По мнению ряда зарубежных авторов, неподтвержденных экспериментальными данными, асбестовые волокна постепенно выделяются из шифера в свободном от цемента состоянии и причиной этим вред здоровью людей. Казалось, того же следует ожидать от влажных и свежезатвердевших гидратированных хризотил-асбестоцементных отходов, в которых волокна еще слабо скреплены цементом. Однако петрография и другие методы исследования показали существенную связанность волокон с цементом и даже их химическое взаимодействие, препятствующее выделению волокон в атмосферу в свободном состоянии [2–5].

Проведены поиски оптимальных способов извлечения волокон хризотила из хризотилцементных отходов и их очистки от продуктов гидратации цемента, в основном от гидроксида кальция. Было опробовано много различных методов, традиционно используемых для очистки поверхности волокон. Ультразвуковое воздействие на компоненты в жидкой среде дало эффект очистки от цемента при времени обработки до 5 мин, но при большем времени прочность волокон снижалась. При очищении волокон в дисковом истирателе волокна хризотила сильно повреждались. Очищение волокон на вибросите острой вертикально направленной струей воды давало только 40–50% очистки хризотила. Очищение волокон до 50–60% было достигнуто во вращающемся барабане с фарфоровыми шарами в жидкой среде в

Химический состав хризотила после различных стадий очистки
(Chemical composition of chrysotil after various purification stages)

Стадия обработки влажных отходов	Содержание основных оксидов в исследованных волокнах хризотила, %				Расчетное содержание хризотила, %
	SiO ₂	CaO	MgO	Прочие	
Без обработки, после слива в отстойник	19,5	52,2	5,1	23,2	7–9
После комплекта вибросит (1-я стадия)	30,1	31,5	20,1	18,3	50–60
После мельницы с фарфоровыми шарами (2-я стадия)	33,4	20,3	30,4	18,6	60–75
После обработки 10%-й азотной кислотой (3-я стадия)	46,6	1,2	45,2	7	85–95

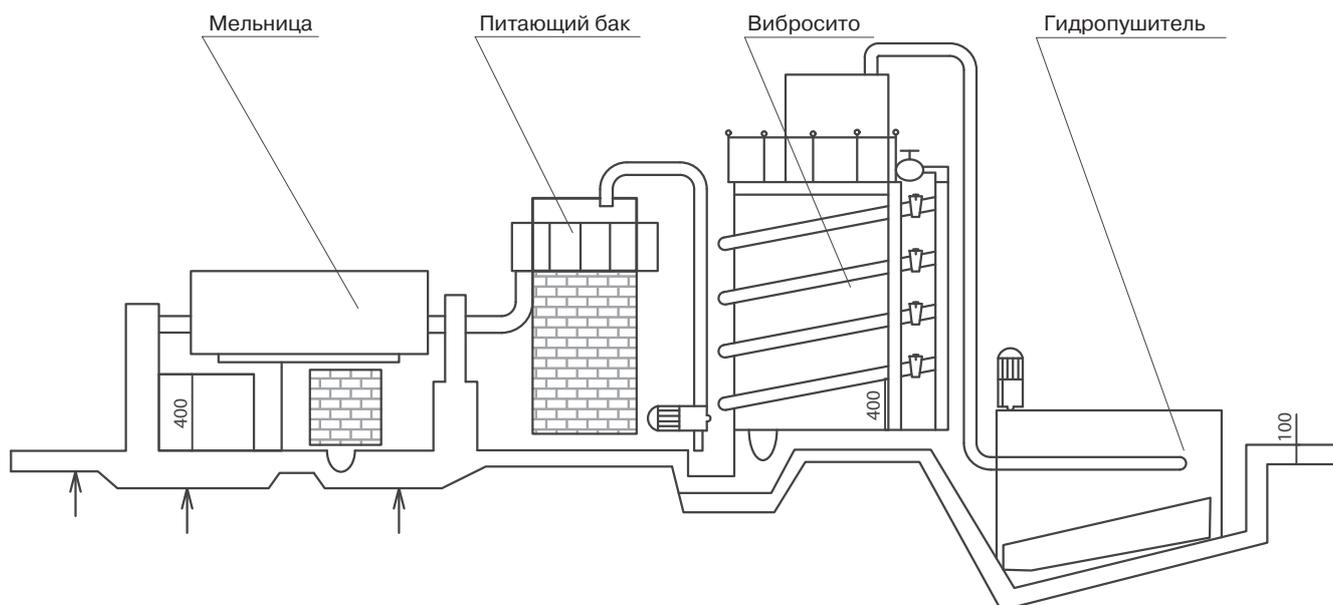


Рис. 2. Схема расстановки оборудования цеха регенерации хризотил-асбеста из влажных отходов хризотилцементного производства
Fig. 2. Arrangement of equipment of chrysotile-asbestos recovery workshop from wet wastes of chrysotile cement production

течение 40–60 с; при более длительном воздействии волокна перетирались.

Наиболее эффективной оказалась химическая обработка 10%-й азотной кислотой отдельных волокон и их пучков, связанных продуктами гидратации цемента. При этой обработке растворение гидроксида и карбоната кальция достигало 80–95%. Окончание выделения пузырьков CO_2 говорит о завершении реакции. Однако, учитывая, что в отходах хризотилцементного производства содержится только 5–7% волокон, для извлечения их из всего объема отходов понадобилось бы очень большое количество реагентов: метод становится экономически неэффективным.

Как оптимальное решение для очистки отходов было совмещено три из опробованных способов: промывка отходов основного производства острой струей воды на виброситах, затем истирание уловленных ситами волокон в жидкой среде во вращающемся барабане и последнее – химическая обработка продукта. После двух стадий очистки выделенное волокно соответствует марке хризотил-асбеста А-6-46 и пригодно в составе смеси с маркой А-5-50 для выпуска качественного шифера. Дальнейшая обработка кислотой позволяет получать регенерированное хризотилое волокно марки А-5-50 [6].

Для этого разработано и изготовлено специальное оборудование (рис. 2, 3). Технологическая линия была смонтирована в непосредственной близости от отстойника, куда сливаются хризотилцементные отходы со всех пяти листоформовочных машин. Из отстойника грейферным краном в бункер заливается шлам, он самотеком поступает в гидропушитель и там активно перемешивается в течение 10–15 мин мощным насосом для получения гомогенизированной массы шлама. Затем смесь подается в верхний

бункер емкостью 3 м³ и оттуда дозированным самотеком идет на четырехрядный каскад вибросит с размером ячеек 0,5×0,5 мм для первой стадии очистки. Отмытые потоками воды от свободных частиц волокна подаются на вторую стадию очистки в многокамерный барабан с фарфоровыми шарами для мягкого перетирания и счистки с них налипших карбонатов и гидроксида кальция. Завершающая третья стадия очистки состоит в кратковременной химической обработке поверхности волокон от оставшихся продуктов гидратации цемента, в том числе внутри пучков, заполненных этими продуктами. Важно, что при каждом примененном способе очистки волокон и при их совокупном применении каких-либо нарушений целостности волокон не было обнаружено.

В таблице представлены изменения химического состава смесей после каждой стадии очистки.



Рис. 3. Общий вид установки регенерации хризотил-асбеста
Fig. 3. General view of chrysotile asbestos regeneration unit

Если в исходных отходах листоформовочных машин хризотила содержалось 5–7%, а гидроксида кальция 50–52%, то после третьей стадии обработки отходов хризотилых волокон в продукте было соответственно 85–95%, а гидроксида кальция 5–12%.

Для проверки сортности регенерируемого хризотила были отобраны средние пробы после второй и третьей стадий их очистки – из барабана и после химической обработки. Просевы проб в заводской лаборатории показали, что после барабана хризотил соответствует марке А-6-45, а после химической обработки он соответствует уже марке А-5-50. Мы объясняем это тем, что кислота, растворяя оставшиеся пучки гидроксида кальция, освобождает практически все волокна асбеста, имеющиеся в шламе. В патенте № IP 03210 от 2005 г. отмечено, что для растворения в отходах продуктов гидратации цемента использовали соляную кислоту, однако в настоящее время она причислена к прекурсорам, требующим постоянного контроля в применении, не производится в Узбекистане и имеет высокую стоимость. В экспериментах ее заменили технической азотной кислотой той же концентрации, что дало положительный эффект и снизило стоимость химической обработки волокон в три раза [6, 7].

Полученные результаты подтвердили эффективность выбранных способов очистки волокон асбеста от продуктов гидратации портландцемента. Самое важное при этом, что выбранные способы очистки волокон хризотила восстанавливают их адсорбционную способность к цементу. После проведенной очистки волокон хризотила от цемента их обезвоживают с помощью заводских вакуум-насосов, используемых на переключниках шиферных листов, до влажности 25–35% и упаковывают в полипропиленовые мешки по 40 кг. Один раз в смену накопленный регенерированный хризотил-асбест отвозится на склад сырья и с помощью весовых дозаторов его вводят в смесь вместо 10–15% товарного асбеста, после чего такая композиция поступает в бегуны и далее все идет по традиционной технологии. Для оценки качества полученного шифера в производственном цеху АО «Ахангараншифер» на листоформовочной машине № 1 изготовили две опытные партии листов. В смесях заменяли последовательно 10 и 15% товарного хризотил-асбеста марки А-5-50 на регенерированный асбест марки А-6-45. Каких-либо изменений в работе листоформовочных машин не было отмечено. Свойства готовых листов опытных партий были в пределах требований ГОСТ 30340–2012.

Результаты работы показали перспективность разработанного способа и экономическую целесообразность реализации этой технологии не только для Узбекистана, но и в целом для развития отрасли, для экологии, для решения вопросов защиты отрасли от обвинений во вредности больших асбестоцементных отвалов [9, 10].

Стоимость хризотила, извлеченного предложенным способом, в разы меньше, чем стоимость им-

портируемого Узбекистаном асбеста; в настоящее время она достигает 600 долл. США за 1 т, тогда как стоимость асбеста, регенерированного разработанным способом непосредственно в асбестоцементном производстве, составляет 150–200 долл. США за 1 т. Особую эффективность данный способ имеет для заводов стран Центральной Азии, удаленных на тысячи километров от месторождений асбеста. В огромных хвостохранилищах крупных шиферных заводов Республики Узбекистан за 50–70 лет работы каждого завода накопилось несколько миллионов тонн отходов, данные отходы можно условно считать техногенными месторождениями хризотила.

Полная переработка всех асбестоцементных отходов рядом с предприятиями также представляется очень выгодной: первое – это получение регенерированного асбеста из отходов; второе – использование того, что осталось после извлечения волокон, а это до 90% от всей массы шлама [9]. Остаток можно использовать как ценное сырье для производства цемента, так как это прогидратированный цемент и в нем имеются все необходимые компоненты для повторного обжига и получения цемента. В то же время вредный для цемента оксид магния удален вместе с асбестом, требуется лишь небольшая корректировка отходов известняком. В полупромышленной печи из данных отходов, подкорректированных известняком, в меньшем количестве, чем при рядовом обжиге, нами был получен цемент прочностью 45–47 МПа. При этом расходы тепла на обжиг такой смеси стали существенно ниже, чем при традиционном обжиге с известняком. Это связано с тем, что традиционно используемый в производстве цемента известняк требует для своего разложения до 1780 кДж/кг, что является основной статьей расхода. При получении цемента из отходов асбестоцементного производства кальцийсодержащим компонентом в шламе будет $\text{Ca}(\text{OH})_2$, который требует для разложения всего 600–700 кДж/кг. И наконец, существенная польза от утилизации сброшенных отходов – освобождение многих гектаров площадей вокруг предприятий, уменьшение пылевых загрязнений воздуха и почвы за счет фильтрации щелочной жидкости в водоносные слои [11, 12].

Выводы

1. Проведенные исследования впервые показали возможность получения из влажных отходов шиферного производства регенерированных волокон хризотила требуемого качества для частичной замены природного асбеста в производстве хризотилцементных изделий.

2. Разработано, изготовлено и опробовано в Узбекистане на Ахангаранском шиферном заводе технологическое оборудование для выделения из отходов хризотилых волокон, их очистки от цементсодержащих компонентов, замены в смесях этими очищенными волокнами части товарного хризотила

с получением по традиционной технологии стандартного шифера.

3. Теоретически и практически обоснована возможность использования цементсодержащих отходов, оставшихся после выделения асбестовых волокон в качестве сырья для производства портландцемента.

4. Для кардинального и наиболее выгодного решения проблем утилизации отходов асбестоцементной промышленности считаем необходимым именно совокупную регенерацию волокон асбеста и оставшейся после этого цементсодержащей составляющей как сырья для получения энергосберегающего портландцемента.

Список литературы

1. Постановление Президента Республики Узбекистан «О дополнительных мерах по ускоренному развитию промышленности строительных материалов и привлечения инвестиций для переработки местных минеральных ресурсов» ПП-4335 от 23 мая 2019 г.
2. Лугинина И.Г., Везенцев А.И., Нейман С.М., Турский В.В., Наумова Л.Н., Нестерова Л.Л. Изменение свойств хризотил-асбеста в асбестоцементных изделиях под действием цементного камня и погодных факторов // *Строительные материалы*. 2001. № 9. С. 16–18.
3. Нейман С.М., Везенцев А.И., Кашанский С.В. О безопасности асбестоцементных материалов и изделий. М.: Стройматериалы, 2006. 63 с.
4. Нейман С.М., Попов К.Н., Межов А.Г. Исследование свойств хризотилцементных кровельных листов различного срока эксплуатации // *Строительные материалы*. 2011. № 5. С. 86–88.
5. Беркович Т.М. Основы технологии асбестоцемента. Стройиздат, 1979. 233 с.
6. Патент РУз № IAP 03210. Способ извлечения асбеста из асбозурита-отхода производства асбестоцементных изделий / Умаров Т.Ю. Заявл. 14.01.2004. Оpubл. 27.10.2006.
7. Патент РУз № FAR20190196. Способ извлечения хризотила из отходов хризотилцементного производства / Умаров Т.Ю., Раззоков С.З. Заявл. 14.10.2019.
8. Иванова И.В. Фазовый состав и гидравлическая активность продуктов термического разложения твердых отходов асбестоцементного производства // *Строительные материалы*. 1993. № 4. С. 22–23.
9. Соломатов В.И., Коренькова С.Ф., Чумаченко Н.Г. Новый подход к проблеме утилизации отходов в стройиндустрии // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2000. № 1. С. 28–29.
10. Руди Ф.А., Бродский В.П., Горобчан С.И. Теплоизоляционные плиты на основе отходов асбестоцементного производства // *Строительные материалы*. 1973. № 7. С. 33–34.
11. Багаутдинов А.А., Нейман С.М. Утилизация асбестоцементных отходов в производстве строительных материалов // *Строительные материалы*. 1993. № 4. С. 5–7.
12. Манакова Н.С., Кашанский С.В., Плотко Э.Г., Селянкина К.П., Макаренко Н.П. Использование асбестоцемента: эколого-гигиенические аспекты // *Строительные материалы*. 2001. № 9. С. 19–20.

References

1. The President's decree "On additional measures to accelerate the development of the construction materials industry and attract investment for the processing of local mineral resources." PR-4335, May 23, 2019.
2. Luginina I.G., Vezentsev A.I., Neyman S.M., Turskiy V.V., Naumova L.N., Nesterova L.L. Change in chrysotylasbest properties in asbestos cement products under the influence of cement stone and weather factors. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2001. No. 9, pp. 16–18. (In Russian).
3. Neyman S.M., Vezentsev A.I., Khashanskiy S.V. On the safety of asbestos cement materials and products. Moscow. Stroyaterialy. 2006. 63 p.
4. Neyman S.M., Popkov K.N., Mezhev A.G. Study of the properties of chrysotile cement sheets of different lifetime. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2011. No. 5, pp. 86–88. (In Russian).
5. Berkovich T.M. *Osnovy tekhnologii asbestotsementa [Basics of asbestos cement technology]*. Stroyizdat. 1979. 233 p.
6. Patent RUz № IAP 03210. Asbestos extraction from asbestos-waste productions. Umarov T.Yu. Declared 14.01.2004. Published 27.10.2006.
7. Patent RUz № FAR20190196. Chrysotil extraction from chrysotil cement waste. Umarov T.Yu., Razzokov S.Z. Declared 14.10.2019.
8. Ivanova I.V. Phase composition and hydraulic activity of thermal decomposition products of asbestos cement solid waste. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 1993. No. 4, pp. 22–23. (In Russian).
9. Solomatov V.I., Koren'kova S.F., Chumachenko N.G. New approach to waste management in the construction industry. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. 2000. No. 1, pp. 28–29. (In Russian).
10. Rudi F.A., Brodskij V.P., Gorobchan S.I. Heat insulation slabs based on asbestos cement production wastes. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 1973. No. 7, pp. 33–34. (In Russian).
11. Bagautdinov A.A., Neyman S.M. Asbestos cement waste disposal in construction materials production. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 1993. No. 4, pp. 5–7. (In Russian).
12. Manakova N.S., Kashanskiy S.V., Plotko Je.G., Seljankina K.P., Makarenko N.P. Use of asbestos cement: environmental aspects. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2001. No. 9, pp. 19–20. (In Russian).

С.В. ФЕДОСОВ^{1,2}, д-р техн. наук, академик РААСН (fedosov-academic53@mail.ru);
В.И. ГОЛОВАНОВ³, д-р техн. наук; А.А. ЛАЗАРЕВ⁴, канд. пед. наук; М.В. ТОРОПОВА⁵, канд. техн. наук,
В.Г. МАЛИЧЕНКО⁵, соискатель кафедры естественных наук и техносферной безопасности (mvg84@bk.ru)

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

² Поволжский государственный технологический университет (424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3)

³ Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны
Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации
последствий стихийных бедствий (143903, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12)

⁴ Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (153040, г. Иваново, пр. Строителей, 33)

⁵ Ивановский государственный политехнический университет (153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 21)

О проблеме совершенствования строительных изделий, обеспечивающих пожарную безопасность малоэтажных зданий

Малоэтажное строительство активно развивается, а вместе с ним рынок строительных материалов и изделий претерпевает изменения. При этом более 80% пожаров происходит именно в жилом секторе. Предотвратить, минимизировать потенциальный ущерб возможно на основе анализа причин возникновения этих пожаров в малоэтажных зданиях. В этой связи авторами систематизированы подходы к обеспечению пожарной безопасности малоэтажных зданий и сооружений в современных условиях, разработаны рекомендации по использованию строительных изделий для решения подобных задач. Какие мероприятия помогут избежать и вовремя обнаружить возникновение пожароопасной ситуации при эксплуатации малоэтажных зданий и сооружений? С целью решения вопросов multifunctionality и предупреждения о пожаре в малоэтажных зданиях предлагается использовать интерактивное строительное изделие, которое позволяет автоматизировать процесс сообщения о возникновении пожара собственнику. Включение подобного строительного изделия в систему «умный дом» синхронизирует его работу с охраняемыми системами, повышая уровень обеспечения комплексной безопасности малоэтажных домов. Предложенные пути совершенствования подходов к обеспечению безопасности малоэтажных зданий и сооружений способствуют не только своевременному обнаружению пожара, но и оперативному реагированию на возникшую опасность. Способ предотвращения распространения пожара на объектах малоэтажной жилой застройки с использованием интерактивного противопожарного строительного изделия поможет сохранить человеческие жизни.

Ключевые слова: пожарная безопасность, малоэтажные здания, строительные материалы и изделия.

Для цитирования: Федосов С.В., Голованов В.И., Лазарев А.А., Торопова М.В., Маличенко В.Г. О проблеме совершенствования строительных изделий, обеспечивающих пожарную безопасность малоэтажных зданий // *Строительные материалы*. 2021. № 3. С. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-57-63>

S.V. FEDOSOV^{1,2}, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAACS (fedosov-academic53@mail.ru); V.I. GOLOVANOV³, Doctor of Sciences Engineering; A.A. LAZAREV⁴, Candidate of Sciences (Engineering); M.V. TOROPOVA⁵, Candidate of Sciences (Engineering);

V.G. MALICHENKO⁵, postgraduate student of the Department of Natural Sciences and Technosphere Safety (mvg84@bk.ru)

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

² Volga State Technological University (3, Lenin Square, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation)

³ All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (12, microdistrict VNIPO, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

⁴ Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (33, Stroiteley avenue, Ivanovo, 153040, Russian Federation)

⁵ Ivanovo State Polytechnical University (21, Sheremetevsky Avenue, Ivanovo, 153000, Russian Federation)

On the Problem of Improving Construction Products that Ensure Fire Safety of Low-Rise Buildings

Low-rise construction is actively developing, and with it the market of building materials and products is undergoing changes. Moreover, more than 80% of fires occur in the residential sector. It is possible to prevent and minimize possible damage on the basis of the analysis of the causes of their occurrence in low-rise buildings. In this regard, the authors have systematized approaches to ensuring fire safety of low-rise buildings and structures in modern conditions, developed recommendations for the use of building products to solve such problems. What measures will help to avoid and detect the occurrence of a fire hazard in the operation of low-rise buildings and structures in time? To solve the issues of multifunctionality and fire warning in low-rise buildings, it is proposed to use an interactive construction product that makes it possible to automate the process of reporting the occurrence of a fire to the owner. The inclusion of such a construction product in the "smart home" system synchronizes its work with security systems, increasing the level of comprehensive security of low-rise buildings. The proposed ways for improving approaches to ensure the safety of low-rise buildings and structures contribute not only to the timely detection of fire, but also to the rapid response to the danger that has arisen. A way to prevent the spread of fire at objects of the low-rise residential development with the use of an interactive fire-fighting building product will help save human lives.

Keywords: fire safety, low-rise buildings, building materials and products.

For citation: Fedosov S.V., Golovanov V.I., Lazarev A.A., Toropova M.V., Malichenko V.G. On the problem of improving construction products that ensure fire safety of low-rise buildings. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 3, pp. 57–63. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-57-63>



Рис. 1. Применение строительных материалов для несущих конструкций малоэтажного жилого строительства

Fig. 1. Application of building materials for load-bearing structures of low-rise residential construction

В мире широкое распространение получило строительство малоэтажных зданий и сооружений, потребность в которых постоянно возрастает. Так, в США более половины жилой недвижимости приходится на малоэтажные дома для одной или двух семей. В Российской Федерации, согласно данным Федеральной службы государственной статистики, в 2017 г. площадь жилого фонда составила 3,78 млрд м², из них 3,47 млрд м² приходилось на дома, построенные населением [1]. Строительство зданий высотой от одного до трех этажей активно развивается, а вместе с ним претерпевает изменения рынок строительных материалов и изделий. Как видно из данных, представленных на рис. 1, в 2017 г. основными видами применяемых строительных материалов для возведения жилого фонда в России стали древесина (31%) и кирпич (29%). Количество построенных деревянных домов составило 75 тыс. шт. Деревянное зодчество является значимой частью русской культуры и во многом определяет ее национальную самобытность. Дерево как строительный материал еще не исчерпало свой потенциал.

Значительную сложность представляет обеспечение пожарной безопасности таких объектов. Отметим, что в России более 70% пожаров происходит в жилом секторе [2]. Так, например, в Ивановской области в 2019 г. произошли пожары в 320 многоквартирных жилых домах, что на 65% больше, чем в многоквартирных жилых домах. Особо отметим пожары, которые перешли с одной постройки на другую или на несколько построек. Данные о таких пожарах в Ивановской области за 2014–2018 гг. приведены на рис. 2.

Предотвратить, минимизировать ущерб от пожаров возможно на основе анализа причин их возникновения в малоэтажных зданиях. Существуют разные подходы к систематизации причин возникновения пожаров. На основании данных, представленных в [3–11], рассмотрены причины, способствующие созданию пожароопасных условий. Установлено, что для учета причин пожаров и анализа обеспечения пожарной безопасности малоэтажных зданий и соору-

Construction of low-rise buildings and structures is widespread in the world. The need for these buildings is constantly increasing. In the United States, more than half of residential properties are low-rise homes for one or two families. In the Russian Federation, according to the Federal state statistics service, in 2017, the area of the housing stock was 3780 million m², of which 3469 million m² accounted for houses built by the population [1]. The construction of buildings with a height of one to three floors is actively developing. At the same time, the market of construction materials and products is undergoing changes. Fig. 1 shows that in 2017, wood (31%) and brick (29%) were the main types of construction materials used for the construction of housing in Russia. The number of wooden houses built was 75 thousand. Wooden architecture is an important part of Russian culture and largely determines its national identity. Wood as a building material has not yet exhausted its potential.

Ensuring the fire safety of such facilities is a significant challenge. In Russia, more than 70% of fires occur in the residential sector [2]. For example, in the Ivanovo region in 2019, there were fires in 320 single-family residential buildings, which is 65% more than in multi-family residential buildings. Especially note the fires that have moved from one building to another or to several buildings. Data on such fires in the Ivanovo region for 2014–2018 are shown in Fig. 2.

It is possible to prevent and minimize damage from fires by analyzing the causes of their occurrence in low-rise buildings. There are different approaches to systematizing the causes of fires. Based on the data presented in [3–11], the reasons contributing to the creation of fire-hazardous conditions are considered. Different criteria are used in different countries of the world to account for the causes of fires and analyze the fire safety of low-rise buildings and structures (table). The presented data allow us to determine the primary causes of fires [12–14]:

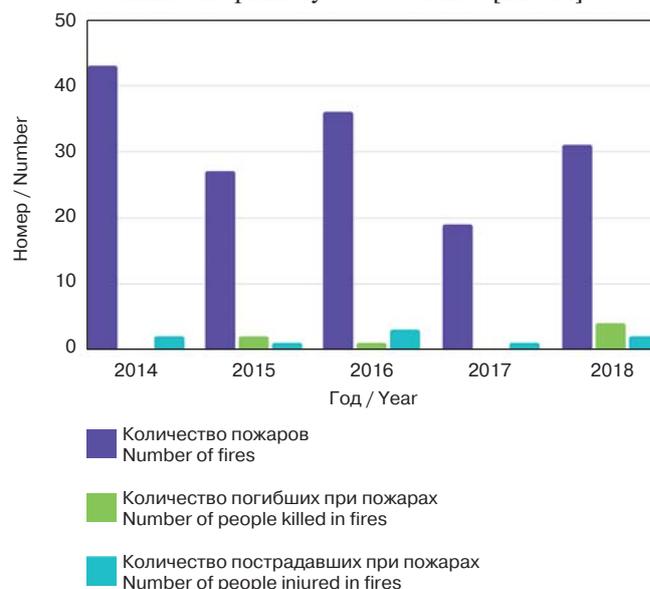


Рис. 2. Статистические данные по пожарам в группе зданий на территории Ивановской области в 2014–2018 гг.

Fig. 2. Statistical data on fires in a group of buildings in the Ivanovo region in 2014–2018

**Сравнительный анализ причин, применяющийся в мировой практике
при определении уровня пожарной безопасности зданий
Comparative world practice of analyzing the causes of fires in determining the level of fire safety of buildings**

Страна The name of the country	Основные причины пожаров Main causes of fires	Кол-во пожаров в 2017 г., % Number of fires in 2017, %
США USA	Поджог Arson	3,5
	Игра с огнем Play with fire	0,3
	Курение Smoking	1,7
	Обогрев Heating	7,4
	Приготовление пищи Cooking	42,2
	Неисправность электрооборудования Electrical equipment failure	5,3
	Техника Technic	2,5
	Открытое пламя Open flame	3,5
	Другие источники тепла Other heat sources	2,7
	Другое оборудование Other equipment	1
	Природные Natural	1,3
	Незащищенность Insecurity	1,6
	Неисправность оборудования, отказ Hardware failure, failure	1,7
	Другие непреднамеренные Other unintentional	5,8
Причина расследуется The cause is under investigation	1,1	
Неизвестные Unknown	18,4	
Великобритания Great Britain	Поджог Arson	9
	Курение Smoking	57
	Приготовление пищи Cooking	4
	Использование свечей The use of candles	17
	Электроприборы Electrical appliance	6
	Неосторожность, игра с огнем Carelessness, playing with fire	4
	Другие Other	3

Страна The name of the country	Основные причины пожаров Main causes of fires	Кол-во пожаров в 2017 г., % Number of fires in 2017, %
Россия Russia	Установленный поджог Established arson	11
	Неисправность производственного оборудования, нарушение технологического процесса производства Malfunction of production equipment, violation of the production process	0,4
	Нарушение правил устройства и эксплуатации электрооборудования Violation of the rules for the installation and operation of electrical equipment	30
	Нарушение правил устройства и эксплуатации печей Violation of the rules for the construction and operation of furnaces	15
	Нарушение правил устройства и эксплуатации теплогенерирующих агрегатов и установок Violation of the rules of construction and operation of heat generating units and installations	0,4
	Нарушение правил устройства и эксплуатации газового оборудования Violation of the rules of installation and operation of gas equipment	0,9
	Неосторожное обращение с огнем, в том числе шалость детей с огнем Careless handling of fire, including children's pranks with fire	29,7
	Нарушение правил устройства и эксплуатации транспортных средств Violation of the rules of construction and operation of vehicles	1,3
	Нарушение правил устройства и эксплуатации транспортных средств Violation of the rules of construction and operation of vehicles	6,7
	Нарушение правил пожарной безопасности при проведении электрогазосварочных работ Violation of fire safety rules during electric and gas welding works	0,7
	Нарушение правил эксплуатации бытовых газовых, керосиновых, бензиновых и других устройств Violation of the rules of operation of domestic gas, kerosene, gasoline, etc. devices'	0,1
	Нарушение правил пожарной безопасности при проведении огневых работ (отогревание труб, двигателей и пр.) Violation of fire safety rules during fire operations (heating pipes, engines, etc.)	0,3
	Взрывы Explosions	0,1
	Нарушение правил пожарной безопасности при использовании пиротехнических изделий Violation of fire safety rules when using pyrotechnic products	0,1
	Самовозгорание веществ и материалов Spontaneous combustion of substances and materials	0,4
	Грозовые разряды Lightning discharges	0,3
	Неустановленные причины Unidentified reasons	1,1
Прочие Othe	1,5	

жений в разных странах мира применяют различные критерии (см. таблицу). Представленные данные позволяют установить первоочередные причины пожаров [12–14]:

- в США – приготовление пищи; неисправность электрооборудования;
- в Великобритании – курение; использование свечей;
- в России – нарушение правил устройства и эксплуатации электрооборудования; неосторожное обращение с огнем.

Какие мероприятия помогут избежать и вовремя обнаружить возникновение пожароопасной ситуации при эксплуатации малоэтажных зданий и сооружений? Во-первых, огнезащитные составы и материалы обеспечивают требуемые параметры пожарной безопасности. Это хорошо изученные в строительном материаловедении [15–17]:

- огнезащитные штукатурки;
- огнезащитные краски;
- огнезащитные облицовки.

Во-вторых, современные «интеллектуальные» строительные материалы помогают визуально идентифицировать повышение температуры в помещении. Так, например, в арсенале проектировщиков имеются:

- извещающие о пожаре обои, изготовленные с использованием огнестойкой неорганической бумаги на основе сверхдлинных нанопроволок гидроксиапатита и термочувствительных датчиков оксида графена [18];
- цементные композиты, армированные металлической фиброй, с улучшенными электрическими свойствами [19];
- бетоны, содержащие углеродные волокна [20].

В-третьих, несомненно, значительную роль в своевременном обнаружении пожара играют средства пожарной автоматики. Например, автономный пожарный извещатель, срабатывающий при задымлении, способен ночью разбудить при пожаре. Однако СП 5.13130.2009 [18] предписывает установку таких извещателей только в помещениях квартир и комнат общежитий исключительно специализированных жилых домов, предназначенных для проживания престарелых лиц и инвалидов. Целесообразно рекомендовать к использованию автономные пожарные извещатели и для мониторинга состояния защищенности малоэтажных зданий, расположенных близко друг к другу. Важно при этом дифференцировать подход к группам населения с разным уровнем достатка, предусмотрев возможность полной или частичной компенсации затрат на выполнение защитных противопожарных мер малообеспеченными гражданами.

С целью решения вопросов многофункциональности и предупреждения о пожаре в малоэтажных зданиях предлагается использовать интерактивное строительное изделие, модель которого представлена на рис. 3.

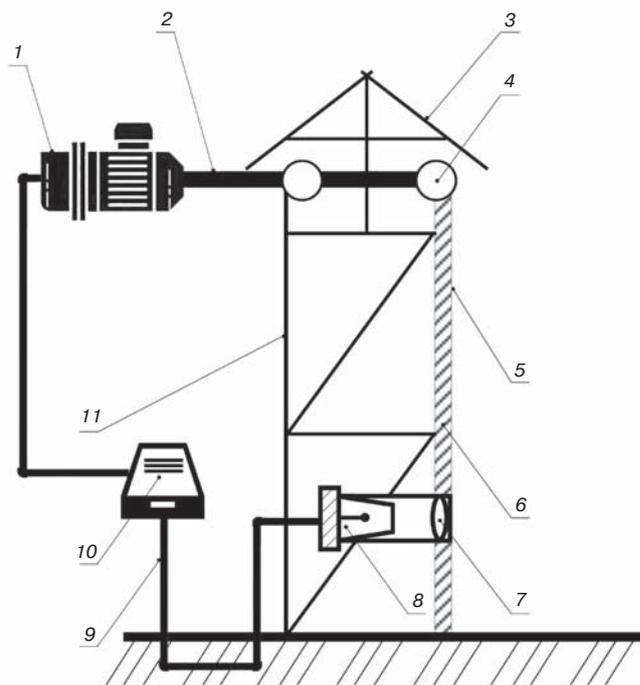


Рис. 3. Модель интерактивного противопожарного строительного изделия, предназначенного для предупреждения о пожаре: 1 – насос для подачи воды на охлаждение изгороди; 2 – водонапорная арматура; 3 – кровля для защиты от осадков (здесь также возможно установление солнечных батарей в случае автономной работы); 4 – перфорированный сухотруб для подачи воды на охлаждение изгороди; 5 – первая отражающая поверхность (здесь на сталь наносится светоотражающее покрытие); 6 – теплоизоляция; 7 – капсула с тепловым пожарным извещателем; 8 – тепловой пожарный извещатель; 9 – слаботочные провода; 10 – блок управления; 11 – вторая отражающая поверхность

Fig. 3. Model interactive fire building products for the prevention of fire: 1 – pump for water supply to cool the fence; 2 – water fittings; 3 – roof for protection from precipitation (here it is also possible to install solar panels in case of Autonomous operation); 4 – perforated dry pipe for water supply to cool the fence; 5 – the first reflective surface (here a reflective coating is applied to steel); 6 – thermal insulation; 7 – capsule with a thermal fire detector; 8 – a thermal fire detector; 9 – low – current wires; 10 – control unit; 11 – second reflecting surface

- in the United States-cooking; electrical failure;
- in the UK – smoking; use of candles;
- in Russia – violation of the rules of installation and operation of electrical equipment; careless handling of fire.

What measures will help to avoid and detect the occurrence of a fire hazard in the operation of low-rise buildings and structures in time? First, flame retardants and materials provide the required fire safety parameters. These are well-studied in construction materials science [15–17]:

- fire-resistant plasters;
- retardant paint;
- fire-resistant linings.

Secondly, modern “intelligent” building materials help to visually identify the increase in temperature in the room. For example, in the Arsenal of designers there are:

- fire-warning Wallpaper made using fire-resistant inorganic paper based on ultra-long hydroxyapatite nanowires and thermosensitive graphene oxide sensors [18];
- cement composites reinforced with metal fiber with improved electrical properties [19];
- concretes containing carbon fibers [20].

Third, undoubtedly, a significant role in the timely detection of fire is played by means of fire automation. For

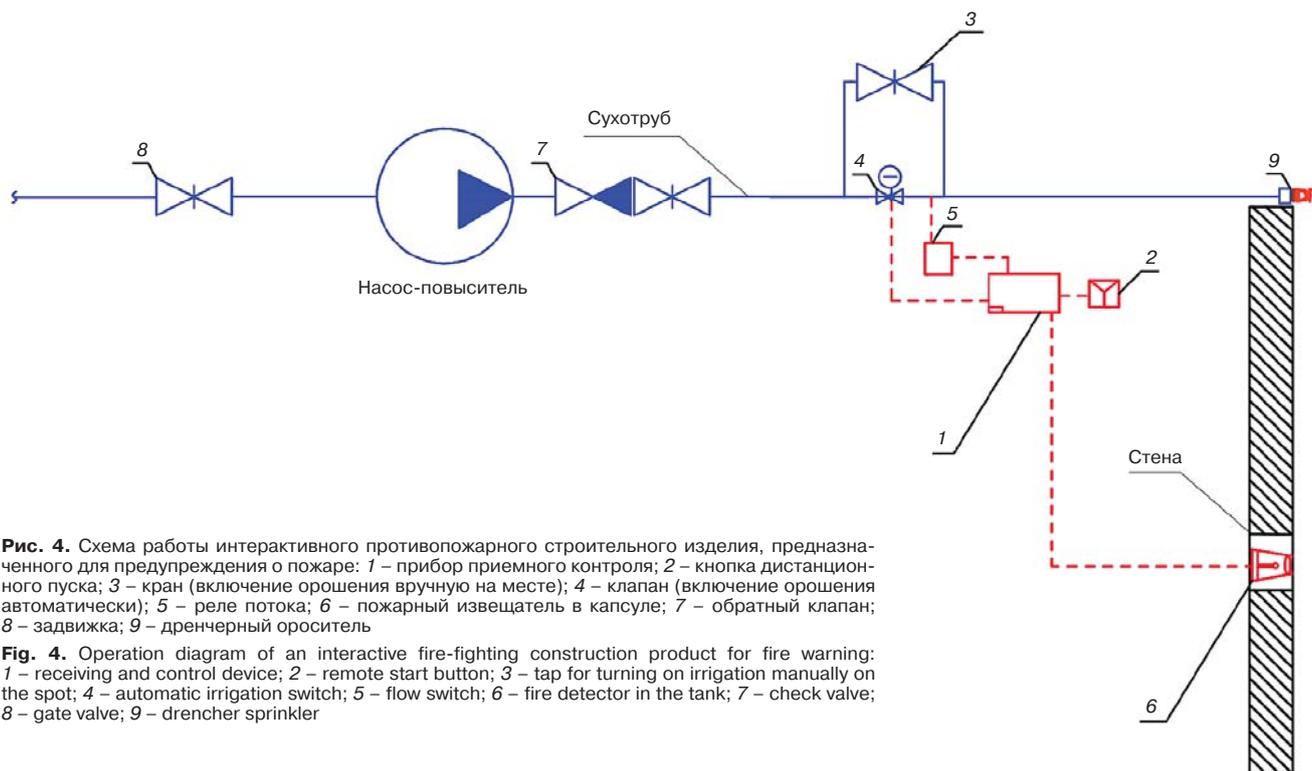


Рис. 4. Схема работы интерактивного противопожарного строительного изделия, предназначенного для предупреждения о пожаре: 1 – прибор приемного контроля; 2 – кнопка дистанционного пуска; 3 – кран (включение орошения вручную на месте); 4 – клапан (включение орошения автоматически); 5 – реле потока; 6 – пожарный извещатель в капсуле; 7 – обратный клапан; 8 – задвижка; 9 – дренчерный ороситель

Fig. 4. Operation diagram of an interactive fire-fighting construction product for fire warning: 1 – receiving and control device; 2 – remote start button; 3 – tap for turning on irrigation manually on the spot; 4 – automatic irrigation switch; 5 – flow switch; 6 – fire detector in the tank; 7 – check valve; 8 – gate valve; 9 – drencher sprinkler

На рис. 4 представлена схема работы интерактивного противопожарного строительного изделия, предназначенного для предупреждения о пожаре.

Для уменьшения мощности теплового потока вторичного излучения, а также улучшения интерактивной противопожарной функциональности необходимо реализовать ряд мероприятий:

- устройство двух отражающих поверхностей и создание конвективного канала;
- закрепление теплоизолирующего покрытия на отражающей поверхности;
- нанесение на поверхность изгороди с защищаемой стороны термочувствительной краски для определения момента наступления периода для охлаждения конструкции водой;
- установка на высоте не выше 0,5 м от уровня земли тепловых пожарных извещателей для организации оповещения людей, находящихся в малоэтажном доме и на прилегающей территории.

При комплексном решении проблем ложных срабатываний устанавливаемых пожарных извещателей возможна автоматизация процессов сообщения о возникновении пожара собственнику, а также включения систем активной противопожарной защиты. Включение данных систем в систему «умный дом» и синхронизация с охранными системами и системами видеонаблюдения позволят расширить возможности искусственного интеллекта в вопросах обеспечения комплексной безопасности малоэтажных домов.

В заключение отметим, что пожары всегда являлись серьезным бедствием, разрушающим малоэтажные дома и уносящие жизни людей. Конструктивные

example, an Autonomous fire detector that is triggered by smoke can Wake you up at night in case of a fire. However, National standard SP 5.13130.2009 [18] prescribes the installation of such detectors only in the premises of apartments and dormitories of exclusively specialized residential buildings intended for the elderly and disabled. It is advisable to recommend the use of Autonomous fire detectors for monitoring the security status of low-rise buildings located close to each other. At the same time, it is important to differentiate the approach to population groups with different levels of income, providing for the possibility of full or partial compensation for the cost of performing protective fire protection measures by low-income citizens.

In order to solve the issues of multifunctionality and fire prevention in low-rise buildings, it is proposed to use an interactive construction product. The model of this product is shown in Fig. 3.

Figure 4 shows how an interactive fire-fighting construction product works. This product is intended for fire warning purposes.

To reduce the power of the secondary radiation heat flow and improve interactive fire protection functionality, a number of measures must be implemented:

- the device of two reflecting surfaces and the creation of a convective channel;
- fixing the heat-insulating coating on the reflective surface;
- applying heat-sensitive paint to the surface of the fence from the protected side to determine the moment when the period for cooling the structure with water begins;
- installation of thermal fire detectors at a height not higher than 0.5 m from the ground level to alert people who are in a low-rise building and in the surrounding area.

особенности малоэтажных жилых домов и хозяйственных построек во многом определяют их пожарную опасность. Независимо от социально-экономического положения владельцы рассматриваемых зданий должны концентрировать свое внимание не только на предупреждении пожаров, но и на создании необходимых условий для успешной локализации очага пожара. Проживающим в этих домах людям не следует пренебрегать соблюдением противопожарных норм. Предложенные пути совершенствования подходов к обеспечению комплексной безопасности малоэтажных зданий и сооружений способствуют не только своевременному обнаружению пожара, но и оперативному реагированию на возникшую опасность. Способ предотвращения распространения пожара на объектах малоэтажной жилой застройки с использованием интерактивного противопожарного строительного изделия поможет сохранить человеческие жизни.

Список литературы

1. Российский статистический ежегодник: Стат. сб. М.: Росстат. P76. 686 с.
2. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2018 году». М.: МЧС России. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2019. 344 с.
3. Кошмаров Ю.А. Теплотехника. М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. 501 с.
4. Ройтман М.Я., Комиссаров Е.П., Пчелинцев В.А. Пожарная профилактика в строительстве. М.: Стройиздат, 1978. 368 с.
5. Козлачков В.И., Ягодка Е.А., Волошенко А.А. Оценка пожарных разрывов с учетом воздействия теплового потока на имущество // *Технологии техносферной безопасности*. 2016. № 3 (67). С. 40–44.
6. Козлачков В.И., Ягодка Е.А. Оперативная обработка информации при оценке угрозы причинения вреда лучистым теплом: Монография. М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. 228 с.
7. Козлачков В.И., Лобаев И.А., Волошенко А.А. Проблема оценки пожарных рисков при применении требований пожарной безопасности по ограничению распространения пожара // *Технологии техносферной безопасности*. 2016. № 2 (66). С. 79–81.
8. Гоман П.Н., Соболевская Е.С. Разработка программы расчета интенсивности теплового излучения при пожаре // *Технологии техносферной безопасности*. 2016. № 1 (65). С. 250–257.
9. Fedosov S., Vatin N., Lazarev A., Malichenko V., Toropova M. The fire-resistant construction for building safety. *Proceedings of EECE 2019. EECE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 70. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42351-3_28

With a comprehensive solution to the problems of false positives of installed fire detectors, it is possible to automate the processes of reporting the occurrence of a fire to the owner and enabling active fire protection systems. The inclusion of these systems in the “smart home” system and synchronization with security systems and video surveillance systems will expand the capabilities of artificial intelligence in ensuring comprehensive security of low-rise buildings.

Fires have always been a serious disaster. They destroyed low-rise buildings and took the lives of people. The design features of low-rise residential buildings and outbuildings largely determine their fire hazard. Regardless of the socio-economic situation, the owners of the buildings under consideration should focus not only on fire prevention, but also on creating the necessary conditions for the successful localization of the fire source. People who live in these homes should avoid a nihilistic approach to compliance with fire regulations. The proposed ways to improve approaches to ensuring comprehensive safety of low-rise buildings and structures contribute not only to timely detection of fire, but also to rapid response to the danger. A way to prevent the spread of fire on low-rise residential buildings using an interactive fire-fighting construction product will help save lives.

References

1. Rossiyskiy statisticheskiy yezhegodnik. Statisticheskiy sbornik [Russian statistical Yearbook. Statistical collection]. Moscow: Rosstat. 2017. P76. 686 p.
2. State report “On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2018”. Moscow: EMERCOM of Russia. 2019. 344 p. (In Russian).
3. Koshmarov Y. A. Teplotekhnika [Heat engineering]. Moscow: IKTS “Akademkniga”. 2006. 501 p.
4. Roitman M.Y., Komissarov E.P., Pchelintsev V.A. Pozharnaya profilaktika v stroitel'stve [Fire prevention in construction]. Moscow: Stroizdat. 1978. 368 p.
5. Kozlachkov V.I., Yagodka E.A., Voloshenko A.A. Assessment of fire breaks taking into account the impact of heat flow on property. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti*. 2016. No. 3 (67), pp. 40–44. (In Russian).
6. Kozlachkov V.I., Yagodka E.A. Operativnaya obrabotka informatsii pri otsenke ugrozy prichineniya vreda luchistym teplom: monografiya [Operational processing of information when assessing the threat of harm by radiant heat: monograph]. Moscow: Academy of GPS EMERCOM of Russia. 2013. 228 p.
7. Kozlachkov V. I., Lobaev I. A., Voloshenko A. A. The Problem of fire risk assessment when applying fire safety requirements to limit the spread of fire. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti*. 2016. No. 2 (66), pp. 79–81. (In Russian).
8. Goman P.N., Sobolevskaya E.S. Development of a program for calculating the intensity of thermal radiation in a fire. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti*. 2016. No. 1 (65), pp. 250–257. (In Russian).
9. Fedosov S., Vatin N., Lazarev A., Malichenko V., Toropova M. The fire-resistant construction for build-

10. Лазарев А.А., Коноваленко Е.П., Кутепов А.С. Аспекты взаимодействия органов местного самоуправления в весенне-летний пожароопасный период. *Сборник материалов II межвузовской научно-практической конференции «Современные пожаро-безопасные материалы и технологии», посвященной Году пожарной охраны России*. Иваново, 2016. С. 72–74.
11. Лазарев А.А., Коноваленко Е.П. Результаты проверки противопожарного водоснабжения в границах населенных пунктов Ивановской области. Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов. *Материалы III Всероссийской научно-практической конференции, посвященной Году пожарной охраны*. Иваново. 2016. С. 64–65.
12. Голд Н., Гугелев А.В., Чистякова С.В. Тенденции в стратегии развития малоэтажного домостроения в США // *Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета*. 2017. № 5 (69). С. 54–59.
13. Fire in the United States 2008–2017. U.S. Fire Administration. URL: <https://www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/publications/fius20th.pdf>
14. Detailed analysis of fires attended by fire and rescue services in England. URL: <https://www.gov.uk/government/collections/fire-statistics-great-britain>
15. Пособие по определению пределов огнестойкости строительных конструкций, параметров пожарной опасности материалов. Порядок проектирования огнезащиты. М.: ОАО «НИЦ «Строительство», 2013. 45 с.
16. Кузнецова И.С., Рябченкова В.Г., Корнюшина М.П., Саврасов И.П., Востров М.С. Полипропиленовая фибра – эффективный способ борьбы со взрывообразным разрушением бетона при пожаре // *Строительные материалы*. 2018. № 11. С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-765-11-15-20>
17. Голованов В.И., Павлов В.В. Экспериментальные исследования огнестойкости блоков обделки тоннельных коллекторов // *Пожарная безопасность*. 2011. № 4. С. 81–89.
18. Chen F.F., Zhu Y.J., Chen F., Dong L.Y., Yang R.L., Xiong, Z.C. Fire alarm wallpaper based on fire-resistant hydroxyapatite nanowire inorganic paper and graphene oxide thermosensitive sensor. *ACS Nano*. 2018. 12 (4), pp. 3159–3171. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b00047>
19. Demircilioğlu E., Teomete E., Schlangen E., Baeza F.J. Temperature and moisture effects on electrical resistance and strain sensitivity of smart concrete. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 224, pp. 420–427. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.091>
20. Chung D.D.L. Self-monitoring structural materials. *Materials Science and Engineering R: Reports*. 1998. Vol. 22 (2), pp. 57–78. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(97\)00021-1](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(97)00021-1)
- ing safety. *Proceedings of EECE 2019. EECE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 70. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42351-3_28
10. Lazarev A.A., Konovalenko E.P., Kutepov A.S. Aspects of interaction of local self-government bodies in the spring-summer fire-dangerous period. *Collection of materials of the II interuniversity scientific and practical conference “Modern fire-safe materials and technologies”, dedicated To the year of fire protection of Russia*. Ivanovo. 2016, pp. 72–74. (In Russian).
11. Lazarev A.A., Konovalenko E.P. Results of checking fire-fighting water supply in the borders of settlements of the Ivanovo region. Topical issues of improvement of engineering systems to ensure fire safety of objects. *Material of the III all-Russian scientific-practical conference dedicated to the Year of fire protection*. Ivanovo. 2016, pp. 64–65. (In Russian).
12. Gold N., Gogolev A.V., Chistyakov V. S. Trends in the strategy of development of low housing construction in USA. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo sotsial’no-ekonomicheskogo universiteta*. 2017. No. 5 (69), pp. 54–59. (In Russian).
13. Fire in the United States 2008–2017. U.S. Fire Administration. URL: <https://www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/publications/fius20th.pdf>
14. Detailed analysis of fires attended by fire and rescue services in England. URL: <https://www.gov.uk/government/collections/fire-statistics-great-britain>
15. Manual for determining the limits of fire resistance of building structures, fire hazard parameters of materials. The procedure for the design of fire protection. JSC “SIC CONSTRUCTION”. Moscow: 2013. 45 p. (In Russian).
16. Kuznetsova I.S., Ryabchenkova V.G., Korniyushina M.P., Savrasov I.P., Vostrov M.S. Polypropylene fiber is an effective way to struggle with the explosion-like destruction of concrete in case of fire. *Stroitel’nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 11, pp. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-765-11-15-20> (In Russian).
17. Golovanov V.I., Pavlov V.V. Experimental studies of fire resistance of tunnel collector lining blocks. *Pozharnaya bezopasnost’*. 2011. No. 4, pp. 81–89. (In Russian).
18. Chen F.F., Zhu Y.J., Chen F., Dong L.Y., Yang R.L., Xiong, Z.C. Fire alarm wallpaper based on fire-resistant hydroxyapatite nanowire inorganic paper and graphene oxide thermosensitive sensor. *ACS Nano*. 2018. 12 (4), pp. 3159–3171. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b00047>
19. Demircilioğlu E., Teomete E., Schlangen E., Baeza F.J. Temperature and moisture effects on electrical resistance and strain sensitivity of smart concrete. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 224, pp. 420–427. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.091>
20. Chung D.D.L. Self-monitoring structural materials. *Materials Science and Engineering R: Reports*. 1998. Vol. 22 (2), pp. 57–78. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(97\)00021-1](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(97)00021-1)

ВЭЙ ТЯНЬ^{1, 2}, д-р, вице-главный инженер, компания «Развитие китайского государственного строительства за рубежом» (tian_wei@cscecos.com); ШОУЧАО ЦЗЯН³, профессор; САИД ШЕБЛ⁴, профессор

¹ Восьмое инженерное подразделения китайской государственной строительной корпорации, Лтд. (Шанхай, Китай)

² Китайская государственная строительная корпорация (ЕГИПЕТ) (Каир, Египет)

³ Колледж гражданского строительства, университет Тунцзи (Шанхай, Китай)

⁴ Директор института строительной физики, жилищно-строительный национальный научно-Исследовательский Центр (Каир, Египет)

Проектирование и практика огнестойкого абстрактного композита

Противопожарная защита имеет решающее значение для высотных зданий, особенно для высотных зданий со стальными конструкциями. Требование четырехчасовой огнестойкости для заполненной бетоном стальной трубчатой колонны (CFT) является довольно сложной задачей, и для решения этой проблемы предлагается композитный метод огнезащиты, учитывающий функцию бетона внутри. Сначала вводится теория метода композитной огнезащиты, а затем разрабатывается конструкция композитной огнезащиты, проводится конечно-элементный анализ теплопередачи и структурных реакций для проверки несущей способности стальной трубчатой колонны при пожаре и соответствующей корректировки конструкции огнезащиты. Представлен план испытаний теплопередачи на натурном участке колонны ЦФТ при четырехчасовом огневом воздействии и испытаний механических свойств стали и бетона при повышенных температурах. Наконец, для справки вводятся успешные проекты сверхвысоких высотных зданий с применением композитного метода противопожарной защиты.

Ключевые слова: огнестойкость композита, трубчатая колонна, заполненная бетоном, теплопередача, распределение температуры.

Для цитирования: Вэй Тянь, Шоучао Янг, Саид Шебл. Проектирование и практика огнестойкого абстрактного композита // *Строительные материалы*. 2021. № 3. С. 64–72. (Англ.). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-64-72>

WEI TIAN^{1, 2}, Doctor, Vice Chief Engineer of China State Construction Overseas Development (tian_wei@cscecos.com);

SHOUCHAO JIANG³, Professor; SAYED SHEBL⁴, Professor

¹ China Construction Eighth Engineering Division, CO., LTD (Shanghai, China)

² China State Construction Engineering CORP.LTD (EGYPT) (Cairo, Egypt)

³ College of Civil Engineering, Tongji University (Shanghai, China)

⁴ Director of the Building Physics Institute, Housing & Building National Research Center, Cairo, Egypt

Abstract Composite Fire-Resistance Design and Practice

Fire protection is crucial to high-rise building, especially to steel structure high-rise building. The 4h fire resistance requirement for concrete-filled steel tubular (CFT) column is quite a challenge, and the composite fire protection method is proposed to solve this problem, which takes the function of concrete inside into consideration. The theory of composite fire protection method is firstly introduced, and then the design of composite fire protection is elaborated, the Finite Element Analysis of heat transfer and structural reactions is carried out to check the load-bearing capacity of the CFT columns in fire and corresponding adjust the design of fire protection. The plan of heat transfer tests on full-scale CFT column section during 4h fire exposure and mechanical property tests of steel and concrete at elevated temperatures is presented. Finally, success super high-rise building projects applying composite fire protection method are introduced for reference.

Keywords: composite fire resistance, concrete-filled steel tubular column, heat transfer, temperature distribution, load-bearing capacity.

For citation: Wei Tian, Shouchao Jiang, Sayed Shebl. Abstract composite fire-resistance design and practice. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 3, pp. 64–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-64-72>

1. Introduction

With the development of world economy, high-rise building is booming around the world, while high-rise buildings are very sensitive to fire, fire resistance of structure and elements are crucial to high-rise building, which is particularly important when the height of building increases. The aim of fire-resistant design of steel structure is to provide safe, economic and reasonable fire-resistant protection measures for steel structure, so as to reduce the damage, and avoid partial and overall collapse of steel structure in case of fire [1], which could cause casualties and increase difficulties in evacuation and firefighting, and properly designed fire protection measures also reduce the cost of restoration of building function and consequential losses after fire [2, 3].

In order to achieve above objectives, the fire-resistance of the structure or structural members must not be lower

than the required value [4–6]. There are three criteria while designing the structure fire-resistance:

1. During the specified structural fire-resistant time, the bearing capacity R_d of the structure or component should not be less than the combined effect S_m of specified actions, i. e.

$$R_d \geq S_m. \quad (1)$$

2. Under combination of specified action effects, the fire-resistant time t_d of the structure or component should not be less than the specified fire-resistant time t_m of the structure or component, i. e.

$$t_d \geq t_m. \quad (2)$$

3. In case of fire, the critical temperature T_d at the limit state of the structure should not be less than the maximum temperature T_m experienced in the structure or component during the fire-resistant time, i. e.

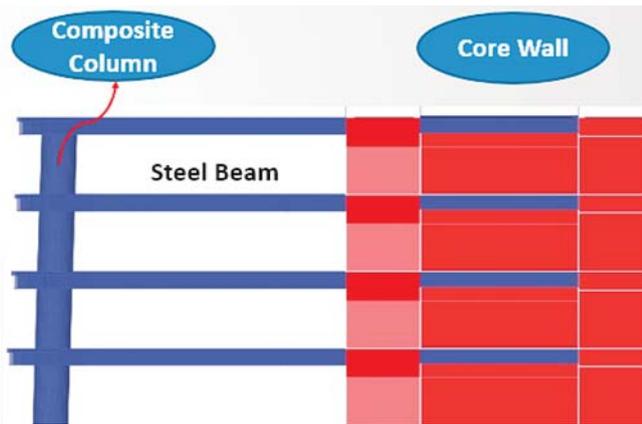


Fig. 1. Concrete core wall and steel frame
Рис. 1. Бетонная стена центрального ствола здания и стальной каркас

$$T_d \geq T_m. \quad (3)$$

The three approaches above are essentially equivalent, and satisfying any one of them means the other two criteria are automatically satisfied in the fire-resistant design of the structure.

At present, the fire-resistant design methods of steel structures proposed by design code of various nations are mainly based on the component level, and can be divided into two categories:

1. Test-based component fire-resistant design method (Traditional method). When use this method, we gener-

ally use Equation (2) to check and select the corresponding fire protection measures according to test results, such as BS476 (British) ASTM E119 (America) and GB/T 9978-1999 (China) and other similar standards.

2. Calculation-based component fire-resistant design method. When use this method, we generally use Equation (1) or (3) to check fire resistance of structures, and the former is called the bearing capacity checking method, and the latter is called the critical temperature checking method.

The test-based design method of fire-resistance of components has been gradually replaced by the calculation method due to the difficulties to simulate the actual load distribution, the actual boundary conditions of the structural component, the influence of thermal forces and other drawbacks during the tests.

The outer steel frame and inner concrete core wall system is one of the most prevail structure systems for high-rise building, which has high stiffness and relatively low cost. For one project in Cairo which is a new-built super high-rise building with height of around 400 m, the center of the structural plane is a reinforced concrete wall core, surrounded by a ring of 16 concrete-filled steel tubular (CFT) columns, shows in Fig. 1. Steel tubes with diameter from 750 mm to 1400 mm are made of Q345 steel and filled with C60 self-compacting concrete; steel tubes with diameter from 1400 mm to 1600 mm are made of Q420 steel and filled with C80 self-compacting concrete.

Table 1
Таблица 1
Fire requirement of elements
Огнестойкость элементов

Element	Fireproof Requirement
Column	4h
Beam	2h
Core wall	2h

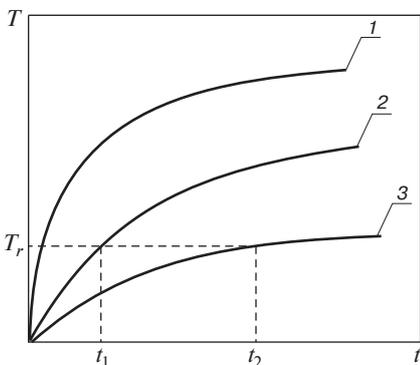


Fig. 3. Temperature curves of pot with different water: 1 – Fire; 2 – Half pot of water; 3 – Full pot of water

Рис. 3. Температурные кривые емкости с разной водой: 1 – огонь; 2 – сосуд на половину наполненный водой; 3 – полный сосуд воды



Fig. 2. Mockup of intumescent and cementitious
Рис. 2. Макет вспучивающегося и цементного заполнения

Table 2
Таблица 2
Options to achieve required fire resistance for CTF column
Варианты достижения требуемой огнестойкости стелетрубобетонных колонн

Element	Fire resistance Requirement	Approach	Reference
Column	4 h	Intumescent	Product Manufacturer Certificate
		Cementitious	Product Manufacturer Certificate
		Composite fire resistance	EN1994-1-2 & TEST Verification

According to relevant Egyptian design codes and NFPA 5000-Building Construction and Safety code (2006), this project is Class I building (TYPE I) 442 (TYPE I, 442 (Wall 4 h, Column & Truss 4 h, Beam 2 h), UL (no height limit)), and the required fire resistance for the columns is 4 h (Fig. 1 and Table 1). The fire protection coat is applied to protect the CFT columns in this project to achieve 4 h fire resistance, which is quite a challenge. The fire-resistant requirement for beam and core wall is normal.

These criteria are only applicable to structures with uniformly-distributed temperature in sections of structural members, which cannot be applied to CFT columns, because the temperature difference in the section of CFT column is significant.

To achieve the 4h fire resistance of CFT column, there is three options, as shows in Table 2: traditional intumescent, cementitious, and composite fire resistance method. Fig. 2 shows the mockup on site, left is intumescent and right is cementitious. The surface of 4 h intumescent fireproof looks smooth, while only two manufacturers can provide the service all over the world and the cost is very high. The problem of cementitious fireproof is that the surface is not as good as intumescent and the thickness is usually over 30 mm. Composite fire resistance method is an advanced way to take into consideration of the fire resistance contribution of concrete inside CFT column by advanced model analysis, that needs special calculation and test validation, which has been successfully applied in many high-rise buildings in China.

2. Composite Fire resistance Theory

2.1. Concept

The basic concept of Composite Fireproof is to take consideration of concrete during fire, which would help the steel tube to absorb heat, defer the temperature rising of steel tube and maintain the structure behavior [7, 8]. CFT column is like pot with water, steel tube is like the pot, concrete in steel tube like the water in pot. When heated, the water will absorb the heat, and so does the concrete, which will benefit for the resistance of the steel tube and the CFT column. It is clear in Fig. 3 that the more the water, the lower the temperature.

2.2. Methodology

Composite fire resistance design adopts advanced calculation method to analyze the fire resistance of CFT column with fire protection coat, the work flow of method is shown in Fig. 4: firstly set the standard fire, then calculate the temperature distribution of member, determine the strength of material of member at elevated tempera-

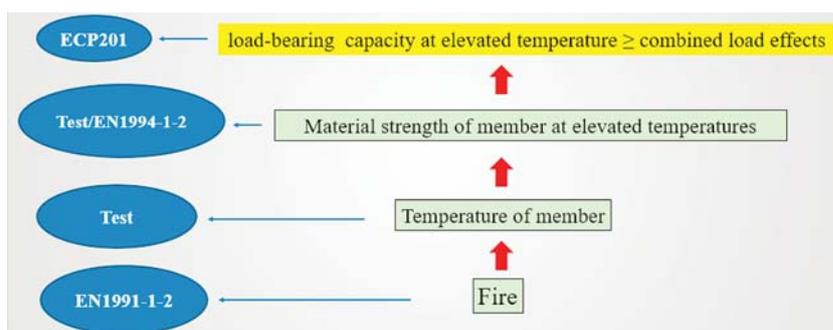


Fig. 4. Method of composite fire resistance design

Рис. 4. Способ расчета композитной огнестойкости

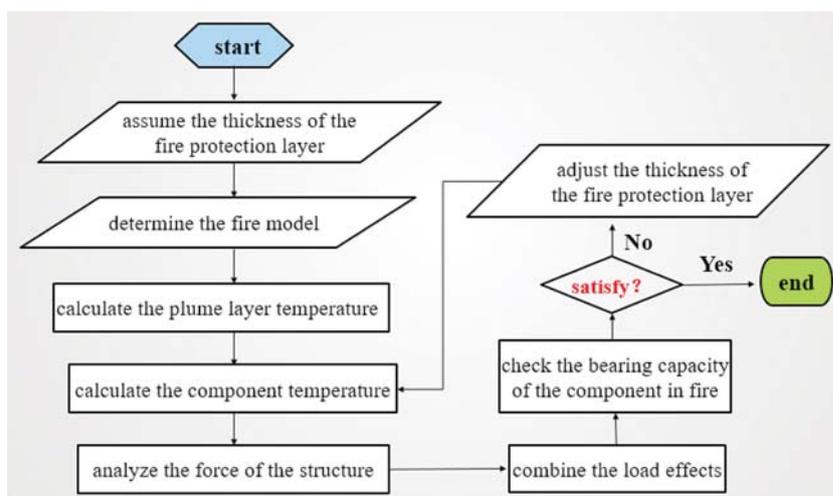


Fig. 5. Design process of composite fire resistance

Рис. 5. Процесс расчета композитной огнестойкости

tures, and finally check the load-bearing capacity of structure at elevated temperature with combined load effects.

2.3. Implementation Procedure

There are two procedures to implement composite fire resistance: first is design, through advanced calculation method to finish the theoretical analysis [9]; second is test verification, to validate the theoretical analysis.

2.3.1. Design process

The design process of composite fire resistance is shown in Fig. 5, the sequence is below:

1. Determination of Fire model. Adopting the standard Fire model (EN 1991-1-2) [10].
2. Assuming the fire protection measure for CFT column, determine the thermal parameters for fire protection materials.
3. Analyzing the temperature distribution of the composite steel column subjected to fire for 4h. Adopting Eurocode 4-Design of composite steel and concrete structures-Part 1-2: General Rules-Structural fire design [11].
4. Analyzing the combination of internal forces of CFT columns in the case of accident situation of fire through the structure model adjusting the properties of materials with temperature. Adopting Eurocode 4-Design

of composite steel and concrete structures-Part 1-2: General Rules-Structural fire design.

5. Calculate load-bearing capacity of CFT column after 4h fire exposure. Adopting Eurocode 4-Design of composite steel and concrete structures-Part 1-2: General Rules-Structural fire design, taking account of the degeneration of mechanical property of steel, concrete and reinforcement at elevated temperatures.

6. Checking the load-bearing capacity of CFT column with combined load effects after 4h fire exposure, and adjusting the fire protection if necessary. Adopting Eurocode 4-Design of composite steel and concrete structures-Part 1-2: General Rules-Structural fire design.

2.3.2. Verification Tests

For the verification tests, there is two kind of tests: first is full scale test for temperature distribution of typical CFT columns subjected to 4 h fire exposure, which follows the standards of ASTM E119; second is to test the mechanical properties of high strength steel and high strength concrete at elevated temperatures, which is used in CFT columns, the test is carried out on universal testing machine with furnace according to ASTM E21.

3. Theoretical Analysis

3.1. Standard fire model

Generally, the compartment fire temperature can be calculated according to the following standard fire curve (ISO-834), which is expressed as follows:

$$T_g(t) - T_g(0) = 345 \lg(8t + 1), \quad (4)$$

Where: $T_g(t)$ – compartment temperature corresponding to time t (°C); $T_g(0)$ – ambient temperature before fire, which is taken as 20°C; t – heating time, min.

3.2. Thermal properties

The coefficient of heat transfer for steel:

$$\lambda_s = 52.57 - 1.541 \times 10^{-2} T_s - 2.155 \times 10^{-5} T_s^2. \quad (5)$$

Specific heat for steel:

$$c_s = 470 + 20 \times 10^{-2} T_s + 38 \times 10^{-5} T_s^2, \quad (6)$$

Where: λ_s – the coefficient of heat transfer (W/(m·°C)); T_s – the temperature of steel (°C); c_s – the specific heat of steel (J/(kg·°C)).

Other relevant physical parameters of structural steel at elevated temperatures are shown in Table 3.

Table 3
Таблица 3

Physical parameters of structural steel at elevated temperatures
Физические параметры конструкционной стали при повышенных температурах

Parameter	Symbol	Value	Unit
Density	ρ_s	7850	kg/m ³
Thermal expansion coefficient	α_s	1.4×10^{-5}	m/(m·°C)
Poisson's ratio	ν_s	0.3	–

The coefficient of heat transfer of concrete:

$$\lambda_c = 0.012 \left(\frac{T_c}{120} \right)^2 - 0.24 \left(\frac{T_c}{120} \right) + 2. \quad (7)$$

The specific heat of concrete is calculated by the following equation.

$$c_s = 890 + 56.2 \frac{T_c}{100} - 3.4 \left(\frac{T_c}{100} \right)^2. \quad (8)$$

Where: T_c – the temperature of concrete (°C); λ_c – the coefficient of heat transfer of concrete (W/(m·°C)); C_c – the specific heat of concrete (J/(kg·°C)).

The Poisson's ratio of concrete is taken as 0.173, the coefficient of thermal expansion of concrete is taken as 1.8×10^{-5} m/(m·°C), The density of concrete is taken as 2300 kg/m³. Considering the influence of moisture in concrete on temperature distribution, the influence is taking into account by adjusting the specific heat of concrete to consider the heat consumed by evaporation of water in concrete at about 100°C. It is assumed that the evaporation of water is completed between 90°C and 110°C. Considering the water content of general concrete is 4%, the heat of vaporization of water (at 100°C and 1 standard atmospheric pressure) is 2257.2 kJ/kg, and the density of concrete is taken as 2300 kg/m³. Then, the heat consumed for water evaporation in 1 cubic meter of concrete is:

$$2300 \times 0.04 \times 2257.2 = 207662.4 \text{ (kJ)}. \quad (9)$$

The specific heat of concrete at 100°C is calculated according to Equation (8) is 942.8 J/(kg·°C). Therefore, the heat required to increase 20°C of 1 cubic meter of concrete is:

$$2300 \times 20 \times 942.8 = 43368.8 \text{ (J)}. \quad (10)$$

Therefore, the specific heat of concrete between 90°C and 110°C is:

$$\frac{207662400 + 43368.8}{2300 \times 20} = 5103.2 \text{ (kJ/kg·°C)}. \quad (11)$$

The specific heat of concrete in other temperature ranges is still determined according to Equation (8).

3.3. Mechanical properties

The stress-strain relationship of structural steel at elevated temperatures is given by European Standard EC3 (as shown in Fig. 6), which is close to the actual performance. The specific calculation Equation of the model is as follows fig. 6.

According to the stress-strain relationship of ordinary concrete specified in the EC4 specification, input the constitutive relationship model of concrete, and the equation is as follows:

$$\frac{\sigma}{f_{c,T}} = \frac{3\varepsilon/\varepsilon_{0,T}}{2 + (\varepsilon/\varepsilon_{0,T})^3}. \quad (12)$$

The elastic modulus of concrete is calculated according to the following Equation:

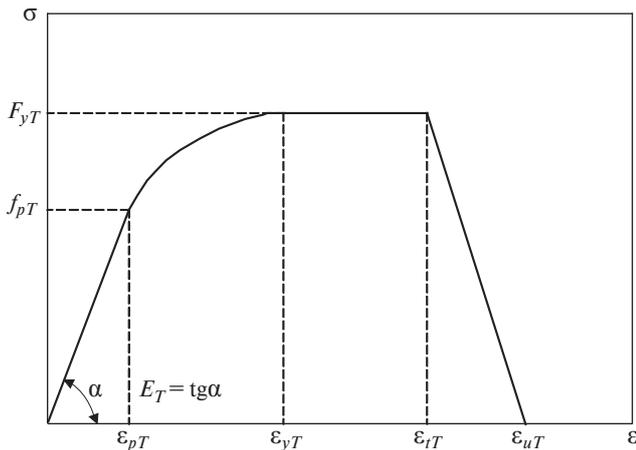


Fig. 6. Stress-strain relationship of structural steel at elevated temperatures: f_{yT} – yield strength at temperature T ; f_{pT} – proportional limit at temperature T ; E_T – initial elastic modulus at temperature T ; ϵ_{pT} – proportional limit strain at temperature T ; ϵ_{yT} – yield strain at temperature T ; ϵ_{iT} – maximum strain corresponding to yield strength at temperature T

Рис. 6. Напряженно-деформированное состояние конструкционной стали при повышенной температуре: f_{yT} – предел текучести при температуре T ; f_{pT} – пропорциональный предел при температуре T ; E_T – начальный модуль упругости при температуре T ; ϵ_{pT} – пропорциональная предельная деформация при температуре T ; ϵ_{yT} – деформация при пределе текучести при температуре T ; ϵ_{iT} – максимальная деформация, соответствующая пределу текучести при температуре T

$$\frac{E_{c,T}}{E_c} = \begin{cases} 1 - 0.0015T_c & 0^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C} \\ 0.87 - 0.00084T_c & 200^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C} \\ 0.28 & 700^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (13)$$

Where $E_{c,T}$ – initial elastic modulus of concrete at temperature T ; E_c – initial elastic modulus of concrete at ambient temperature (N/mm^2).

4. Heat Transfer Analysis 4.1. FEA model

The temperature distribution in the CFT column is not uniform. Therefore, the finite element analysis method is usually used to calculate the distribution of temperature [12, 13]. The FEM software ANSYS is used to analyze the actual temperature of CFT components experiencing standard fire. The calculation method is carried out by applying a surface effect element to the surface of the heat transfer element or the thermo-structural coupling element, which can simulate the boundary conditions of component surfaces exposed to a standard fire environment. The elements selected are as follows. Heat transfer element: 4-node quadrilateral element PLANE55 is used for solving two-dimensional heat transfer problems. Surface effect element: SURF151 is used for solving two-dimensional problems.

The temperature distribution of CFT columns with different fire protection subjected to standard fire can be obtained. There are two finite element model used for heat transfer analysis of CFT column with diameter of 1600 mm, one is without any fire protection, another is with 10 mm fire protection.

4.2. Results of heat transfer analysis

Take the CFT column with 1600×80 steel tube as example, with fire protection and without fire protection re-

spectively, the temperature distribution in the cross section after experiencing 4 hours of standard fire are as below.

For the CFT column without fire protection, the temperature distribution contour is shown in Fig. 7, the temperature curve along radius shows in Fig. 8, for distance of 0.72 m to 0.8 m from center is the steel tube, which is marked in red frame, it can be seen that the temperature in steel tube reach 1100°C after 4 h of standard fire; from distance of 0 m to 0.72 m to center is the concrete core, for concrete, it is obviously that the temperature drop rapidly, and the temperature within distance of 0.4 m is steady and low, the core temperature of concrete is quite low, only 22°C, almost not affected by the fire.

Fig. 9 shows the temperature developing in the middle point of the steel tube ($r=760$ mm) and in concrete of different depths from the surface. It takes about 60 min when the steel tube reaches 400°C, about 80 min when the steel tube reaches 600°C. Fig. 9 shows the temperature developing at the point of radius 695 mm in concrete, which is

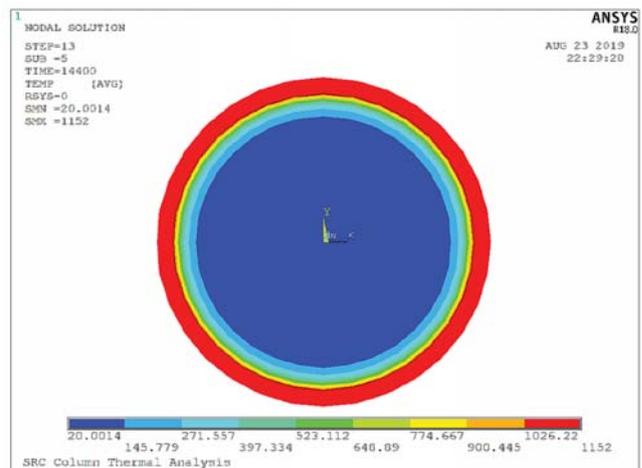


Fig. 7. Temperature distribution of CFT column without fire protection after 4h standard fire

Рис. 7. Распределение температуры по сталебетонной (стальная, трубчатая колонна, заполненная бетоном) колонне без противопожарной защиты после четырехчасового стандартного огневого воздействия

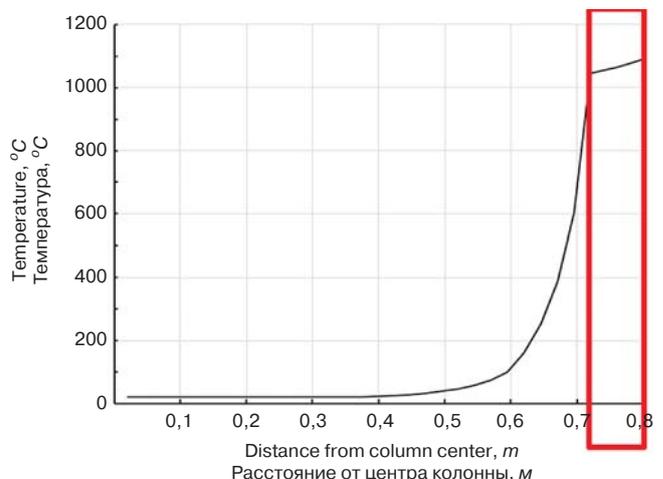


Fig. 8. Temperature along radius after 4 hours standard fire (without fire protection)

Рис. 8. Распределение температуры по радиусу после четырехчасового стандартного огневого воздействия (без противопожарной защиты)

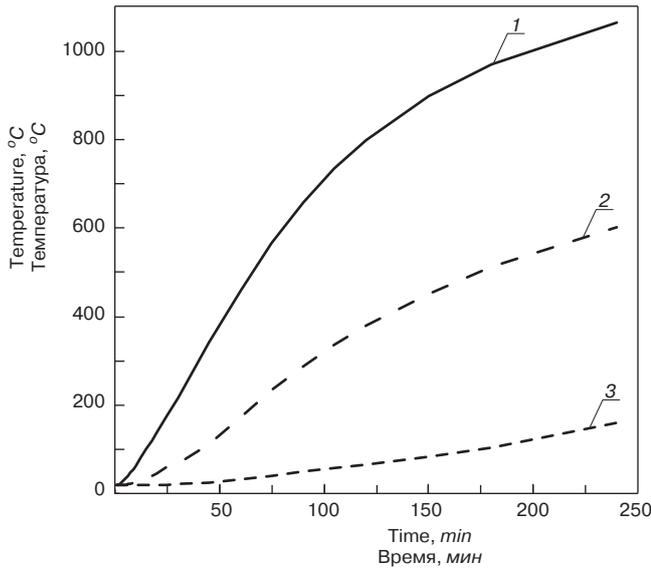


Fig. 9. Temperature developing curves in the CFT column (without fire protection): 1 – $r=760$ mm; 2 – $r=695$ mm; 3 – $r=620$ mm

Рис. 9. Кривые развития температуры в стале-трубобетонной колонне (без противопожарной защиты): 1 – $r=760$ мм; 2 – $r=695$ мм; 3 – $r=620$ мм

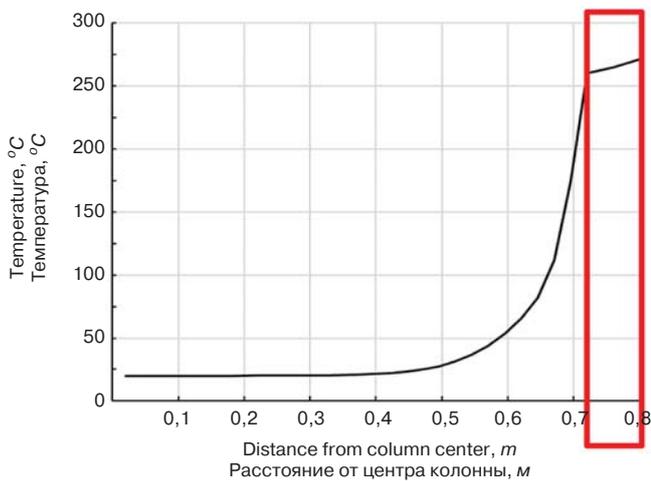


Fig. 11. Temperature along radius after 4h standard fire (with fire protection)

Рис. 11. Распределение температуры по радиусу после четырехчасового стандартного огневого воздействия (с противопожарной защитой)

25 mm to the concrete surface, the temperature reaches 600°C after 4 h fire exposure; for the temperature developing at the point of radius 620 mm of concrete, where is the position of steel reinforcement, the temperature is 160°C after 4 h fire exposure.

For CFT column with 10 mm fire protection, Fig. 10 shows the temperature distribution contour after 4 h standard fire, it can be seen that only the fire protection surface is at high temperature, while the steel tube and concrete core is at relatively low temperature. Fig. 11 shows the temperature along radius: from distance of 0.72 m to 0.8 m to center is the steel tube, which is marked in red frame, the temperature is from 260°C to 270°C; from distance of 0 m to 0.72 m to center is the concrete core, for concrete, it is obviously that the temperature drop rapidly, and the temperature is steady and low within distance of

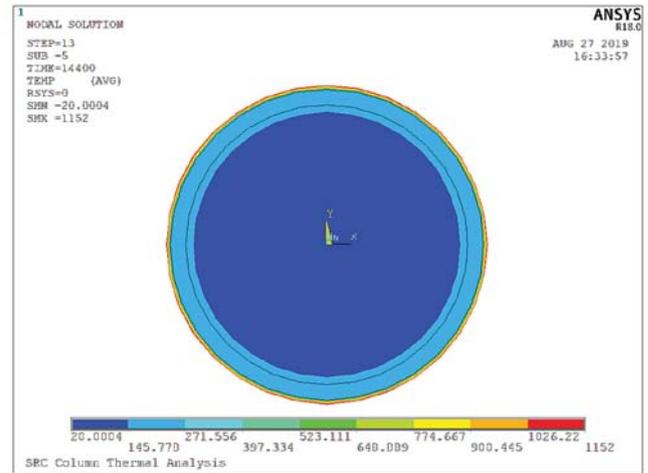


Fig. 10. Temperature distribution of CFT column with fire protection after 4 h standard fire

Рис. 10. Распределение температуры в стале-трубобетонной колонне с противопожарной защитой после четырех часов стандартного огневого воздействия

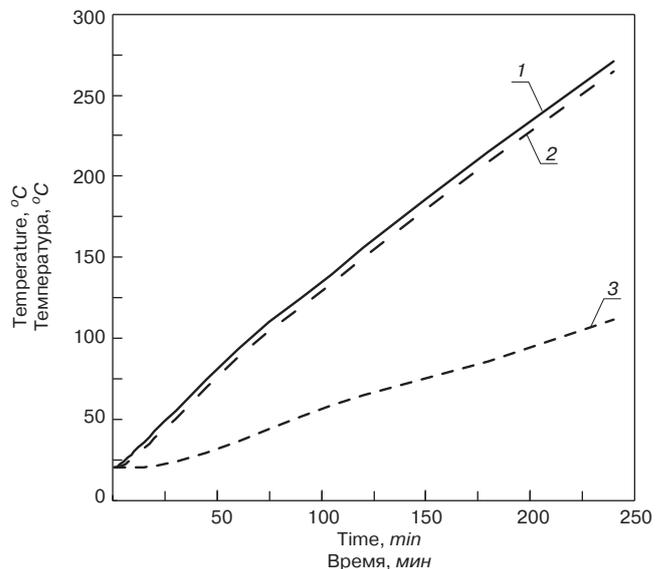


Fig. 12. Temperature developing curves in the CFT column (with fire protection)

Рис. 12. Кривые распределения температуры в стале-трубобетонной колонне (с противопожарной защитой)

0.5 m, the core temperature of concrete is only 22°C, almost not affected by the fire.

Fig. 12 shows the temperature developing in the middle point of the steel tube and in concrete of different depths from the surface, it is almost straight, and takes about 165 mins to reach 200°C, and the maximum temperature after 4 h fire exposure is 270°C. At the point of radius 695 mm in concrete, which is 25 mm to the concrete surface, the temperature reaches 260°C after 4 hours standard fire. And at the point of radius 620 mm of concrete, where is the position of steel reinforcement inside concrete, the temperature reaches 160 degree after 4 h fire exposure.

The heat transfer analysis indicates two important points:

1. Fire protection is crucial, which will efficiently decrease the temperature in CFT columns;

Table 4
Таблица 4

The information of the most unfavorable component of 1600 mm CFT columns
Информация о наиболее неблагоприятном компоненте в 1600 мм стальной трубчатой заполненной бетоном колонне

No.	Type	Stress ratio	Axial force (kN)	Bending moment (kN·m)	Shear force (kN)	Torsion (kN·m)
D1019	1600×80	0.75	-117881	3478	688	-435
						-106
						22

2. Concrete inside will help the steel tube to absorb heat, and contribute to the overall fire resistance of CFT column.

5. Structural Analysis

5.1. Combination of load effects

According to the Eurocode, when steel structure is checked for fire resistance, it can be calculated according to the combined effects of accidental events, using the following equations:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\Psi_{1,1} \text{ or } \Psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (14)$$

Where: E_d – design value of the effect by accidental combination; $G_{k,j}$ – effect of the standard value of permanent load; P – effect of the standard value of snow load; Q – effect of the standard value of live load of floor or roof; A_d – effect of the standard value of accidental event (fire); Ψ_1 – frequent coefficient of live load of floor or roof; Ψ_2 – quasi-permanent coefficient of live load of floor or roof.

The choice of $\Psi_{1,1}$ or $\Psi_{2,1}$ is related to the corresponding accidental design condition.

According to the US load specification (ASCE7-10), considering the load combination of accidental events, the following expression is used:

$$E_d = (0.9 \text{ or } 1.2)D + A_k + 0.5L + 0.2S. \quad (15)$$

Where: E_d – design value of the effects by accidental combination; D – effect of the standard value of dead

load. When the situation is favorable, it is taken as 0.9, otherwise, it is taken as 1.2; A_k – effect of the standard value of accidental event (fire); L – effect of the standard value of live load of floor or roof; S – effect of the standard value of snow load.

The US load specification (ASCE7-10) considers the snow load but ignore the wind load. However, this project is a super high-rise building in tropical desert, wind load other than snow load is the control load. Therefore, considering the actual situation, the part of snow load 0.2S is replaced by the wind load 0.25W for load effects combination calculation. So the final load combination equation is:

$$E_d = (0.9 \text{ or } 1.2)D + A_k + 0.5L + 0.25W. \quad (16)$$

According to the situation of the project, the effects of dead load, live load and wind load are considered for the load effects combination in the most unfavorable components selection. The combination of accidental load effects of European and American codes is considered respectively.

5.2. Selection of the most unfavorable component

When the load effects combination is clear, it is important to find the most unfavorable load condition for each specified CFT column to guide the calculation of the fire-resistance, which need the overall structural analysis under all kinds of possible load effects combinations.

For the 1600 mm CFT columns, the information of the most unfavorable component is shown in Table 4. The number of the most unfavorable component is D1019, of which load effects condition is $1.2D + 0.5L + 0.25W_x$.

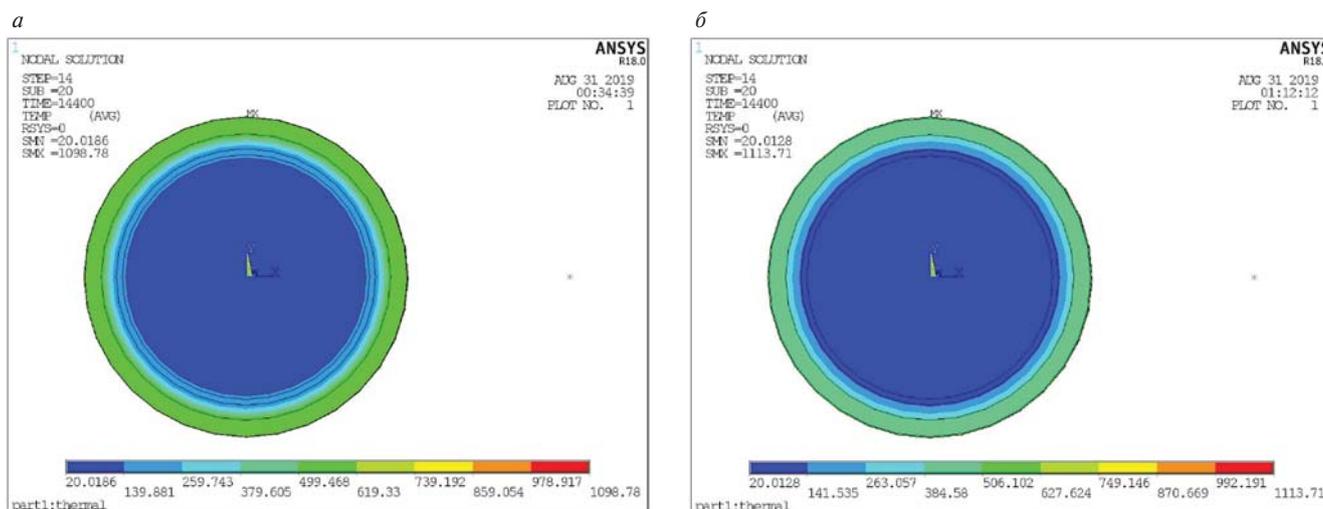


Fig. 13. Temperature distribution of CFT column with different protection coat after 4 h fire exposure: a – temperature distribution of CFT section with 5 mm fire protection coat; b – temperature distribution of CFT section with 10 mm fire protection coat

Рис. 13. Распределение температуры в стелетрубобетонной колонне с различным защитным слоем после четырехчасового воздействия огня: а – распределение температуры сечения колонны с огнезащитным слоем 5 мм; б – распределение температуры сечения колонны с огнезащитным слоем 10 мм

5.3. Integral finite element analysis based on thermo-mechanical coupling

In order to simulate the behavior of the CFT column in fire, structural analysis is carried out by increasing temperature while keeping the external loads constant. As a thermal stress sequential coupling analysis, thermal analysis and structural analysis are relatively independent, and the effect of structure response to heat transfer can be neglected. Therefore, finite element simulation analysis is performed by means of indirect coupling. The nonlinear transient thermal analysis is firstly carried out to calculate the temperature distribution of the section of the CFT column. The node temperature from the thermal analysis model is then applied as a body load to the structural analysis model for static structural analysis.

For steel columns of the same specification, set fire-resistant coatings with different thicknesses, and analyze the change of the displacement at the top of the column after 4 h of standard fire. When the displacement at the top of the column is relatively negative to the ambient temperature state, the CFT column reaches the load-bearing limit state, and the fire resistance fails to satisfy the requirements.

The results of the cross-sectional temperature distribution of the CFT column with different thicknesses of fire protection after 4 h of standard fire exposure are shown in Fig. 13, combined with the mechanical properties of steel and concrete at elevated temperatures, both are used to determine the load-carrying capacity of CFT column. For the CFT column with 1600×80 cross section, Fig. 14 shows the top deformation-time curve of the CFT column experiencing 4 h fire exposure with different thicknesses of fire protection. According to the analysis results, the fire resistance fulfills the requirements of 4 h fire-resistant time when it is protected by 5 mm fire protection coat. And the thermal resistance of the corresponding fire protective coating is $0.005/0.1=0.05\text{K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$.

6. Test and Verification

6.1. Full Scale Tests of Temperature Distribution in CFT Column

For the full-scale test of temperature distribution in CFT column during 4 h fire exposure, two group of tests are designed, D1600×80 (C80 concrete filled) and D750×40 (C60 concrete filled), each group have two specimens. The tests are carried out according to ASTM E119, EN13381 and EN1363-1, in furnace for large scale members. The height of specimens should not be less than 1.2 m, the bottom and top side of specimens should be heat insulated to simulate actual situation.

6.2. Tests of Mechanical Properties of High Strength Steel and High strength Concrete

For the test of mechanical properties of Q420 steel and C80 concrete at elevated temperatures, follow the code of ASTM E21, EN13381 and EN1363-1. the tests will be carried out at 200, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750 and 800°C respectively, two samples

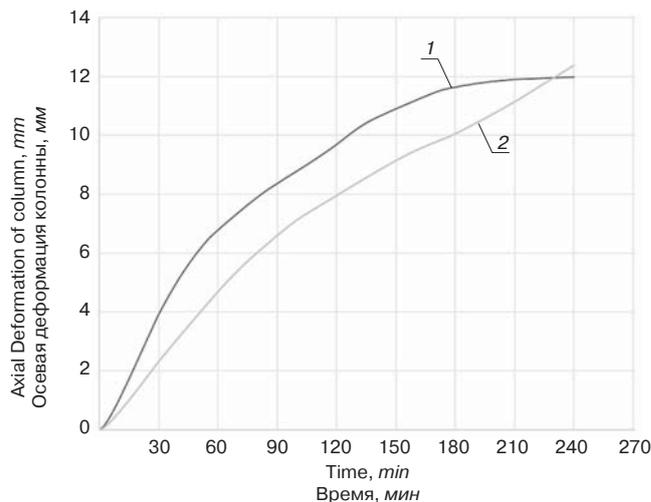


Fig. 14. Displacement-time curves of the CFT column while experiencing 4 h of standard fire

Рис. 14. Кривые деформации-времени стале­трубо­бетон­ной ко­лон­ны при четырёх­часовом стан­дар­тном огневом воз­дей­ствии

for each temperature, the sample will be loaded to fail at specified steady temperature by universal testing machine with furnace.

7. Practice

Composite fire resistance method is applied in many high-rising buildings with CTF columns. KingKey 100 Tower (height 441.8 m) in Shenzhen and CITIC Tower (height 528 m) in Beijing is two of the most famous super high buildings with CFT columns. The CFT columns in KingKey 100 Tower and in CITIC Tower are protected with 5 mm and 6mm cementation coat respectively to meet 3 h fire resistance requirement.

8. Conclusion

Based on the theory of composite fire resistance method, composite fire resistance design is elaborated, the Finite Element Analysis of heat transfer and structural behaviour is carried out to check the load-bearing capacity of the CFT columns and design the fire protection. From the study, the following conclusions can be obtained.

1. Composite fire resistance takes the contribution of concrete to fire resistance of CFT column into consideration, which would help the steel tube to absorb heat, defer the temperature rising of steel tube and maintain the structure behavior.

2. For the 1600mm CFT column without any fire protection, the temperature in steel tube reaches 1100°C after 4 h of standard fire exposure, while the concrete core is still at low temperature.

3. For the 1600 mm CFT column with 10mm fire protection, the temperature in steel tube is from 260°C to 270°C after 4 h of standard fire exposure while the concrete core is still at low temperature.

4. For the 1600 mm CFT column, the fire resistance fulfills the requirements of 4 hours fire-resistant time when it is protected by fire protection coat with thermal resistance of $0.05\text{K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$.

5. Full scale test on temperature distribution of CFT column during 4 h fire exposure and test of mechanical properties of high strength steel and concrete at elevated temperatures are important verification to the theoretical analysis.

6. Composite fire resistance is practical and has been successfully applied in high-rise building, which benefit for the cost control of project.

Acknowledgement

The authors would like to acknowledge the support of China State Construction Engineering Corporation and China Construction Eighth Engineering Division via the Scientific Research Funds provided under (1) China State Construction Research Project CSCEC-2019-Z-22; and (2) China Construction Eighth Engineering Division Research Project 2019-2-08.

References

1. Li Guoqiang, Wang Weiyong, State-of-the-art and development trend of fire safety research on steel structures. *China Civil Engineering Journal*. 2017. Vol. 50 (12), pp. 1–8.
2. Han Linhai, Xu Lei, Fire Resistance and fire protective cover of concrete-filled steel tubular column. *China Civil Engineering Journal*. 2002. Vol. 35 (6), pp. 6–13.
3. Li Guoqiang, Wu Bo, Jiang Shouchao. State-of-the-art and suggestions of research on fire-resistance of structures. *Progress in Steel Building Structures*. 2010. Vol. 12 (5), pp. 13–18.
4. Code for Fire Protection Design of Tall Buildings, China National Standard, GB50045-95, 2005.
5. Code for Fire Safety of Steel Structures in Buildings, Standard of China Association for Engineering Construction Standardization, CECS 200, 2006.
6. Code for Fire Safety of Steel Structures in Buildings, China National Standard, GB51249, 2017.
7. Han L.H. Concrete filled steel tubular structure-theory and practice. Beijing: Science Press, 2007.
8. Kim D.K., Choi S.M., Chung K.S. Structural characteristics of CFT columns subjected fire loading and axial force. *Proceedings of the 6th ASCCS Conference*. ASCCS, Los Angeles, USA. 2000, pp. 271–278.
9. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1–2: General actions – Actions on structures exposed to fire, European Standard.
10. European Committee for Standardization. Eurocode 1. EN 1991-1-2: 2002. Actions on Structures-Part 1-2: General Actions-Actions on Structures Exposed to Fire [S], Brussels.
11. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures: Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design, European Standard.
12. Ajitanshu Vedrtanam, Mon Prakash Upadhyay, Kishor Kalauni. Experimental and theoretical studies of the heat transfer characteristics of the lab-scale sensible heat storage system. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2019. Vol. 20 (2), pp. 167–193.
13. Laptev A.G., Farakhov T.M. Experimental investigation and modeling of transfer phenomena in heat exchangers with a volumetric intensifier. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2020. Vol. 21 (1), pp. 15–24.

Министерство строительства РС (Я)
Якутский государственный проектный, научно-исследовательский
институт строительства
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки
соответствия в строительстве
Научно-исследовательский центр «Строительство»
Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН

VI Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 85-летию создания строительного комплекса Якутии «Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение»

5–6 октября 2021 г.

Организатор: Инженерно-технический институт СВФУ им. М.К. Аммосова

г. Якутск, Россия

НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ:

- Проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений
- Энергоэффективное строительство
- Эффективные строительные материалы и технологии
- Архитектура и градостроительство
- Совершенствование систем инженерного обеспечения зданий и сооружений
- Экспертиза и управление недвижимостью
- Подготовка кадров для строительной отрасли
- Актуальные вопросы строительной отрасли в экстремальных условиях Арктики и Субарктики

Языки конференции: русский. Форма конференции: заочная. По итогам конференции будет опубликован электронный сборник научных трудов с присвоением ему ISBN, УДК, ББК и размещением в базе данных РИНЦ

Оргкомитет:

Корнилов Т.А. – директор Инженерно-технического института Северо-Восточного федерального университета, д-р техн. наук, доцент (председатель)
Матвеева О.И. – генеральный директор ОАО «Якутский проектный научно-исследовательский институт строительства», канд. техн. наук, доцент
Местников А.Е. – зав. кафедрой производства строительных материалов, изделий и конструкций СВФУ, д-р техн. наук, профессор
Посельский Ф.Ф. – зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства СВФУ, канд. техн. наук, доцент
Иванов В.Н. – зав. кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции СВФУ, канд. техн. наук, доцент
Федорова Г.Д. – доцент кафедры промышленного и гражданского строительства СВФУ, канд. техн. наук, доцент
Архангельская Е.А. – зав. кафедрой экспертизы и кадастра недвижимости СВФУ, канд. техн. наук, доцент
Юмашева Е.И. – главный редактор издательства «Стройматериалы» (научно-технические журналы «Строительные материалы», «Жилищное строительство», «Бетон и железобетон»)

Почтовый адрес: 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58, СВФУ, Инженерно-технический институт

Телефон: 8-984-114-88-30 E-mail: orgkomitet-iti@ya.ru

Ответственный секретарь: Попов Александр Леонидович

Where Innovations Thrive



CERAMICS
CHINA
2021

**The 35th Edition of China Int'l Exhibition for
Ceramics Technology, Equipment & Product**

June 22-25, 2021

Area A, Canton Fair Complex, Guangzhou



China Ceramic
Industrial Association



UNIFAIR
EXHIBITION SERVICE

Tel: 0086 – 20 – 8327 6369 / 6389

Facebook: @Ceramics China

Web: www.ceramicschina.com.cn

Email: ceramicschina@unifair.com

Twitter: @ceramics_china

Спонсор конференции:



23–24 июня 2021 г.
г. Тверь, Россия
Гранд отель «ЗВЕЗДА»

June 23–24, 2021
Tver, Russia
Grand hotel «ZVEZDA»

XIX

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«РАЗВИТИЕ КЕРАМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ»

КЕРАМТЭКС



Партнеры МИАП KERAMTEX / KERAMTEX' partners



CERAMICS
CHINA 2021

Ceramitec



Посещение «Вышневолоцкого кирпичного завода»

Visit to «Vyshnevolotsky brick factory»

