

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ[®] №6

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

ISSN 0585-430X (Print)

ISSN 2658-6991 (Online)



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г.

WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU ИЮНЬ 2021 г. (792)

ОБЪЕДИНЕНИЕ ПРОФЕССИОНАЛОВ ИЗВЕСТКОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ



*Союз
Производителей
Извести*

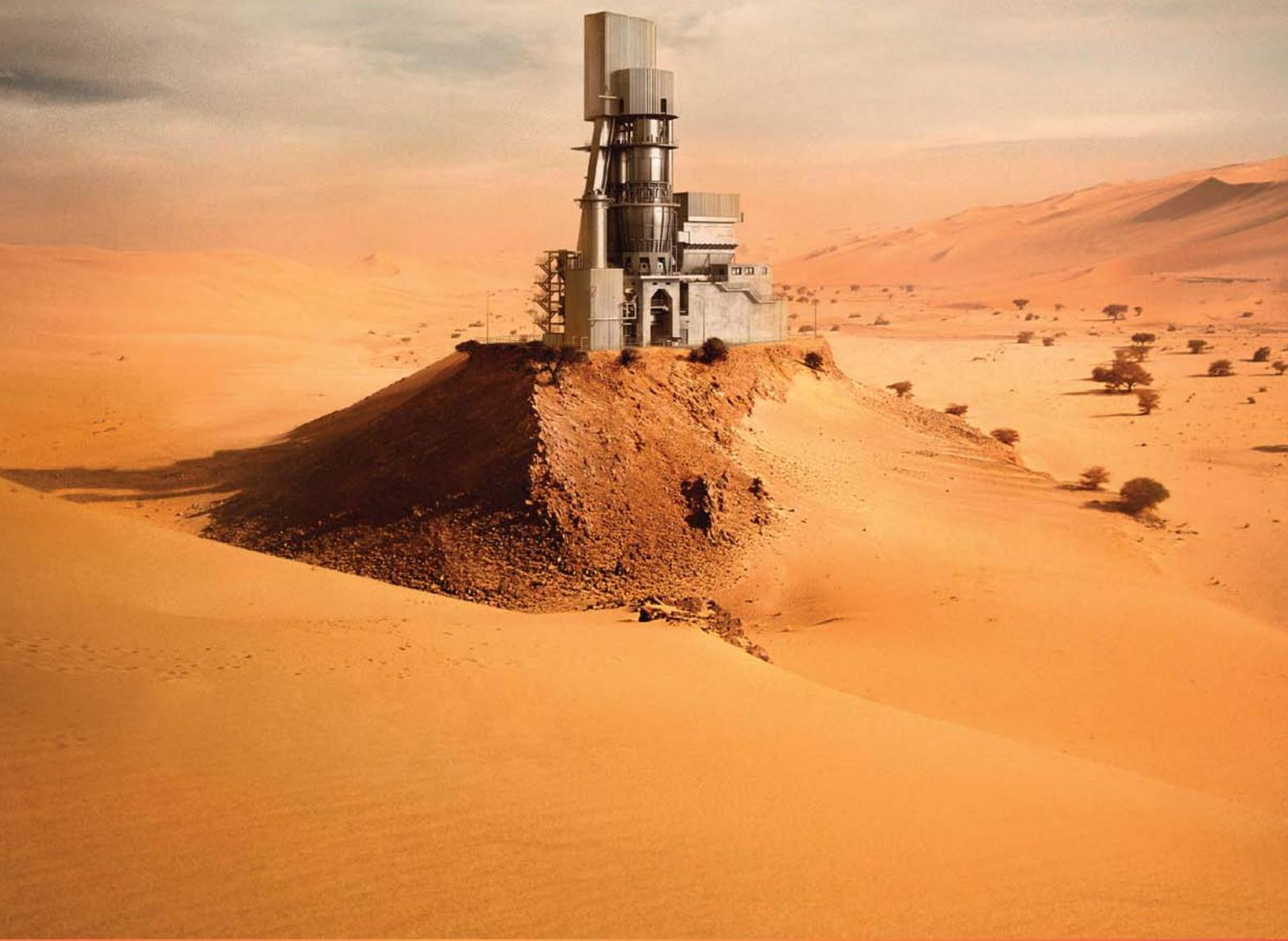


15 лет



www.soyuzizvest.ru

БЕЗ ПРОБЛЕМ



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



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®

№ 6

Основан в 1955 г.

(792) Июнь 2021 г.

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

Некоммерческому партнерству производителей извести 15 лет (Информация)..... 4

В Геленджике состоялась встреча специалистов цементной и бетонной отраслей (Информация)..... 6

Тепловая защита зданий

К.П. ЗУБАРЕВ, А.И. БОРОДУЛИНА, А.Р. ГАЛЛЯМОВА

Теоретические и экспериментальные методы определения сопротивления теплопередаче.

Обзор литературы 9

П.П. ПАСТУШКОВ, В.Г. ГАГАРИН

Воздухопроницаемость минераловатных изделий современного производства 15

Защита зданий от внешних воздействий

В.И. РИМШИН, П.С. ТРУНТОВ, Е.С. КЕЦКО

Комплексный подход к выполнению акустических расчетов при техническом обследовании

аварийного жилого фонда 21

Н.Г. КАНЕВ, А.С. ФАДЕЕВ, И.Е. ЦУКЕРНИКОВ

Оценка звукоизоляции строительными конструкциями интенсивных источников импульсного шума

в натуральных условиях 25

С.И. КРЫШОВ, Д.Е. КОТЕЛЬНИКОВ, О.В. ГРАДОВА

Проблемы звукоизоляции междуэтажных перекрытий в панельных зданиях

и применение закона массы 30

Е.В. КОРКИНА, И.А. ШМАРОВ, М.Д. ТЮЛЕНЕВ

Влияние современных фасадных покрытий на величину средневзвешенного альбедо фасада здания. 33

Экологическое строительство

Е.В. ЛЕВИН, А.Ю. ОКУНЕВ, Е.Ю. ЦЕШКОВСКАЯ

Экология помещений. Влияние строительных и отделочных материалов 41

Материалы и технологии

Н.И. КАРПЕНКО, Вл.И. КОЛЧУНОВ, В.И. КОЛЧУНОВ, В.И. ТРАВУШ, А.И. ДЕМЬЯНОВ

Деформирование железобетонных конструкций при изгибе с кручением 47

И.В. БЕССОНОВ, А.Д. ЖУКОВ, Э.А. ГОРБУНОВА

Исследование водостойкости гидрофобизированных пазогребневых гипсовых плит 57

С.В. ФЕДОСОВ, С.А. МАЛБИЕВ

Долговечность и надежность пространственных стержневых полимерных конструкций

с узлами из композиционных материалов при циклическом изменении

тепловлажностных параметров эксплуатации 62

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®

№ 6

Founded in 1955 (792) June 2021

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

Non-Profit Partnership of Lime Producers – 15 Years (*Information*) 4

A Meeting of Specialists From the Cement and Concrete Industry Took Place in Gelendzhik (*Information*)..... 6

Heat protection of buildings

K.P. ZUBAREV, A.I. BORODULINA, A.R. GALLYAMOVA

Theoretical and Experimental Methods for Determining the Heat Transfer Resistance. Literature Review. 9

P.P. PASTUSHKOV, V.G. GAGARIN

Air Permeability of Mineral Wool Products of Modern Production. 15

Protection of buildings against external impacts

V.I. RIMSHIN, P.S. TRUNTOV, E.S. KETSKO

An Integrated Approach to Performing Acoustic Calculations during Technical Inspection of Emergency Housing Stock. 21

N.G. KANEV, A.S. FADEEV, I.E. TSUKERNIKOV

Evaluation of Sound Insulation of Intense Sources of Pulsed Noise by Building Structures in Natural Conditions. 25

S.I. KRYSHOV, D.E. KOTELNIKOV, O.V. GRADOVA

Problems of Sound Insulation of Inter-Floor Floors in Panel Buildings and the Application of the Law of Mass 30

E.V. KORKINA, I.A. SHMAROV, M.D. TYULENEV

Influence of Modern Facade Coatings on The Value of the Weighted Average Albedo of the Building Façade 33

Ecological construction

E.V. LEVIN, A.Y. OKUNEV, E.Yu. TSESHKOVSKAYA

Ecology of Premises. Influence of Building and Finishing Materials. 41

Materials and technologies

N.I. KARPENKO, VI.I. KOLCHUNOV, V.I. KOLCHUNOV, V.I. TRAVUSH, A.I. DEM'YANOV

Deformation of Reinforced Concrete Structures During Bending with Torsion 47

I.V. BESSONOV, A.D. ZHUKOV, E.A. GORBUNOVA

Researching of the Water Resistance of Hydrophobized Tongue-and-Groove Gypsum Slabs. 57

S.V. FEDOSOV, S.A. MALBIEV

Durability and Reliability of Space Rod Structures Made of Polymers with Nodes Made of Composite Materials at Cyclic Changes in Heat and Humidity Parameters of Operation 62

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)

СОЮЗУ производителей ИЗВЕСТИ

Non-Profit Partnership of Lime Producers – 15 Years



Профессиональное отраслевое Некоммерческое партнерство производителей извести (Союз производителей извести) было создано в августе 2006 г. Необходимость объединения для решения общих проблем возникла одновременно у нескольких российских предприятий по производству извести. На отраслевой конференции, которая проходила в Новгородской области по инициативе руководства Угловского известкового комбината, руководители предприятий впервые заговорили о том, что, объединив усилия, можно добиться больших результатов на пути развития и процветания не только отдельных заводов, но и всей отрасли.

Основателями Союза производителей извести стали семь предприятий: ОАО «Угловский известковый комбинат» (Новгородская обл.); ОАО «Стройматериалы» (Белгород); ОАО «Клинцовский силикатный завод» (Брянская обл.); ОАО «Завод производства извести» (Владимирская обл.); ОАО «Солигаличский известковый комбинат» (Костромская обл.); ООО «Воронежглавмел», представляющее ОАО «Копанищенский комбинат строительных материалов» (Воронежская обл.); ООО «Придонхимстрой Известь» (Воронежская обл.), выразив таким образом готовность к координации своей деятельности и необходимости объединения ресурсов для решения общих проблем.

Главной целью создания союза является содействие формированию и развитию цивилизованного рынка строительных материалов и химической продукции на территории России, сотрудничество с органами государственной власти по выработке и принятию решений, направленных на создание благоприятной экономической и правовой ситуации для производителей извести, а также защита законных прав и интересов членов Союза в условиях рыночной экономики.

За прошедшие годы союз стал крупнейшим отраслевым объединением, в состав которого входит шестнадцать предприятий. К основателям отраслевого сообщества присоединились: ООО «Фельс Известь» (Калужская обл.); ООО «Известь Сысерти» (Свердловская обл.); АО «Искитимизвесть» (Новосибирская обл.); ПАО «Химико-металлургический завод» (Красноярский край); ЗАО «Известняк» Джегонасский карьер» (Карачаево-Черкесская Республика); АО «Эльдако» (Воронежская обл.); ООО «Силикат» (Саратовская обл.); ООО «ЭКО-Золлопродукт инвест» (Рязанская обл.); ООО «Добрятинское карьероуправление» (Владимирская обл.); ОАО «Известковый завод» (Республика Башкортостан); ООО ВПП «Известа» (Воронежская обл.)

Союз производителей извести всегда открыт для добровольного вступления новых участников и стратегического партнерства.

15 лет



В Совет Союза производителей извести на сегодня входят директор по экономике ООО «Главмел» Тарарыков Олег Юрьевич, генеральный директор ОАО «Солигаличский известковый комбинат» Дьяконов Владимир Дмитриевич, генеральный директор ООО «Добрятинское карьероуправление» Баранков Игорь Владимирович, генеральный директор ООО «Управление ИЦА», действующий от имени АО «Клинцовский силикатный завод», Филин Алексей Леонидович.

За прошедшие годы сфера деятельности СПИ существенно расширилась. Регулярно проводится работа по сбору и систематизации отраслевой информации не только в России, но и поступающей из-за рубежа.

Полезной для специалистов стала возможность посещения известковых предприятий за рубежом. Совместно с редакцией журнала «Строительные материалы»® были организованы деловые поездки в Германию, Китай, Италию.

В составе рабочей группы союз принимал активное участие в работе по пересмотру ГОСТа на строительную известь, подготовке справочника НДТ «Производство извести».

В рамках заседания Комиссии по развитию промышленности строительных материалов при Общественном совете Минпромторга России было заключено соглашение о сотрудничестве с некоммерческой организацией «Союзцемент», которое предусматривает взаимодействие организаций в области строительства и ремонта федеральных, региональных и муниципальных автомобильных дорог с устройством оснований из грунтов, укрепленных минеральными вяжущими.

В настоящее время особую значимость приобретают вопросы защиты и восстановления окружающей среды. Применение извести является одним из лучших и эффективных решений для:

- дезинфекции и обеззараживания осадка сточных вод;
- очистки водоемов, рек, прибрежных акваторий морей;
- очистки отходящих газов в промышленном производстве;
- известкования почв с целью их раскисления;
- укрепления и стабилизации грунтов;
- обезвреживания почвы при ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов.

Конкуренция внутри отрасли не мешает членам союза, а наоборот, помогает объединиться для решения первоочередных и перспективных задач общеотраслевого характера. Объединение усилий позволяет предприятиям эффективнее противостоять факторам, тормозящим развитие отрасли.

Союз производителей извести благодарит всех, кто 15 лет идет вместе с ним по пути развития и процветания отрасли. Впереди много дел по развитию технологической базы, оптимизации нормативно-технических документов, развитию цивилизованного рынка и расширению областей применения извести. Осилить дорогу легче идущим вместе.



Союз
Производителей
Извести

394043, г. Воронеж, ул. Ленина, д. 73, пом. 1, оф. 401
Тел.: + 7 (473) 229-41-85
E-mail: nppl.office@yandex.ru
www.soyuzizvesti.ru

Редакция журнала «Строительные материалы»® поздравляет Союз производителей извести с 15-летием активной работы, желает успехов в решении задач и достижении поставленных целей и благодарит за многолетнее плодотворное сотрудничество.

В Геленджике состоялась встреча специалистов цементной и бетонной отраслей

A Meeting of Specialists from the Cement and Concrete Industry Took Place in Gelendzhik

27–28 мая 2021 г. в Геленджике состоялась II конференция RUCEM «Открытый диалог цементников, производителей строительной химии и бетонов», организаторами которой традиционно выступают интернет-журнал о цементах RUCEM.RU и ГК «ПОЛИПЛАСТ» при информационной поддержке отраслевых СМИ и Национальной ассоциации «Союз производителей бетона».

On May 27–28, 2021, Gelendzhik hosted the II RUCEM Conference «Open Dialogue of Cement Makers, Manufacturers of Construction Chemicals and Concretes», which is traditionally organized by the online magazine about cement RUCEM.ru and «GK POLYPLAST» JSC with the information support of the industry media and the National Association «Union of Concrete Manufacturers».



Заместитель директора по развитию СЗФО «ВЫБОР-СПб» Е.Е. Любомирова и главный редактор RUCEM.RU Ю.А. Ерокин

В конференции приняли участие более сорока специалистов – представителей цементных и бетонных производств, компаний по производству химических добавок. Было заслушано восемь пленарных докладов.

Во вступительной части директор Национальной ассоциации «Союз производителей бетона» **Д.Е. Пожаров** вручил свидетельства о членстве четырем новым участникам: АО «Бетоныч», ООО «Аспект-С», ПАО «Пигмент» и ООО «Современные строительные технологии».

Основной темой выступления Д.Е. Пожарова стал анализ проблемных вопросов производителей бетонной продукции. В основном это высокая конкуренция, демпинг, борьба с фальсификатом, невысокая квалификация специалистов. Были предложены новые меры по оптимизации и увеличению эффективности работы бетонных предприятий.

Директор по развитию ООО «Полипласт Новомосковск» **И.В. Степанюга** представила результаты проведенного исследования по применению добавок компании: Полипласт П-1, Линамикс СП-180, Полипласт ПК на цементах разных производителей. Она отметила, что по-прежнему основным



Слева направо: директор Национальной ассоциации «Союз производителей бетона» Д.Е. Пожаров, руководитель блока развития ООО «Аспект-С» А.Ю. Козлов, директор ООО «ССТ» Е.В. Вострухов, начальник отдела контроля качества АО «Бетоныч» Д.В. Шинкарев, исполнительный секретарь «Союза производителей бетона» О.В. Сухарев, ведущий инженер-технолог ПАО «Пигмент» В.А. Петров, главный редактор RUCEM.RU Ю.А. Ерокин



Директор по развитию «Полипласт Новомосковск» И.В. Степанюга



Технический эксперт по России «ХайдельбергЦемент Рус» С.В. Мошковская



Генеральный директор НИЛ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ» А.Л. Гольденберг

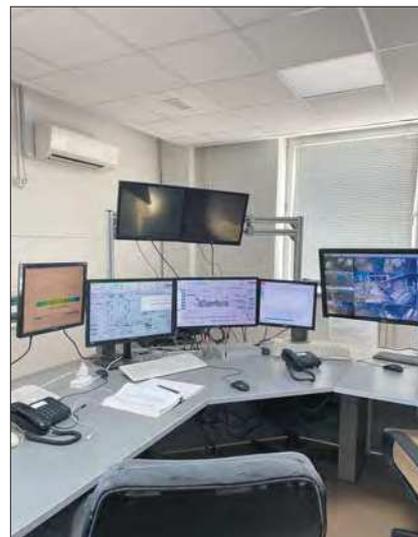


Доцент кафедры «Технологии строительных материалов и метрологии» СПбГАСУ В.Д. Староверов

в процессе производства бетонов остается грамотно подобранный состав бетонной смеси. Для контроля водоотделения, переразжижения, в/ц отношения, сохраняемости бетонной смеси при смене поставщика цемента или добавки необходимо проводить комплекс испытаний оптимизации составов, а также усиливать входной контроль поставляемого цемента и добавки.

Большой интерес участников вызвало выступление **С.В. Мошковской**, технического эксперта по России «ХайдельбергЦемент Рус», об опыте применения и перспективах использования портландцемента со шлаком типа ЦЕМ II/B в бетонном производстве. Одной из основных задач всех производственных компаний в настоящее время является уменьшение выбросов углекислого газа, улучшение экологической ситуации. Следуя этой концепции, «ХайдельбергЦемент» ежегодно увеличивает долю выпуска добавочного цемента или цемента с низким клинкер-фактором, что уже привело к снижению более чем на 15% выбросов CO₂ в сравнении с 2019 г. Как показали проведенные исследования, бетоны на основе цемента ЦЕМ II/B-Ш 42,5 Н классов прочности В30 и В50 показывают высокую прочность на 28-е сут твердения; сохраняемость удобоукладываемости бетонных смесей на основе этого вида цемента возможно регулировать подбором подходящего пластификатора; бетон на основе цемента ЦЕМ II/B-Ш 42,5 Н прошел 300 циклов попеременного замораживания/оттаивания (F1300) и может быть рекомендован к использованию в бетонных технологиях.





Вопросы нормирования, оценки соответствия и декларирования подробно рассмотрели в своих выступлениях генеральный директор НИЛ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ» **А.Л. Гольденберг** и доцент кафедры ТСМиМ Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета **В.Д. Староверов**. Также был проведен небезынтесный сравнительный анализ процедуры оценки соответствия в европейских странах и США.

Итогом пленарного заседания стало активное обсуждение освещенных вопросов. Камнем преткновения по-прежнему остается вопрос взаимодействия поставщиков цемента и производителей бетонов, стабильность свойств поставляемых цементов, а также взаимодействие технологов заводов со специалистами производителей добавок.

Во второй день конференции состоялась производственная экскурсия на ОАО «Верхнебаканский цементный завод». На сегодняшний день завод является одним из градообразующих предприятий. Основной рынок сбыта приходится на Краснодарский край, Ростовскую область и Ставрополье.

История предприятия началась еще в 1882 г., когда по указу государя императора Александра III был построен первый цементный завод в районе г. Новороссийска под названием «Общество Черноморского цементного производства».

В 2014 г. на заводе была проведена масштабная реконструкция. В настоящее время производительность составляет 2 млн т/г. На новой технологической линии цемент выпускается по сухому способу. Ассортимент представлен марками ЦЕМ I 42,5; ЦЕМ II 2 42,5 и др.

На предприятии установлена самая крупная и производительная сырьевая мельница одновременной сушки и помола в России; вращающаяся печь длиной 65 м с четырехступенчатым теплообменником; действует самое современное программное обеспечение по контролю производства. Завод имеет собственный подъездной железнодорожный путь и подъездную автодорогу, примыкающую к федеральной трассе Краснодар–Новороссийск. Отгрузки производятся ж/д транспортом, автотранспортом, а также в мешках. Уникальное по составу мергелесодержащее сырье, которое дает отличный высококачественный строительный материал – цемент, с первых же лет обратило на себя внимание не только российских потребителей, но и зарубежных покупателей.

Благодарим организаторов и участников конференции и надеемся на встречу в следующем году.

Т. Абакумова
Фото автора и М.Н. Радионова

К.П. ЗУБАРЕВ^{1,2}, канд. техн. наук (zubarevkill93@mail.ru);
 А.И. БОРОДУЛИНА¹, студентка (borodulina.nastia2015@yandex.ru),
 А.Р. ГАЛЛЯМОВА¹, студентка (gallyamova.angelina1@mail.ru)

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

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

Теоретические и экспериментальные методы определения сопротивления теплопередаче. Обзор литературы

Сопротивление теплопередаче – один из ключевых теплотехнических параметров, на основании которого проектировщики принимают решение о возможности применения ограждающей конструкции здания. Описано дифференциальное уравнение теплопроводности в стационарной и нестационарной постановках с граничными условиями третьего рода. Показана связь между тепловым потоком через ограждение и его сопротивлением теплопередаче. Описано современное состояние нормативной документации по определению условного, приведенного и требуемых сопротивлений теплопередаче. Продемонстрированы научные методы определения сопротивления теплопередаче. Приведен обзор работ Т.А. Мусориной и М.Р. Петриченко, в которых предлагается расчет полного термического сопротивления посредством разложения его на реактивную и активную составляющие. Проанализирована работа О.Д. Самарина, описывающая метод расчета сопротивления теплопередаче по грунту с помощью четвертьбесконечного массива и деления грунта на концентрические окружности. Метод О.Д. Самарина дает больше возможностей по сравнению с классическим методом расчета по зонам. Также представлен обзор экспериментального метода определения сопротивления теплопередаче, который заключается в поиске среднего значения плотности теплового потока в каждом периоде с установившимся температурным режимом. В заключение сделан вывод о необходимости совершенствования как теоретических, так и экспериментальных подходов определения сопротивления теплопередаче.

Ключевые слова: сопротивление теплопередаче, активное сопротивление теплопередаче, реактивное сопротивление теплопередаче, теплопередача через грунт, экспериментальные методы определения, наружные ограждающие конструкции, тепловой поток температура внутреннего и наружного воздуха.

Для цитирования: Зубарев К.П., Бородулина А.И., Галлямова А.Р. Теоретические и экспериментальные методы определения сопротивления теплопередаче // *Строительные материалы*. 2021. № 6. С. 9–14. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-9-14>

K.P. ZUBAREV^{1,2}, Candidate of Sciences (Engineering) (zubarevkill93@mail.ru);

A.I. BORODULINA¹, Student (borodulina.nastia2015@yandex.ru), A.R. GALLYAMOVA¹, Student (gallyamova.angelina1@mail.ru)

¹ Moscow State University of Civil Engineering (129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoye Highway, 26)

² Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Science (127238, Russia, Moscow, Lokomotivny Driveway, 21)

Theoretical and Experimental Methods for Determining the Heat Transfer Resistance. Literature Review

Heat transfer resistance is one of the main heat engineering characteristics which is taken into consideration when designers decide on the possibility of using the building envelope. The differential equation of heat conduction in stationary and non-stationary formulations with boundary conditions of the third kind is shown. The relationship between the heat flow through the fence and its heat transfer resistance is demonstrated. The current state of documentary standard in determining conventional, reduced and required heat transfer resistance is outlined. Scientific methods for determining the heat transfer resistance are demonstrated. T.A. Musorina and M.R. Petrichenko's works which propose a calculation of the total thermal resistance by decomposing it into reactive and active components are reviewed. The work of O.D. Samarin describing a method for calculating the heat transfer resistance in soil using a quarter of an infinite array and dividing the soil into concentric circles is cited. Above mentioned O.D. Samarin's method provides more opportunities compared to the classical method of calculating by zones. Furthermore, an overview of the experimental method for determining heat transfer resistance which consists in finding the average value of the heat flux density in each period with a steady temperature regime is presented. In conclusion, the necessity to improve both theoretical and experimental approaches to determining the heat transfer resistance is highlighted.

Keywords: heat transfer resistance, active heat transfer resistance, reactive heat transfer resistance, heat transfer in soil, experimental methods, external enclosing structures, heat flow, indoor and outdoor air temperatures.

For citation: Zubarev K.P., Borodulina A.I., Gallyamova A.R. Theoretical and experimental methods for determining the heat transfer resistance. Literature review. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 6, pp. 9–14. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-9-14>

Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций – это свойство ограждения, которое характеризует уровень теплоизоляционных свойств конструкций [1, 2]. Чем больше сопротивление теплопередаче, тем выше их теплоизоляционные свойства, т. е. тем меньший тепловой поток проходит

через эту конструкцию, тем меньше потери тепла через нее [3, 4].

Расчет сопротивления теплопередаче различных ограждающих конструкций является актуальной задачей в настоящее время. С этим параметром тесно связаны вопросы энергоэффективности и энергосбе-

режения [5]. Грамотно сконструированная ограждающая конструкция позволяет экономить энергию, поддерживать необходимые условия внутреннего микроклимата [6, 7].

Существует множество теоретических и экспериментальных методов определения сопротивления теплопередаче, изучением которых занимаются многие ученые [1–20].

Сопротивление теплопередаче

как составляющая уравнения теплопередачи

Современная теория теплопередачи базируется на уравнении нестационарной теплопроводности [1–7]:

$$c \cdot \gamma_0 \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где t – температура, °С; τ – время, с; x – координата, м; λ – теплопроводность материала, Вт/(м·°С); γ_0 – плотность сухого материала, кг/м³; c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°С).

Теплообмен между воздухом и поверхностью ограждающей конструкции обеспечивается за счет граничных условий третьего рода [1–7]:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_n (t_n - t_1); \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=l} = \alpha_e (t_e - t_N), \quad (3)$$

где α_n – коэффициент теплоотдачи между поверхностью ограждающей конструкции и наружным воздухом, Вт/(м²·°С); t_n – температура наружного воздуха, °С; α_e – коэффициент теплоотдачи между поверхностью ограждающей конструкции и внутренним воздухом, Вт/(м²·°С); t_e – температура внутреннего воздуха, °С; t_N – температура материала в N-м сечении ограждающей конструкции, °С; l – длина конструкции, м.

В случае многослойной ограждающей конструкции в рассмотрение вводят неразрывность температуры между слоями (граничные условия четвертого рода) [1–7]:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=v-0} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=v+0}. \quad (4)$$

Для большинства задач строительства достаточно рассмотрения уравнения стационарной теплопроводности для многослойного ограждения [1–7]:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x}) = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) с граничными условиями (2)–(4) позволяет сформулировать уравнение теплопередачи [1–7]:

$$Q = \frac{F \cdot \Delta t}{R}, \quad (6)$$

где Q – тепловой поток между греющей и нагреваемой средами, Вт; F – площадь поверхности теплопередачи, м²; Δt – температурный напор (применительно к строительству – между внутренним и наружным воздухом), °С; R – сопротивление теплопередаче, (м²·°С)/Вт.

Определение сопротивления теплопередаче согласно официально действующим нормативным документам на территории Российской Федерации

Официально действующий нормативный документ СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» выделяет условное сопротивление теплопередаче:

$$R_0^{всл} = \frac{1}{\alpha_B} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_H}, \quad (7)$$

где $R_0^{всл}$ – условное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м²·°С/Вт; δ – толщина слоя ограждающей конструкции, м.

Под условным сопротивлением теплопередаче понимают сопротивление без учета точечных и линейных теплотехнических неоднородностей.

Также в СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» приведена формула приведенного сопротивления теплопередаче, которая учитывает теплотехнические неоднородности:

$$R_0^{ип} = \frac{1}{\frac{1}{R_0^{всл}} + \sum l_j \psi_j + \sum n_k \chi_k}, \quad (8)$$

где $R_0^{ип}$ – приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м²·°С/Вт; l_j – протяженность линейной неоднородности j -го вида, приходящаяся на 1 м² фрагмента теплозащитной оболочки здания, или выделенной ограждающей конструкции, м/м²; ψ_j – удельные потери теплоты через линейную неоднородность j -го вида, Вт/(м²·°С); n_k – количество точечных неоднородностей, приходящихся на 1 м² фрагмента теплозащитной оболочки здания, или выделенной ограждающей конструкции, шт./м²; χ_k – удельные потери теплоты через точечную неоднородность k -го вида, Вт/°С.

Подробный расчет неоднородностей можно провести по СП 230.1325800.2015 «Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей».

Фактически, согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», приведенное сопротивление любой ограждающей конструкции должно быть выше сопротивления теплопередаче, определенного по санитарно-гигиеническим требованиям и условиям энергосбережения.

Сопротивление теплопередаче исходя из санитарно-гигиенических требований определяется по формуле:

$$R_0^{гп} = \frac{(t_e - t_n)}{\Delta t^n \cdot \alpha_e}, \quad (9)$$

где t_e – температура внутреннего воздуха, °С; t_n – расчетная зимняя температура наружного воздуха, равная средней температуре наиболее холодной пятидневки, °С; Δt^n – нормативный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции, °С.

Сопротивление теплопередаче исходя из условий энергосбережения рассчитывается с помощью интерполяции градусо-суток отопительного периода.

Помимо нормативных значений сопротивления теплопередаче, существуют научные методы его определения, которые совершенствуются и модернизируются учеными [8–20].

Упрощенный метод расчета теплопотерь через массив грунта

О.Д. Самарин предложил методику более точного расчета сопротивления теплопередаче подземных частей здания. Его исследование основано на методе, в котором выделяется четырехбесконечный массив, заключенный между двумя полуплоскостями, показывающими соответственно, стенку подвала и поверхность грунта [8].

Проиллюстрировано представление разбиения грунта концентрическими окружностями, предложенное О.Д. Самариним (рис. 1) [8].

Автором предложено определять толщину дополнительных условных слоев по формулам [8]:

$$\delta_B = \frac{\lambda}{\alpha_B}; \quad (10)$$

$$\delta_H = \frac{\lambda}{\alpha_H}, \quad (11)$$

где δ_B и δ_H – дополнительные условные слои, м.

Чтобы посчитать сопротивление теплопередаче, необходимо взять температуру на границах данных вспомогательных слоев. На вспомогательных поверхностях задается постоянная температура, равная температуре наружного воздуха и воздуха внутри подвала. Для решения поставленной задачи О.Д. Самарин использует метод источников и стоков. Использование данной методики допустимо, поскольку для стационарных условий распространение теплоты в твердых телах подчиняется уравнению Лапласа. Автор с помощью представленной методики определяет, что источником служит точечный вихрь, вследствие чего линии тока представляют собой концентрические окружности, длину которых можно определить по формуле:

$$l = \frac{\pi r}{2}, \quad (12)$$

где l – длина линии тока, м; вдоль которой распространяется теплота, м; r – радиус рассматриваемой окружности, м.

Далее определяется плотность теплового потока для каждой линии [8]:

$$q = \frac{\lambda}{l}(t_B - t_H) = \frac{2\lambda}{\pi r}(t_B - t_H), \quad (13)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м².

Общий линейный тепловой поток между двумя линиями тока находится с помощью интегрирования выражения и может быть вычислен по формуле [8]:

$$Q_{1-2} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{2\lambda}{\pi r}(t_B - t_H) dr = \frac{2\lambda}{\pi}(t_B - t_H) \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right), \quad (14)$$

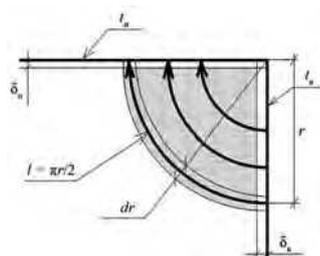


Рис. 1. Разбиение грунта концентрическими окружностями, предложенное О.Д. Самариним [8]

Fig. 1. Subdivision of soil by concentric circles, proposed by O.D. Samarin [8]

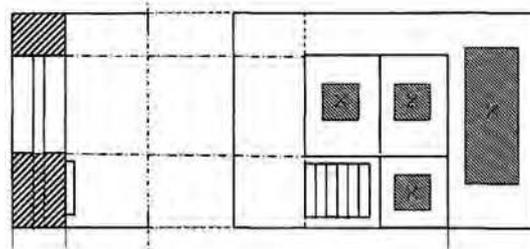


Рис. 2. Схема, предложенная авторами статьи, для разбиения поверхности ограждения на базовые участки (термически однородные зоны) [19]

Fig. 2. The scheme proposed by the authors of the article for dividing the surface of the fence into basic sections (thermally homogeneous zones) [19]

где Q_{1-2} – общий линейный тепловой поток между линиями тока 1 и 2, Вт/м; r_1 – радиус первой концентрической окружности, м; r_2 – радиус второй концентрической окружности, м.

Для поверхности стены известной ширины δ вычисляется сопротивление теплопередаче по представленной ниже формуле [8]:

$$R_{1-2} = \frac{(t_B - t_H) A_{1-2}}{Q_{1-2}} = \frac{\pi(r_2 - r_1)}{2\lambda \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{\pi\delta}{2\lambda \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, \quad (15)$$

где R_{1-2} – среднее значение сопротивления теплопередаче для участка поверхности стены между r_1 и r_2 , м²·°С/Вт; A_{1-2} – площадь поверхности стены между двумя концентрическими окружностями r_1 и r_2 , м².

Формула (13) позволяет повысить точность расчета теплопотерь подземных помещений и конструкций.

Данный подход дает больше возможностей, чем классическое разбиение массива грунта на зоны.

Определение реактивного и активного термического сопротивлений

Т.А. Мусорина, М.Р. Петриченко и др. рассматривают активное и реактивное термические сопротивления ограждающих конструкций, которые в сумме образуют общее термическое сопротивление. Ученым удалось установить зависимость активного сопротивления от общего и его различие с реактивной составляющей [13].

Активное термическое сопротивление – это одна из составляющих полного термического сопротивления, отвечающая за стационарный режим подачи тепла и определяемая в любой точке стенового ограждения при фиксированном значении параметра времени. Реактивная составляющая отвечает за нестационарный режим [13].

Активное сопротивление стены можно вычислить, применяя следующую формулу [13]:

$$R_a = \frac{1}{\rho C w_T} = \frac{\delta_T}{\lambda}, \quad (16)$$

где R_a – активное термическое сопротивление, м²·°С/Вт; C – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С); w_T – скорость распространения температурной волны, м/с; δ_T – толщина температурного пограничного слоя, м.

Также с помощью аналогичного выражения можно записать и полное термическое сопротивление [13]:

$$R = \frac{1}{\rho C w_q} = \frac{\delta_q}{\lambda}, \quad (17)$$

где w_q – скорость распространения теплового потока, м/с; δ_q – толщина теплового пограничного слоя, м.

В зависимости, выведенной авторами, выполняются условия равенства волновых чисел Пекле [13]:

$$\frac{w_T \delta_T}{a} = \frac{w_q \delta_q}{a} = 1. \quad (18)$$

Из тождества (17) получаем отношение полного термического сопротивления к активному термическому сопротивлению [13]:

$$\frac{R}{R_a} = \frac{w_T}{w_q} = \frac{\delta_T}{\delta_q}. \quad (19)$$

Также авторы предложили вывести другой способ определения активного и полного термических сопротивлений. Уравнение имеет следующий вид [13]:

$$\frac{\delta_T}{\delta} = \frac{\partial_T^{\frac{1}{2}} \theta_0}{\theta_0}, \quad (20)$$

$$\frac{\delta_q}{\delta} = \frac{\theta_0}{\partial_q^{\frac{1}{2}} \theta_0}, \quad (21)$$

где θ_0 – перепад температуры на грани $y=0$, °C (y – координата, отсчитываемая поперек стенового ограждения по направлению распространения потока тепла).

Из вышерасположенных формул получается следующая зависимость между общим и активным термическими сопротивлениями [13]:

$$\frac{R}{R_a} = \frac{\theta_0^2}{(\partial_T^{\frac{1}{2}} \theta_0)(\partial_q^{\frac{1}{2}} \theta_0)}. \quad (22)$$

Благодаря этим формулам ученые смогли установить отношения толщин температурного и теплового слоев к общей толщине стены, зависимость между полным и активным термическими сопротивлениями при стационарном температурном режиме однородной ограждающей конструкции.

Отношение толщины температурного слоя к общей толщине исследуемой стены может быть определено по формуле [13]:

$$\frac{\delta_T}{\delta} = \frac{1}{2}. \quad (23)$$

Отношение толщины теплового слоя к общей толщине исследуемой стены может быть определено по формулам [13]:

$$\frac{\delta_q}{\delta} = 1; \quad (24)$$

$$\frac{R}{R_a} = 2. \quad (25)$$

При периодическом изменении температуры в точке $y=0$ для полуграниченной стены, принимая за период изменения температуры величину t_0 , для глубины проникновения температурной волны можно получить следующее выражение [13]:

$$\delta_T = \sqrt{\frac{a t_0}{\pi}}, \quad (26)$$

где t_0 – период изменения температуры, с.

Однако для теплоустойчивости стенового ограждения обязательно выполнение неравенства [13]:

$$\delta_T < \delta. \quad (27)$$

В ситуации, когда толщина температурного слоя много меньше общей толщины стены, будут выполняться приведенные ниже равенства [13–18]:

$$R_r = R - R_a; \quad (28)$$

$$R = R_a \cdot \frac{\pi}{2}, \quad (29)$$

где R_r – реактивное сопротивление, м²·°C/Вт.

Таким образом, метод Т.А. Мусориной и М.Р. Петриченко позволяет рассчитывать сопротивление теплопередаче однослойной ограждающей конструкции в другом виде, нежели принято по СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий».

Экспериментальный метод

определения сопротивления теплопередаче

Определение сопротивления теплопередаче может осуществляться с помощью не только расчетных методов, но и экспериментальных [19–20].

Проиллюстрирована схема разбиения поверхности стены на термически однородные зоны [19] (рис. 2).

Данный метод заключается в поиске среднего значения плотности теплового потока q в каждом периоде с установившимся температурным режимом. Периоды выявляются посредством обработки данных, полученных при снятии показаний в экспериментах. Измерения плотности теплового потока, температуры внутреннего и наружного воздуха (t_a и t_n) производятся на термически однородной зоне (базовом участке). Обработка данных включает в себя построение графиков изменения измеряемых величин в зависимости от времени. Под участками с установившимся температурным режимом понимают те участки графика, где отклонения t_n от средней температуры участка не выходят за пределы $\pm 2,5$ °C. Далее вычисляется среднее значение сопротивления теплопередачи на участке. Фактическая плотность теплового потока q_ϕ определяется по формуле [19]:

$$q_\phi = \frac{q \cdot (t_a - t_n)}{(t_a - t_n) - q \cdot (R_T - R_C)}, \quad (30)$$

где q_ϕ – фактическая плотность теплового потока, Вт/м²; q – средняя за расчетный период плотность теплового потока, Вт/м²; R_T – термическое сопротивление преобразователя теплового потока, м²·°C/Вт; R_C – термическое сопротивление слоя подложки, прикрепляющей преобразователь теплового потока к поверхности, на которой производится измерения, м²·°C/Вт.

Сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции вычисляется по следующей формуле [19]:

$$R_0 = \frac{(t_a - t_n)}{q_\phi}, \quad (31)$$

где R_0 – общее сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м²·°C/Вт.

Заключение

Были рассмотрены научные работы различных авторов, главной целью которых являлось определе-

ние сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий. Рассмотрены как теоретические методы, представляющие собой модели процессов, так и практические, экспериментальные методы, применяемые на практике.

Основу нормативной базы России по тепловой защите зданий составляет СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий». Согласно этому нормативному документу необходимо вычислять условное, приведенное и требуемое сопротивление теплопередаче для проектирования ограждающих конструкций.

Существует метод расчета сопротивления теплопередаче грунта, предложенный О.Д. Самариным, который дает больше возможности, чем классический метод [8].

Список литературы

1. Zubarev K.P., Gagarin V.G. Determining the coefficient of mineral wool vapor permeability in vertical position // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. Vol. 1259, pp. 593–600. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_56
2. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Graphical method for determination of maximum wetting plane position in enclosing structures of buildings // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. 022046. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022046
3. Zubarev K.P., Gagarin V.G. Experimental comparison of construction material vapor permeability in case of horizontal or vertical sample position // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463. 032082. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032082
4. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Moisture behavior calculation of single-layer enclosing structure by means of discrete-continuous method // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 170. 03014. DOI: 10.1051/mateconf/201817003014
5. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. The moisture regime calculation of single-layered enclosing // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. 012105. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012105
6. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Mathematical model using discrete-continuous approach for moisture transfer in enclosing construction // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463. 022023. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022023
7. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Assessment of enclosing structure moisture regime using moisture potential theory // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 193. 03053. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819303053>
8. Самарин О.Д. Обоснование упрощенного метода определения теплопотерь через подземные части ограждений здания // *Вестник МГСУ*. 2016. № 1. С. 118–125.

Т.А. Мусорина и М.Р. Петриченко разработали представление полного сопротивления теплопередаче однослойного ограждения с помощью активной и реактивной составляющих, что является принципиально другим подходом к определению теплового потока в строительной теплофизике [13].

Несмотря на существование уравнения теплопроводности, ученые до сих пор развивают методы экспериментального определения сопротивления теплопередаче.

Наиболее перспективные методы те, которые повысят точность расчетов ограждающих конструкций и смогут быть автоматизированы для упрощения работы практических инженеров.

References

1. Zubarev K.P., Gagarin V.G. Determining the coefficient of mineral wool vapor permeability in vertical position. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. Vol. 1259, pp. 593–600. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_56
2. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Graphical method for determination of maximum wetting plane position in enclosing structures of buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. 022046. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022046
3. Zubarev K.P., Gagarin V.G. Experimental comparison of construction material vapor permeability in case of horizontal or vertical sample position. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463. 032082. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032082
4. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Moisture behavior calculation of single-layer enclosing structure by means of discrete-continuous method. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 170. 03014. DOI: 10.1051/mateconf/201817003014
5. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. The moisture regime calculation of single-layered enclosing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. 012105. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012105
6. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Mathematical model using discrete-continuous approach for moisture transfer in enclosing construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463. 022023. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022023
7. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Assessment of enclosing structure moisture regime using moisture potential theory. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 193. 03053. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819303053>
8. Samarin O.D. Substantiation of the simplified method of determining heat losses through underground parts of building enclosures. *Vestnik MGSU*. 2016. No. 1, pp. 118–125. (In Russian).

9. Самарин О.Д. Расчет температуры на внутренней поверхности наружного угла здания с современным уровнем защиты // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2005. № 8. С. 52–56.
10. Малявина Е.Г., Иванов Д.С. Определение теплопотерь подземной части зданий расчетом трехмерного температурного поля грунта // *Вестник МГСУ*. 2011. № 7. С. 209–215.
11. Малявина Е.Г., Иванов Д.С. Расчет трехмерного температурного поля грунта с учетом промерзания при определении теплопотерь // *Вестник МГСУ*. 2011. № 3–1. С. 371–376.
12. Гиндоян А.Г., Грушко В.Я., Сундуков И.Ю. Исследование теплопотерь через полы по грунту. *Строительная физика в XXI веке: Материалы науч.-техн. конф.* / Под ред. И.Л. Шубина. М.: НИИСФ РААСН, 2006. С. 207–211.
13. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р., Заборова Д.Д., Гамаюнова О.С. Определение активного и реактивного сопротивления для однослойного стенового ограждения // *Вестник МГСУ*. 2020. № 8. С. 1126–1134.
14. Мусорина Т.А., Заборова Д.Д., Гамаюнова О.С., Петриченко М.Р. Термическое сопротивление однородного стенового ограждения. *Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Мат. XXII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева*. М.: Шанс, 2019. С. 209–211.
15. Козинец Г.Л., Локтионова Е.А., Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Термическое сопротивление однородной изотропной теплопроводной среды // *Строительство и техногенная безопасность*. 2019. № 16. С. 105–110.
16. Самарин О.Д. Энергетический баланс гражданских зданий и возможные направления энергосбережения // *Жилищное строительство*. 2012. № 8. С. 2–4.
17. Самарин О.Д. Периодические температурные колебания в цилиндрическом слое при большой толщине стенки // *Инженерно-строительный журнал*. 2019. № 1 (85). С. 51–58.
18. Корниенко С.В. Проблемы теплозащиты наружных стен современных зданий // *Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Полиматематическая*. 2013. № 1. С. 13.
19. Пилипенко Н.В., Лазуренко Н.В. Методика определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий различного назначения. *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*. 2006. № 31. С. 73–77.
20. Могутов В.А. Обобщение опыта натуральных экспериментальных обследований объектов ЖКХ. Отчет НИИСФ РААСН. М., 2005.
9. Samarin O.D. Calculation of the temperature on the inner surface of the outer corner of the building with a modern level of protection. *Izvestiya vy'sshikh uchebny'kh zavedenij. Stroitel'stvo*. 2005. No. 8, pp. 52–56. (In Russian).
10. Malyavina E.G., Ivanov D.S. Definition of heat loss for underground part of building by calculation of three-dimensional soil temperature pattern. *Vestnik MGSU*. 2011. No. 7, pp. 209–215. (In Russian).
11. Malyavina E.G., Ivanov D.S. Calculation of three-dimensional soil temperature pattern taking into account the soil freezing when determining heat loss. *Vestnik MGSU*. 2011. No. 3–1, pp. 371–376. (In Russian).
12. Gindoyan A.G., Grushko V.Ya., Sundukov I.Yu. Study of heat loss through floors on the ground. *Construction physics in the XXI century: materials of science and technology. conf.* / edited by I. L. Shubin. Moscow: NIISF RAASN. 2006, pp. 207–211. (In Russian).
13. Musorina T.A., Petrichenko M.R., Zaborova D.D., Gamayunova O.S. Determination of active and reactive thermal resistance of one-layer building envelopes. *Vestnik MGSU*. 2020. No. 8, pp. 1126–1134. (In Russian).
14. Musorina T.A., Zaborova D. D., Gamayunova O. S., Petrichenko M.R. Thermal resistance homogeneous enclosure structure. *Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants: mat. XXII School-seminar of young scientists and specialists under the leadership of Academician of the Russian Academy of Sciences A.I. Leontiev*. Moscow: Chance. 2019, pp. 209–211. (In Russian).
15. Kozinets G.L., Loctionova E.A., Musorina T.A., Petrichenko M.R. Thermal resistance of homogeneous isotropic heat-conducting medium. *Construction and industrial safety. Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*. 2019. No. 16, pp. 105–110. (In Russian).
16. Samarin O.D. Energy balance of civil buildings and possible directions of energy saving. *Zhilishhnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2012. No. 8, pp. 2–4. (In Russian).
17. Samarin O.D. The periodic temperature oscillations in a cylindrical profile with a large thickness. *Magazin of civil engineering*. 2019. No. 1 (85), pp. 51–58.
18. Kornienko S.V. Problem of thermal protection of external walls of modern buildings. *Internet-vestnik VolgGASU. Seriya: Polimatematiceskaya*. 2013. No. 1, p. 13. (In Russian).
19. Pilipenko N.V., Lazurenko N.V. Method of determining the heat transfer resistance of enclosing structures of buildings for various purposes. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta Informacionny'kh tekhnologij, mekhaniki i optiki*. 2006. No. 31, pp. 73–77. (In Russian).
20. Mogutov V.A. Generalization of the experience of field experimental surveys of housing and communal services facilities. Report of the NIISF RAASN. Moscow. 2005. (In Russian).

П.П. ПАСТУШКОВ^{1,2}, канд. техн. наук (pavel-one@mail.ru);
В.Г. ГАГАРИН^{1,2,3}, д-р техн. наук, проф., член-корр. РААСН (gagarinv@yandex.ru)

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

² Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова (119192, г. Москва, Мичуринский пр., 1)

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Воздухопроницаемость минераловатных изделий современного производства

Проведены исследования воздухопроницаемости современных минераловатных изделий из стеклянного и каменного волокна. Описана экспериментальная установка и ход испытаний воздухопроницаемости строительных материалов. Приведена методика графического нахождения коэффициента воздухопроницаемости и сопротивления воздухопроницанию, а также определения характеристик воздухопроницаемости, используемых в европейских нормативных документах: сопротивления продуванию потоком воздуха (airflow resistance), удельного сопротивления потоку (airflow resistivity) и воздухопроницаемости (air permeability) по найденной зависимости перепада давления от расхода воздуха через образец (по методике отечественного стандарта). Описаны и проанализированы результаты нахождения показателей воздухопроницаемости минераловатных изделий из стеклянного и каменного волокна. Найденны показатели фильтрации для основных типов минераловатной изоляции современного производства, установлена зависимость воздухопроницаемости от плотности. Описаны новые методические наработки, полученные в ходе исследований, которые предлагается учесть при разработке и актуализации нормативных документов по данному вопросу.

Ключевые слова: минераловатные изделия, воздухопроницаемость, сопротивление воздухопроницанию, навесные фасадные системы, перепад давления, расход воздуха, показатель режима фильтрации.

Для цитирования: Пастушков П.П., Гагарин В.Г. Воздухопроницаемость минераловатных изделий современного производства // *Строительные материалы*. 2021. № 6. С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-15-20>

P.P. PASTUSHKOV^{1,2}, Candidate of Sciences (Engineering) (pavel-one@mail.ru);

V.G. GAGARIN^{1,2,3}, Doctor of Sciences, (Engineering), Corresponding Member RAACS (gagarinv@yandex.ru)

¹ Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

² Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University (1, Michurinsky Avenue, Moscow, 119192, Russian Federation)

³ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Air Permeability of Mineral Wool Products of Modern Production

The article is devoted to the description of studies of air permeability of modern mineral wool products made of glass and stone fibers. The experimental setup and the course of testing the air permeability of building materials are described. A method for graphically finding the coefficient of air permeability and resistance to air permeability, as well as the characteristics of air permeability used in European regulatory documents: airflow resistance, airflow resistivity and air permeability from the found dependence of the pressure drop on the flow rate air through the sample (according to the method of the domestic standard). The results of finding indicators of air permeability of mineral wool products made of glass and stone fibers are described and analyzed. Filtration indicators for the main types of mineral wool insulation of modern production are found, the dependence of air permeability on density is established. New methodological developments obtained in the course of research are described, which are proposed to be taken into account when developing and updating regulatory documents on this issue.

Keywords: mineral wool products, air permeability, air permeability resistance, suspended facade systems, pressure drop, air flow rate, filtration mode indicator.

For citation: Pastushkov P.P., Gagarin V.G. Air permeability of mineral wool products of modern production. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 6, pp. 15–20. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-15-20>

Воздухопроницаемостью называется свойство материала пропускать воздух при наличии разности давления на противоположных поверхностях изделия из этого материала. Воздухопроницаемость определяется количеством воздуха, проходящим через единицу площади изделия в единицу времени, и характеризуется показателем, называемым коэффициентом воздухопроницаемости.

Воздухопроницаемость теплоизоляционных материалов непосредственно влияет на теплозащитные свойства ограждающих конструкций. Исследованиями воздухопроницаемости строительных материалов занимались как отечественные, так и зарубежные ученые начиная с XIX в. При этом наиболее обстоятельные работы в этой области были проведены

Р.Е. Брилингом [1] в период с 1935 по 1948 г. Определенные им значения сопротивлений воздухопроницанию слоев различных строительных материалов до сих пор используются специалистами, а обобщенные результаты легли в основу соответствующего раздела СНиП «Строительная теплотехника» (в настоящее время СП 50.13330.2012 «СНиП 23-02–2003 Тепловая защита зданий»).

В связи с широким распространением начиная с 2000-х гг. в РФ навесных фасадных систем (НФС) и применением минераловатных изделий большую актуальность приобрел вопрос прогнозирования их теплозащитных свойств с учетом фильтрации воздуха в слое утеплителя [2–5]. В НИИСФ РААСН была разработана методика учета продольной фильтра-

ции [6–8], а также проведен ряд экспериментальных исследований [9], которые послужили основой для разработки нового стандарта ГОСТ 32493–2013 «Материалы и изделия теплоизоляционные. Метод определения воздухопроницаемости и сопротивления воздухопроницанию». Методика данного стандарта последние несколько лет активно используется в секторе испытаний теплофизических характеристик строительных материалов лаборатории строительной теплофизики НИИСФ РААСН. При этом исследования по данной тематике описываются крайне редко [10–12].

В настоящее время ведется подготовка нового нормативного документа (свода правил) по проектированию НФС. Актуальными вопросами для специалистов в области строительной теплофизики при разработке этого документа являются: установка критерия по сопротивлению воздухопроницанию теплоизоляционного слоя (а до этого – обоснование необходимости введения такого критерия), а также устранение путаницы, возникающей в связи с применением многими производителями теплоизоляционных материалов данных, полученных по методике зарубежного нормативного документа (переведенного в РФ) ГОСТ EN 29053–2011 «Материалы акустические. Методы определения сопротивления продуванию потоком воздуха».

Настоящая статья посвящена описанию исследований воздухопроницаемости современных минераловатных изделий из стеклянного и каменного волокна, а также выявленных при этом обобщенных зависимостей. Наряду с этим описаны новые методические разработки, полученные в ходе данных исследований, которые предлагается учесть при разработке и актуализации нормативных документов по данному вопросу.

Методика исследований воздухопроницаемости

Схема испытательной установки для определения воздухопроницаемости строительных материалов, реализующей методику отечественного стандарта ГОСТ 32493–2013, приведена на рис. 1.

При помощи компрессора и регулирующей арматуры последовательно (ступенчато) увеличивается поток воздуха через образец (в диапазоне измерений выбранного расходомера (ротаметра) воздуха с шагом в 5%, вплоть до верхнего предела измерений – 100%). При этом манометром на каждом шаге испытания измеряется соответствующий перепад давления по разные стороны от образца.

По результатам измерений вычисляются коэффициент воздухопроницаемости материала, i , кг/(м·ч·(Па)ⁿ), входящий в уравнение фильтрации воздуха (установленного на основании закона Дорси):

$$G_i = \frac{(\Delta P)^n}{\delta}, \quad (1)$$

где G – плотность потока воздуха, кг/(м²·ч); ΔP – перепад давления, Па; δ – толщина образца, м; n – показатель режима фильтрации.

Для этого по зафиксированным значениям расхода воздуха, Q_i , м³/ч, вычисляется значение плот-

ности потока воздуха, проходящего через образец, G_i , кг/(м²·ч), по формуле:

$$G_i = (\gamma_v \cdot Q_i) / S, \quad (2)$$

где γ_v – плотность воздуха, кг/м³; S – площадь лицевой поверхности образца, м².

Далее уравнение (1) представляется в виде (логарифмируется):

$$\ln G = \ln \left(\frac{i}{\delta} \right) + n \cdot \ln \Delta P. \quad (3)$$

По экспериментально найденному набору данных $\{\Delta P_i, G_i\}$ в логарифмических координатах строится график: $\ln(G_i)$ в зависимости от соответствующих $\ln(\Delta P_i)$. Значение показателя режима фильтрации n определяется как тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой.

Коэффициент воздухопроницаемости материала i , кг/(м·ч·(Па)ⁿ), после дополнительного построения в логарифмических координатах определяется по формуле:

$$i = \delta \cdot \exp(b), \quad (4)$$

где b – ордината пересечения прямой с осью $\ln G$.

Сопротивление воздухопроницанию образца материала R_u , (м²·ч·(Па)ⁿ)/кг, определяется по формуле:

$$R_u = \exp(-b). \quad (5)$$

Отдельной задачей являлось определение характеристик воздухопроницаемости, используемых в европейских нормативных документах (ГОСТ EN 29053): сопротивления продуванию потоком воздуха (airflow resistance), R , (Па·с)/м³; удельного сопротивления потоку (airflow resistivity), r , (Па·с)/м², и воздухопроницаемости (air permeability), l , м³/(Па·м·с), по найденной зависимости перепада давления от расхода воздуха через образец (по методике отечественного ГОСТ 32493–2013). Для этого рассматривался участок массива экспериментальных данных при малых значениях расходов воздуха, от 1,5 до 2,5 м³/ч. Минимум по трем значениям расхода воздуха, Q_i , м³/ч, в данном диапазоне и соответствующих им значениям перепада давления, ΔP_i , Па, вычислялись значения сопротивления продуванию потоком воздуха (airflow resistance), R_i , Па·с/м³, по формуле:

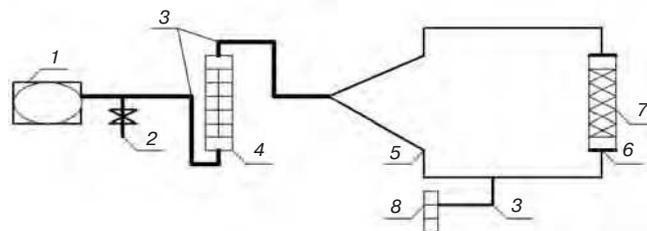


Рис. 1. Схема испытательной установки для определения воздухопроницаемости: 1 – компрессор; 2 – регулирующая запорная арматура; 3 – шланги; 4 – расходомеры (ротаметры) воздуха; 5 – герметичная камера, обеспечивающая стационарный режим движения воздуха; 6 – приспособление для герметичного крепления образца; 7 – образец; 8 – манометр

Fig. 1. Test setup for determining air permeability: 1 – compressor; 2 – control valves; 3 – hoses; 4 – air flow meters (rotameters); 5 – a sealed chamber providing a stationary mode of air movement; 6 – device for sealed fixing the sample; 7 – sample; 8 – manometer



Рис. 2. Экспериментальная установка по определению воздухопроницаемости

Fig. 2. Experimental setup for determining air permeability

$$R_i = \frac{\Delta P_i}{Q_i} \quad (6)$$

Среднее значение сопротивления продуванию потоком воздуха (airflow resistance), R , Па·с/м³, рассчитывалось как среднеарифметическое значение найденных значений R_i .

Далее значения удельного сопротивления потоку (airflow resistivity), r , Па·с/м², и воздухопроницаемости (air permeability), l , м³/(Па·м·с), вычислялись соответственно по формулам:

$$r = \frac{R_s}{\delta} = \frac{R \cdot S}{\delta}; \quad (7)$$

$$l = \frac{1}{r}, \quad (8)$$

где R_s – удельное сопротивление продуванию потоком воздуха, Па·с/м.

Результаты исследований воздухопроницаемости

Испытания проводились на образцах изделий семи марок минеральной изоляции из стеклянной ваты производства ООО «УРСА Евразия», а также на восьми марках каменной ваты (разной плотности) на специальной экспериментальной установке НИИСФ РААСН, реализованной по описанной выше схеме (рис. 2). Испытания проводились на трех образцах

каждой марки, представляющих собой квадратные пластины таких размеров, чтобы после закрепления в испытательной установке воздух проходил через сечение образца 200×200 мм.

Графическая обработка экспериментальных данных для минераловатных изделий из стеклянного волокна URSA представлена на рис. 3. Рядом с аппроксимирующими экспериментальные точки прямыми в логарифмических координатах выписаны определяющие их функции, по коэффициентам которых находились параметры уравнения воздухопроницаемости (1) для соответствующей марки.

Показатели воздухопроницаемости испытанных марок минеральной изоляции URSA, найденные по формулам (3)–(8), представлены в табл. 1. Все изделия имели толщину 50 мм за исключением одного – толщиной 30 мм (толщина изделия влияет на сопротивление воздухопроницанию).

Аналогичным образом получены показатели воздухопроницаемости для каменной ваты, которые представлены в табл. 2. Испытанные изделия из каменной ваты имели толщину 100 мм.

Анализ полученных результатов

По анализу полученных данных для испытанных марок минераловатных изделий из стеклянного волокна установлено, что показатель режима фильтрации примерно одинаков и в среднем равен 1,25. При этом для изделий из каменной ваты показатель режима фильтрации колеблется от 1 до 1,15 (необходимо дополнительно проверить, возможно ли принимать его для упрощения равным 1). Также темой дополнительных исследований может служить анализ причин установленных различий в показателях режима фильтрации для изделий из стеклянного и каменного волокна.

Установлено, что коэффициент воздухопроницаемости зависит от плотности изделий из стеклянной и каменной ваты: чем выше плотность, тем меньше коэффициент воздухопроницаемости (с асимптотическим стремлением значения коэффициента воздухопроницаемости к 0,05 кг/(м·ч·Па)^{1,25} для стеклянной ваты и к 0,1 кг/(м·ч·Па) для каменной ваты при стремлении плотности материалов к максимальным значениям). Следовательно, имеется и обратная

Таблица 1
Table 1

Показатели воздухопроницаемости минераловатных изделий из стеклянного волокна
Indicators of air permeability of glass wool mineral insulation

Плотность, ρ , кг/м ³	Показатель режима фильтрации, n	Коэффициент воздухопроницаемости, i , кг/(м·ч·(Па) ^{n})	Сопротивление воздухопроницанию, R_u , м ² ·ч·(Па) ^{n} /кг	Сопротивление продуванию потоком воздуха, $R \times 10^3$, Па·с/м ³	Воздухопроницаемость, $l \times 10^{-6}$, м ³ /(Па·м·с)
16	1,23	0,277	0,211	14,5	88,6
19	1,26	0,29	0,34	20,4	63
20	1,15	0,278	0,184	14,9	86,1
23*	1,22	0,174	0,197	15,1	85,1
26	1,3	0,096	0,521	27	47,5
33*	1,26	0,066	0,632	32,5	39,5
75**	1,23	0,06	0,501	30,6	25,1

Примечания: * Изделия, кашированные стеклохолстом. ** Изделие толщиной 30 мм.

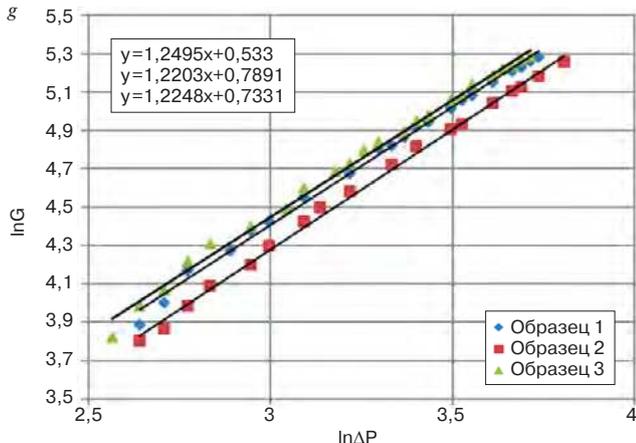
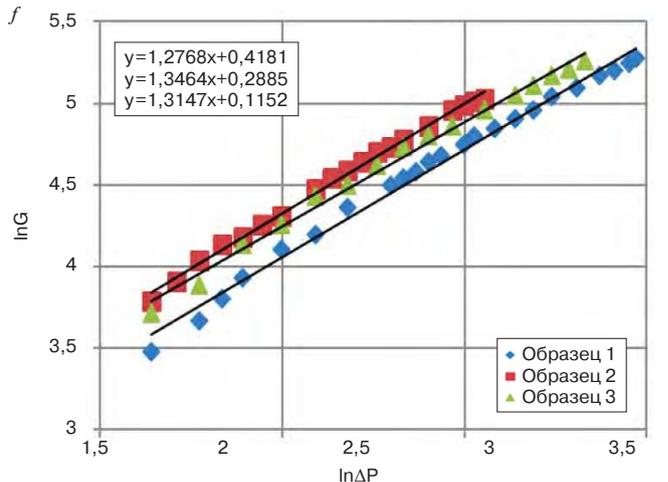
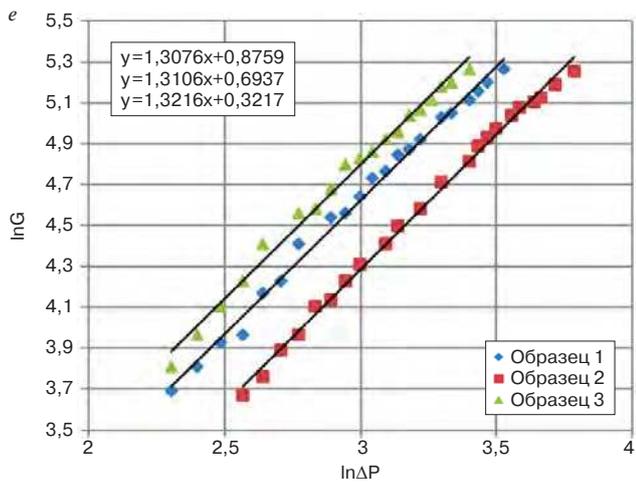
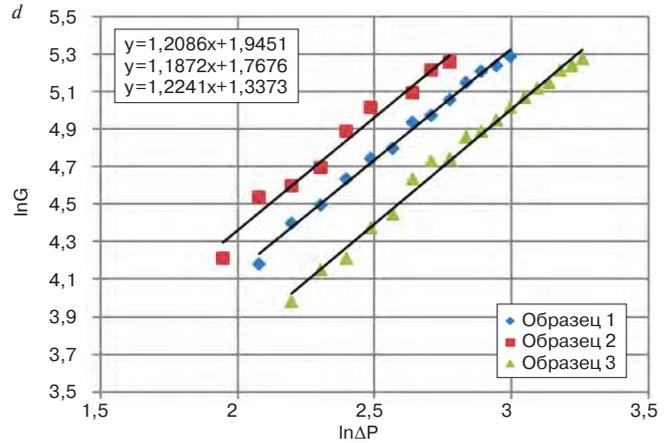
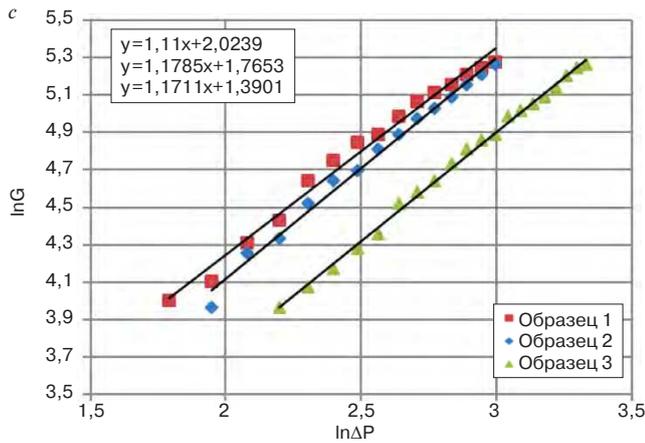
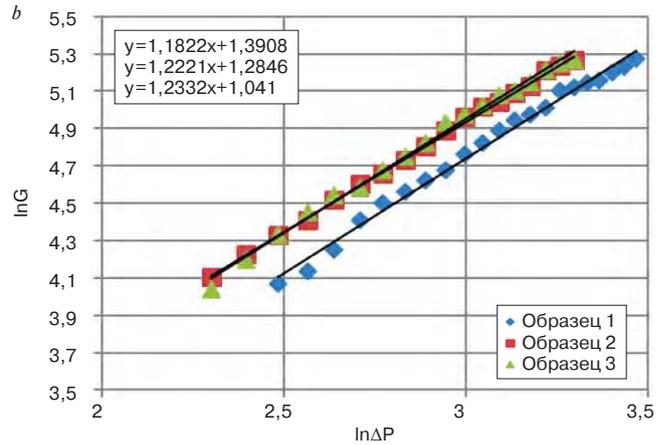
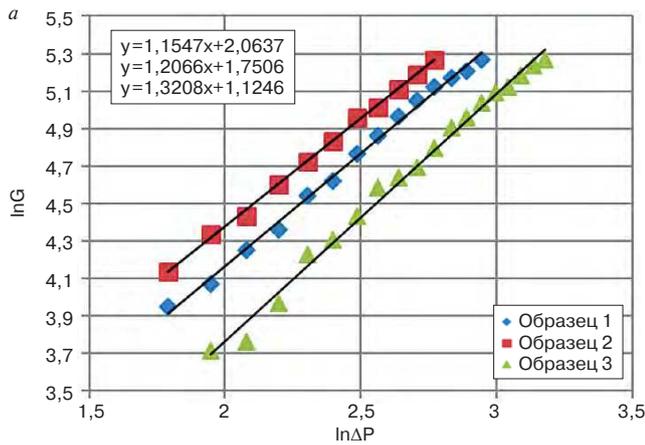


Рис. 3. Графическое определение параметров уравнения воздухопроницаемости образцов минеральной изоляции URSA: *a* – URSA 37 PN; *b* – URSA 35 QN; *c* – URSA 34 PN; *d* – URSA 34 P FB; *e* – URSA 33 PN; *f* – URSA 32 P FB; *g* – URSA 31 PN
Fig. 3. Graphical determination of the parameters of the equation of air permeability samples of URSA mineral insulation: *a* – URSA 37 PN; *b* – URSA 35 QN; *c* – URSA 34 PN; *d* – URSA 34 P FB; *e* – URSA 33 PN; *f* – URSA 32 P FB; *g* – URSA 31 PN

Таблица 2
Table 2Показатели воздухопроницаемости минеральной изоляции из каменной ваты
Indicators of air permeability of stone wool mineral insulation

Плотность, ρ , кг/м ³	Показатель режима фильтрации, n	Коэффициент воздухопроницаемости, i , кг/(м·ч·(Па) ^{n})	Сопротивление воздухопроницанию, $R_{и}$, (м ² ·ч·(Па) ^{n})/кг	Сопротивление продуванию потоком воздуха, $R \times 10^3$, (Па·с)/м ³	Воздухопроницаемость, $l \times 10^{-6}$, м ³ /(Па·м·с)
35	1,08	0,186	0,54	40,1	58,7
39	1,12	0,144	0,69	52,1	45,1
41	1,03	0,14	0,72	53,9	46,4
43	1,15	0,127	0,79	59,2	42,2
48*	1,05	0,132	0,76	77,1	31,1
56*	1,03	0,13	0,77	81	29,6
73	1,03	0,109	0,92	104,3	23,5
83	1,03	0,108	0,93	110,1	22,3

Примечание. * Изделия двойной плотности.

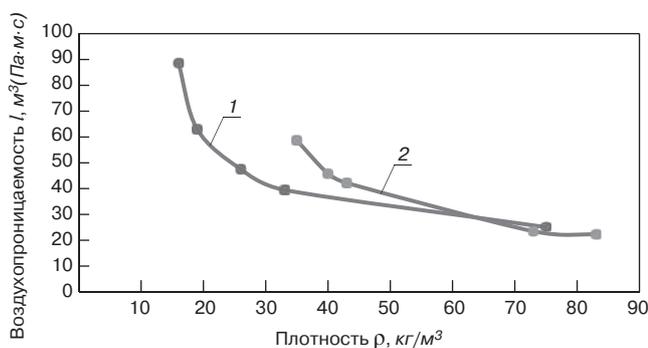


Рис. 4. Зависимость воздухопроницаемости минераловатных изделий от плотности: 1 – изделия из стеклянной ваты; 2 – изделия из каменной ваты

Fig. 4. The dependence of the air permeability of mineral wool products on the density: 1 – glass wool products; 2 – stone wool products

зависимость для сопротивления воздухопроницанию образцов: чем выше плотность изделия, тем больше сопротивление воздухопроницанию. Выпадают из общей зависимости изделия из стеклянного волокна, кэшированные стеклохолстом (при этом установлено, что сопротивление воздухопроницанию кэшированных изделий выше, чем у аналогичных изделий без покрытия стеклохолстом) и изделия двойной плотности из каменной ваты.

При анализе близких по сути характеристик воздухопроницаемости, принятых в отечественных и европейских нормах, определенных на одних и тех же марках минераловатных изделий: коэффициента воздухопроницаемости, i , кг/(м·ч·(Па) ^{n}), и воздухопроницаемости, l , м³/(Па·м·с), а также сопротивления воздухопроницанию, $R_{и}$, м²·ч·(Па) ^{n} /кг, и сопротивления продуванию потоком воздуха, R , Па·с/м³, в каждой из этих пар характеристик прослеживается зависимость, близкая к линейной. Однако разброс результатов не позволяет вывести коэффициент перевода из найденных характеристик по методике отечественного стандарта в характеристики из европейского.

В целом обобщенное уравнение фильтрации воздуха (1), заложенное в основу отечественного стандарта ГОСТ 32493–2013, позволяет более точно определить зависимость расхода воздуха через обра-

зец материала во всем диапазоне перепадов давления в отличие от переведенного европейского стандарта ГОСТ EN 29053–2011, но неудобство для специалистов составляет тот факт, что по определенному таким методом коэффициенту воздухопроницаемости невозможно сравнить различные материалы, если показатели фильтрации у материалов разные. При этом сравнивать показатели, определенные по европейскому стандарту ГОСТ EN 29053–2011, справедливо только при условии малых перепадов давления по разные стороны от образца материала. На рис. 4 представлен график зависимостей воздухопроницаемости, l , м³/(Па·м·с), от плотности изделий из стеклянной и каменной ваты (без учета марок, отличающихся по структуре). По анализу этого графика можно судить о близкой по характеру зависимости воздухопроницаемости от плотности изделий из стеклянной и каменной ваты.

Заключение

По результатам проведенных исследований получены важные для практики показатели воздухопроницаемости для современных минераловатных изделий, которые возможно использовать при расчетах по методике раздела «Воздухопроницаемость ограждающих конструкций» СП 50.13330.2012.

Наряду с этим найдены новые методические подходы по определению показателей воздухопроницаемости, используемых в европейских нормативных документах, по результатам экспериментов, проведенных по методике отечественного ГОСТ 32494–2013. Данные подходы необходимо отразить при ближайшей актуализации этого документа. При этом следует установить единые границы расхода воздуха, в которых определяются характеристики воздухопроницаемости, принятые в европейских нормативных документах, так как фактически они зависят от выбранного диапазона (в отличие от характеристик, принятых в отечественных нормативных документах, которые описывают весь диапазон измерений).

Для обоснования необходимости введения критерия по сопротивлению воздухопроницанию теплоизо-

ляционного слоя в НФС и нахождения его значения необходимо проведение комплекса натурных исследований. В настоящее время использование некоторых значений воздухопроницаемости для разрешения либо запрета использования какой-либо марки минераловатных изделий в НФС научно не обосновано.

Список литературы

- Брилинг Р.Е. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и материалов. М.: Госстройиздат, 1949.
- Гагарин В.Г., Козлов В.В., Цыкановский Е.Ю. Расчет теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором // *АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*. 2004. № 2. С. 20–26.
- Гагарин В.Г. Теплофизические проблемы современных стеновых ограждающих конструкций многоэтажных зданий // *Academia*. 2009. № 5. С. 297–305.
- Гагарин В.Г., Козлов В.В., Лущин К.И., Пастушков П.П. О применении ветрогидрозащитных мембран в навесных фасадных системах с вентилируемой воздушной прослойкой // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2012. № 5. С. 128–131.
- Гагарин В.Г., Гувернюк С.В., Кубенин А.С., Пастушков П.П., Козлов В.В. К методике расчета влияния ветровых воздействий на воздушный режим зданий // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2016. № 4. С. 234–240.
- Гагарин В.Г., Козлов В.В., Садчиков А.В., Мехнецов И.А. Продольная фильтрация воздуха в современных ограждающих конструкциях // *АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*. 2005. № 8. С. 60–70.
- Гагарин В.Г., Козлов В.В., Садчиков А.В. О влиянии продольной фильтрации воздуха на теплозащиту стен с вентилируемым фасадом // *Стройпрофиль*. 2005. № 6. С. 34–35.
- Гагарин В.Г., Козлов В.В., Садчиков А.В. Учет продольной инфильтрации воздуха при оценке теплозащиты стены с вентилируемым фасадом // *Промышленное и гражданское строительство*. 2005. № 6. С. 42–45.
- Козлов В.В., Курилюк И.С. Результаты экспериментальных исследований параметров воздухопроницаемости минеральной ваты // *Academia*. 2009. № 5. С. 500.
- Юрченко А.И., Щукина Т.В., Кузнецова Л.В. Влияние воздухопроницаемости наружных ограждений на энергосберегающую эксплуатацию зданий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 5. С. 79–83.
- Гудков С.И. Определение воздухопроницаемости минеральной ваты ТЕХНОВЕНТ СТАНДАРТ в лабораторных условиях // *Вестник современных исследований*. 2018. № 9.3 (24). С. 237–240.
- Вытчиков Ю.С., Сапарёв М.Е., Костуганов А.Б. Исследование влияния инфильтрации наружного воздуха на теплозащитные характеристики наружных стен высотных зданий // *Градостроительство и архитектура*. 2020. Т. 10. № 1. С. 30–35.

References

- Briling R.E. Air permeability of enclosing structures and materials. Moscow. Gosstroyizdat. 1949. (In Russian).
- Gagarin V.G., Kozlov V.V., Tsykanovsky E.Yu. Calculation of thermal protection of facades with a ventilated air gap. *AVOK: Ventilyaciya, otoplenie, kondicionirovanie vozduha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika*. 2004. No. 2, pp. 20–26. (In Russian).
- Gagarin V.G. Thermophysical problems of modern wall enclosing structures of multi-storey buildings. *Academia*. 2009. No. 5, pp. 297–305. (In Russian).
- Gagarin V.G., Kozlov V.V., Lushin K.I., Pastushkov P.P. On the use of wind-waterproof membranes in hinged facade systems with a ventilated air gap. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya*. 2012. No. 5, pp. 128–131. (In Russian).
- Gagarin V.G., Guvernyuk S.V., Kubenin A.S., Pastushkov P.P., Kozlov V.V. On the method of calculating the influence of wind effects on the air regime of buildings. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti*. 2016. No. 4, pp. 234–240. (In Russian).
- Gagarin V.G., Kozlov V.V., Sadchikov A.V., Mekhnetsov I.A. Longitudinal air filtration in modern enclosing structures. *AVOK: Ventilyaciya, otoplenie, kondicionirovanie vozduha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika*. 2005. No. 8, pp. 60–70. (In Russian).
- Gagarin V.G., Kozlov V.V., Sadchikov A.V. On the influence of longitudinal air filtration on the thermal protection of walls with a ventilated façade. *Strojprofil'*. 2005. No. 6, pp. 34–35. (In Russian).
- Gagarin V.G., Kozlov V.V., Sadchikov A.V. Consideration of longitudinal air infiltration when assessing the thermal protection of a wall with a ventilated façade. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2005. No. 6, pp. 42–45. (In Russian).
- Kozlov V.V., Kurilyuk I.S. Results of experimental studies of parameters of air permeability of mineral wool. *Academia*. 2009. No. 5, p. 500. (In Russian).
- Yurchenko A.I., Schukina T.V., Kuznetsova L.V. Influence of air permeability of external enclosures on energy-saving operation of buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018. No. 5, pp. 79–83. (In Russian)
- Gudkov S.I. Determination of air permeability of TECHNOVENT STANDARD mineral wool in laboratory conditions. *Vestnik sovremennyh issledovaniy*. 2018. No. 9.3 (24), pp. 237–240. (In Russian).
- Vytchikov Yu.S., Saparev M.E., Kostuganov A.B. Investigation of the influence of outdoor air infiltration on the heat-shielding characteristics of the outer walls of high-rise buildings. *Gradostroitel'stvo i arhitektura*. 2020. Vol. 10. No. 1, pp. 30–35. (In Russian).

УДК 534.6.08

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-21-24>

В.И. РИМШИН¹, д-р техн. наук (RimshinVI@mgsu.ru),
 П.С. ТРУНТОВ¹, магистрант (pavel_truntov@mail.ru);
 Е.С. КЕЦКО², аспирант (kkuzzina@mail.ru)

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

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук
 (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

Комплексный подход к выполнению акустических расчетов при техническом обследовании аварийного жилого фонда

Звукоизоляция ограждающих конструкций является одним из существенных факторов, влияющим на комфортность проживания. В статье рассмотрена методика проведения акустического расчета при обследовании многоквартирного жилого дома. По результатам технического обследования здание признано аварийным. Было зафиксировано большое количество дефектов, которые отрицательно влияют на акустические свойства ограждающих конструкций. Для стен здания определены индексы изоляции воздушного шума, которые являются нормируемыми параметрами звукоизоляции ограждающих конструкций. Расчет индекса производился как акустически плоской конструкции сплошного сечения с учетом поверхностной плотности. Для междуэтажных перекрытий расчетным путем был определен индекс ударного шума. Сделаны выводы по результатам проведенных акустических расчетов, отражены особенности выполнения таких расчетов при техническом обследовании аварийного жилого фонда, а также влияние имеющихся дефектов на звукоизоляционную способность ограждающих конструкций.

Ключевые слова: звукоизоляция, акустический расчет, техническое обследование, аварийный жилой фонд.

Для цитирования: Римшин В.И., Трунтов П.С., Кецо Е.С. Комплексный подход к выполнению акустических расчетов при техническом обследовании аварийного жилого фонда // *Строительные материалы*. 2021. № 6. С. 21–24.
 DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-21-24>

V.I. RIMSHIN¹, Doctor of Sciences (Engineering) (RimshinVI@mgsu.ru), P.S. TRUNTOV¹, Undergraduate (pavel_truntov@mail.ru);
 E.S. KETSKO², Postgraduate student (kkuzzina@mail.ru)

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

² Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy Architecture and Construction Sciences
 (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

An Integrated Approach to Performing Acoustic Calculations during Technical Inspection of Emergency Housing Stock

The sound insulation of enclosure structure is one of the important factors affecting the living comfort. The article discusses the method for conducting acoustic calculations in the investigation of an apartment building. According to the results of a technical survey, the building was declared emergency. A large number of defects were recorded that negatively affect the acoustic properties of the building envelope. For the walls of the building, airborne noise insulation indices were determined, which are standardized parameters of sound insulation of enclosing structures. The index was calculated as an acoustically flat structure with a solid section, taking into account the surface density. For intermediate floors, the impact noise index was determined by calculation. Conclusions are given on the results of the acoustic calculations, the features of such calculations during the technical inspection of emergency housing stock, as well as the influence of existing defects on the sound insulation capacity of the enclosing structures are reflected.

Keywords: acoustic isolation, acoustic report, technical inspection, emergency housing stock.

For citation: Rimshin V.I., Truntov P.S., Ketsko E.S. An integrated approach to performing acoustic calculations during technical inspection of emergency housing stock. *Stroitel'nyye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 6, pp. 21–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-21-24>

Одним из наиболее существенных параметров помещений в жилых зданиях является звукоизоляция ограждающих конструкций. От звукоизоляции в свою очередь зависит степень акустического комфорта в рассматриваемых помещениях [1–3].

Формирование звукоизоляции начинается на стадии проектирования здания и продолжает формироваться на всех этапах его строительства.

Наиболее важное значение для звукоизоляции имеет именно стадия проектирования, на которой допущенные ошибки, как правило, очень трудоемки в исправлении или вообще невыполнимы [4–7].

Существует большое количество материалов и технологий, применение которых позволяет обеспе-

чить нормативную звукоизоляцию ограждающих конструкций помещений в жилом здании. Наиболее распространенными методами являются:

- устройство конструкции плавающего пола;
- монтаж звукоизоляционного подвесного потолка;
- возведение дополнительных звукоизоляционных облицовок стен.

Представленные методы обладают высокой эффективностью, но в то же время требуют больших финансовых издержек [8–10].

В настоящее время действует утвержденный приказом Минрегиона России от 28.12.2010 № 825 и введенный в действие с 20 мая 2011 г. Свод правил СП 51.13330.2011 «Защита от шума».

Указанный свод правил устанавливает санитарные требования к шуму, которые следует соблюдать при проектировании, реконструкции, строительстве, а также содержании эксплуатируемых многоквартирных жилых домов с нормируемыми параметрами шума [11–12].

Материалы и методы

В рамках исследования рассмотрено жилое здание 1964 г. постройки. В здании было проведено техническое обследование, в ходе которого фиксировалось фактическое техническое состояние основных строительных конструкций.

Фундаментом под всем зданием служит монолитная железобетонная лента. Наружные стены выполнены из кирпичной кладки толщиной 640 мм. Внутренние межквартирные стены из кирпичной кладки толщиной 380 мм. Перегородки выполнены из кирпичной кладки толщиной 120 мм.

Междуэтажное и чердачное перекрытия выполнены из сборных железобетонных многопустотных плит шириной 1200 мм и толщиной 220 мм. Крыша дома деревянная вальмовая по наклонным стропилам. Кровля выполнена из волнистого асбестоцементного листа.

При обследовании несущих стен здания выявлены лещадные разрушения кирпичной кладки, разрушение кирпичной кладки на глубину до 120 мм, разрушение цементно-песчаного раствора кладки, трещины в узлах сопряжений плит перекрытий с наружной стеной. Имеющиеся дефекты, а также выполненные поверочные расчеты свидетельствуют об аварийном состоянии несущих стен.

В ходе технического обследования перегородок, перекрытий и полов выявлены перекосы, наличие зазоров между перегородкой и перекрытием, локальные разрушения кирпичной кладки перегородок, трещины в узлах сопряжения перегородок и стен.

Состав ограждающих конструкций
The composition of the enclosing structures

Наименование конструкции	Состав
Межквартирная перегородка $m=738 \text{ кг/м}^2$	1. Кирпич глиняный, $t=380 \text{ мм}$, $\rho=1800 \text{ кг/м}^3$ 2. Цементно-песчаный раствор, $t=30 \text{ мм}$, $\rho=1800 \text{ кг/м}^3$
Межподъездная перегородка $m=738 \text{ кг/м}^2$	1. Кирпич глиняный, $t=380 \text{ мм}$, $\rho=1800 \text{ кг/м}^3$ 2. Цементно-песчаный раствор, $t=30 \text{ мм}$, $\rho=1800 \text{ кг/м}^3$
Межкомнатная перегородка $m=270 \text{ кг/м}^2$	1. Кирпич глиняный, $t=120 \text{ мм}$, $\rho=1800 \text{ кг/м}^3$ 2. Цементно-песчаный раствор, $t=30 \text{ мм}$, $\rho=1800 \text{ кг/м}^3$
Междуэтажное перекрытие $m=342 \text{ кг/м}^2$	1. Ж/б плита, $t=220 \text{ мм}$, $\rho=2400 \text{ кг/м}^3$ 2. Цементно-песчаная стяжка, $t=30 \text{ мм}$, $\rho=1800 \text{ кг/м}^3$ 3. Линолеум, 1 слой, $\rho=1200 \text{ кг/м}^3$

Состояние рассмотренных конструкций оценивается как ограниченно-работоспособное.

По результатам технического обследования было установлено, что здание находится в аварийном состоянии.

В работе рассматриваются ограждающие конструкции многоквартирного жилого дома, к которым предъявляются требования по звукоизоляции. Комплексный подход к расчету звукоизоляции ограждающих конструкций, имеющих дефекты и повреждения, дает возможность оценить влияние выявленных дефектов на звукоизоляцию рассматриваемых конструкций. Краткое описание ограждающих конструкций приведено в таблице [13–15].

Нормируемыми параметрами звукоизоляции внутренних ограждающих конструкций многоквартирных жилых домов являются индексы изоляции воздушного шума – R_w , дБ (для стен).

Учитывая жесткие связи перегородок и их жесткое взаимное соединение, расчет индекса R_w проводится как акустически плоской конструкции сплошного сечения в зависимости от поверхностной плотности (m_b , кг/м²) ограждающей конструкции и определяется выражением:

$$R_w = 37lg m + 55lg K - 43, \text{ дБ},$$

где m – поверхностная плотность конструкции, кг/м²; K – коэффициент, учитывающий изгибную жесткость ограждения.

Результаты исследования

Принимаем многопустотную железобетонную плиту толщиной 220 мм с приведенной толщиной 120 мм, плотностью 2400 кг/м³. Для определения коэффициента K вычислим момент инерции j . Многопустотная плита шириной 1200 мм имеет шесть круглых пустот диаметром 0,16 м, расположенных посередине сечения. Момент инерции находим как разность моментов инерции прямоугольного сечения ($j = \frac{bh^3}{12}$) и шести круглых пустот ($j = \frac{\pi D^4}{64}$):

$$j = \left(\frac{1,2 \cdot 0,22^3}{12} \right) - \left(\frac{6 \cdot \pi \cdot 0,16^4}{64} \right) = 8,67 \cdot 10^{-4}, \text{ м}^4.$$

Определяется коэффициент K по формуле:

$$K = 1,54 \sqrt{\frac{8,67 \cdot 10^{-4}}{1,2 \cdot 0,12^3}} = 1,54 \sqrt{\frac{8,67 \cdot 10^{-4}}{20,74 \cdot 10^{-4}}} = 1,54 \sqrt{0,42} = 1,2.$$

Междуэтажное перекрытие:

$$R_{w1} = 37lg 342 + 55lg 1,2 - 43 = 53 \text{ дБ};$$

$$R_{w1} = 53 \text{ дБ} \geq R_w^H = 52 \text{ дБ}.$$

Межквартирная перегородка:

$$R_{w2} = 37lg 738 + 55lg 1,1 - 43 = 65 \text{ дБ};$$

$$R_{w2} = 65 \text{ дБ} \geq R_w^H = 52 \text{ дБ}.$$

Межподъездная перегородка:

$$R_{w3} = 37lg 738 + 55lg 1,1 - 43 = 65 \text{ дБ};$$

$$R_{w3} = 65 \text{ дБ} \geq R_w^H = 52 \text{ дБ}.$$

Межкомнатная перегородка:

$$R_{w4} = 37lg 270 + 55lg 1,1 - 43 = 49 \text{ дБ};$$

$$R_{w4} = 49 \text{ дБ} \geq R_w^H = 43 \text{ дБ}.$$

Определение индекса ударного шума по междуэтажным перекрытиям с полом на звукоизоляционном слое проводится по справочным таблицам.

Поверхностная плотность плиты перекрытия – 342 кг/м^2 , значение $L_{nw0}=78 \text{ дБ}$ (определяется интерполяцией). Учитывая отсутствие звукоизоляционного слоя и покрытие чистого пола рулонным материалом:

$$\Delta L_{nw} = 4 \text{ дБ} - \text{безосновный линолеум};$$

$$\Delta L_{nw} = 14 \text{ дБ} \text{ линолеум на войлочной основе};$$

$$L_{nw1.1} = L_{nw0} - \Delta L_{nw} = 78 - 4 = 74 \text{ дБ} \geq 60 \text{ дБ};$$

$$L_{nw1.2} = L_{nw0} - \Delta L_{nw} = 78 - 14 = 64 \text{ дБ} \geq 60 \text{ дБ}.$$

Выводы

Расчеты звукоизоляции проводились при принятом условии отсутствия щелей, трещин и отверстий в примыкании полов к ограждающим конструкциям – внутренним стенам.

Результаты акустических расчетов показали следующее.

Индексы изоляции воздушного шума (R_{w1} , R_{w2} , R_{w3} , R_{w4}) междуэтажных перекрытий, межквартирных, межподъездных и межкомнатных перегородок удовлетворяют требованиям действующих нормативов. Однако расчет индекса ударного шума под междуэтажным перекрытием выявил, что все конструкции перекрытий не удовлетворяют установленным требованиям.

Учитывая год постройки дома (1964) происходит ряд изменений в узлах соединений конструкций:

Список литературы

1. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafeva M.A. Deformability of a volume-compressed concrete // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 022063. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022053
2. Цукерников И.Е., Шубин И.Л., Невенчанная Т.О. Система национальных стандартов по измерению и оценке звукоизоляции. *Труды III Всероссийской акустической конференции*. 2020. С. 471–474.
3. Римшин В.И., Курбатов В.Л., Король Е.А., Кузина Е.С., Саттаров С.А. К вопросу остаточного ресурса железобетонных конструкций при поперечном изгибе по прочности нормальных сечений // *Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы – 2019: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции*. 2019. С. 440–444.
4. Borkovskaya V.G., Degaev E.N., Rimshin V.I., Shubin I.L. Problems and risks of control in the housing and communal services industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference «FarEastCon 2019»*. 2020. 052046. DOI: 10.1088/1757-899X/753/5/052046
5. Шубин И.Л., Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В., Меркушева Н.П. Оценка шумового режима в помещениях предприятий, встроенных в жилые здания // *Жилищное строительство*. 2020.

осадка обследуемого объекта и его деформация; раскрытие трещин в узлах соединений; резкое изменение климатических (влажностных и температурных) режимов, физико-механических свойств материалов, которые отрицательно влияют на акустические свойства.

Щели и отверстия существенно влияют на звукоизоляцию ограждающих конструкций. Величина снижения звукоизоляции зависит прежде всего от соотношения размеров отверстий и отношения этих размеров к длине падающей звуковой волны, а также от их расположения.

Отверстия оказывают тем большее неблагоприятное влияние на величину звукоизоляции ограждения, чем выше его собственная звукоизоляция. При достаточно большой величине R и $S_0/S_c \ll 1$ общая величина звукоизоляции ограждения с отверстием:

$$R = 10 \lg S_0/S_c,$$

где R – собственная звукоизоляция ограждения без отверстия (щелей); S_0 и S_c – площади соответственно отверстия и глухой части ограждения.

Через малые отверстия при диффузном падении звука проходит больше звуковой энергии, чем это соответствует ее площади, при этом снижение звукоизоляции, вызванное щелью, оказывается на несколько децибелов больше, чем вызванное круглым отверстием равной площади.

References

1. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafeva M.A. Deformability of a volume-compressed concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 022063. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022053
2. Tsukernikov I.E., Shubin I.L., Nevenchannaya T.O. System of national standards for the measurement and evaluation of sound insulation. *Proceedings of the III All-Russian Acoustic Conference*. 2020, pp. 471–474. (In Russian).
3. Rimshin V.I., Kurbatov V.L., Korol' E.A., Kuzina E.S., Sattarov S.A. To the question of the residual resource of reinforced concrete structures during transverse bending by the strength of normal sections. *Construction system engineering. Cyber-physical building systems – 2019. Collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2019, pp. 440–444. (In Russian).
4. Borkovskaya V.G., Degaev E.N., Rimshin V.I., Shubin I.L. Problems and risks of control in the housing and communal services industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference “FarEastCon 2019”*. 2020. 052046. DOI: 10.1088/1757-899X/753/5/052046
5. Shubin I.L., Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V., Merkusheva N.P. Assessment of the noise re-

- № 6. С. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-6-3-8>
6. Rimshin V., Truntov P. An integrated approach to the use of composite materials for the restoration of reinforced concrete structures // *E3S Web of Conferences. Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019*. 2019. 03068. DOI: 10.1051/e3sconf/201913503068
 7. Krishan A.L., Rimshin V.I., Troshkina E.A. Strength of short concrete filled steel tube columns of annular cross section // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 022062. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022062
 8. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А. Прочность центрально сжатых трубобетонных элементов усовершенствованной конструкции // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 3 (77). С. 12–21.
 9. Kuzina E., Rimshin V., Kurbatov V. The reliability of building structures against power and environmental degradation effects // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering electronic edition*. 2018. 042009. DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042009
 10. Римшин В.И., Трунтов П.С., Кецко Е.С., Кузина И.С. Метод определения ветровых нагрузок и воздействий с использованием программного обеспечения // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 6 (92). С. 43–50. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-92-6-43-50
 11. Римшин В.И., Варламов А.А. Объемные модели упругого поведения композита // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2018. № 3 (375). С. 63–68.
 12. Валевиц Д.М., Гаврилова Н.Г., Римшин В.И. К вопросу подтверждения физико-механических свойств бетона в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов // *Университетская наука*. 2018. № 1 (5). С. 41–43.
 13. Kuzina E., Rimshin V. Strengthening of concrete beams with the use of carbon fiber. In book: International scientific conference energy management of municipal facilities and sustainable energy technologies EMMFT. 2018, pp. 911–919. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_90
 14. Варламов А.А., Римшин В.И. Модели поведения бетона. Общая теория деградации: Монография. М.: Научно-издательский центр ИНФРА-М, 2019. 436 с. DOI: 10.12737/monography_5c8a716e3c4460.52838016
 15. Мосаков Б.С., Курбатов В.Л., Римшин В.И. Основы технологической механики тяжелых бетонов. Минеральные Воды: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Северо-Кавказский филиал, 2017. 210 с.
 - gime in the premises of enterprises built into residential buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2020. No. 6, pp. 3–8. (In Russian).
 6. Rimshin V., Truntov P. An integrated approach to the use of composite materials for the restoration of reinforced concrete structures. *E3S Web of Conferences. Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019*. 2019. 03068. DOI: 10.1051/e3sconf/201913503068
 7. Krishan A.L., Rimshin V.I., Troshkina E.A. Strength of short concrete filled steel tube columns of annular cross section. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 022062. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022062
 8. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafieva M.A. Strength of centrally compressed pipe-concrete elements of advanced design. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2018. No. 3 (77), pp. 12–21. (In Russian).
 9. Kuzina E., Rimshin V., Kurbatov V. The reliability of building structures against power and environmental degradation effects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering electronic edition*. 2018. 042009. DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042009
 10. Rimshin V.I., Truntov P.S., Ketsko E.S., Kuzina I.S. Method of determining wind loads and impacts using the software. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2020. No. 6 (92), pp. 43–50. (In Russian).
 11. Rimshin V.I., Varlamov A.A. Volumetric models of the elastic behavior of the composite. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2018. No. 3 (375), pp. 63–68. (In Russian).
 12. Valevich D.M., Gavrilova N.G., Rimshin V.I. On the issue of confirming the physicomechanical properties of concrete under the influence of various operational factors. *Universitetskaya nauka*. 2018. No. 1 (5), pp. 41–43. (In Russian).
 13. Kuzina E., Rimshin V. Strengthening of concrete beams with the use of carbon fiber. In book: international scientific conference energy management of municipal facilities and sustainable energy technologies EMMFT. 2018, pp. 911–919. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_90
 14. Varlamov A.A., Rimshin V.I. Modeli povedeniya betona. Obshchaya teoriya degradatsii. Monografiya. [Models of concrete behavior. General theory of degradation. Monograph]. Moscow: Scientific Publishing Center INFRA-M. 2019. 436 p. DOI: 10.12737/monography_5c8a716e3c4460.52838016
 15. Mosakov B.S., Kurbatov V.L., Rimshin V.I. Osnovy tekhnologicheskoi mekhaniki tyazhelykh betonov [Fundamentals of technological mechanics of heavy concrete]. Mineralnye Vody: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov North Caucasus Branch. 2017. 210 p.

УДК 699.844

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-25-29>

Н.Г. КАНЕВ^{1,3,4}, канд. физ.-мат. наук (nikolay.kanev@mail.ru);
 А.С. ФАДЕЕВ¹, ведущий инженер-акустик (89268339937@mail.ru);
 И.Е. ЦУКЕРНИКОВ², д-р техн. наук (3342488@mail.ru)

¹ ГК «Акустик Групп» (115054, г. Москва, ул. Новокузнецкая, 33, стр. 2)

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

³ АО «Акустический институт им. академика Н.Н. Андреева» (117036, г. Москва, ул. Шверника, 4)

⁴ Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет) (105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, к. 1)

Оценка звукоизоляции строительными конструкциями интенсивных источников импульсного шума в натуральных условиях

Оценка звукоизоляции импульсного шума высокого уровня строительными конструкциями – малоизученный вопрос в области строительной акустики. Это обусловлено тем, что подобные источники шума (стрелковые галереи, стрельбища и т. п.) обычно не располагаются вблизи зданий, сооружений и территорий с постоянным пребыванием людей. Тем не менее в ряде случаев такая задача может быть актуальна. В работе проведено экспериментальное сравнение передачи импульсного и постоянного шумов из одного помещения в другое. Источником импульсного шума было огнестрельное оружие четырех типов, источником постоянного шума – акустическая система. Измерения проведены в действующей стрелковой галерее и в смежных помещениях, одно из которых непосредственно граничит с галереей, а другое не имеет общих с ней ограждающих конструкций. В обоих случаях установлено, что перепад уровней звукового давления в галерее и смежном помещении значительно больше при импульсном возбуждении в октавных полосах с $f_{CT}=31,5\text{--}250$ Гц, чем при постоянном. Полученные результаты свидетельствуют, что акустическая изоляция помещений существенным образом зависит от характера шумового воздействия: на низких частотах передача импульсного шума между помещениями значительно слабее, чем передача постоянного шума. Отмечается, что результаты натурального эксперимента носят качественный характер; для достоверных количественных оценок изоляции импульсного шума необходимы дополнительные натурные и лабораторные исследования, которые подтвердят зафиксированный эффект, а также разработка теоретической базы для расчетов передачи импульсного шума между помещениями.

Ключевые слова: изоляция воздушного шума, постоянный шум, импульсный шум, звук выстрела.

Авторы выражают благодарность Ирине Скоркиной за техническую поддержку при проведении акустических измерений.

Для цитирования: Канев Н.Г., Фадеев А.С., Цукерников И.Е. Оценка звукоизоляции строительными конструкциями интенсивных источников импульсного шума в натуральных условиях // *Строительные материалы*. 2021. № 6. С. 25–29.
 DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-25-29>

N.G. KANEV^{1,3,4}, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics) (nikolay.kanev@mail.ru);

A.S. FADEEV¹, leading acoustic engineer (89268339937@mail.ru); I.E. TSUKERNIKOV², Doctor of Sciences (Engineering) (3342488@mail.ru)

¹ Group of companies "Acoustic Group" (33, bldg. 2, Novokuznetskaya Street, Moscow, 115054, Russian Federation)

² Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

³ "Acoustic Institute named after Academician N.N. Andreev" JSC (4, Shvernik Street, Moscow, 117036, Russian Federation)

⁴ Bauman Moscow state technical university (National research university of technology) (5, build. 1, 2nd Baumanskaya Street, Moscow, 105005, Russian Federation)

Evaluation of Sound Insulation of Intense Sources of Pulsed Noise by Building Structures in Natural Conditions

Evaluation of the sound insulation of high-level pulse noise by building structures is a little-studied issue in the field of building acoustics. This is due to the fact that such noise sources (shooting galleries, shooting ranges, etc.) are usually not located near buildings, structures and territories with a permanent presence of people. However, in some cases, such a task may be relevant. The paper presents an experimental comparison of the transmission of pulsed and constant noises from one room to another. The source of the pulse noise was a fire-arm of four types, the source of the constant noise was the acoustic system. The measurements were carried out in the current shooting gallery and in adjacent rooms, one of which directly borders the gallery, and the other has no common enclosing structures with it. In both cases, it was found that the difference in sound pressure levels in the gallery and the adjacent room is significantly greater with pulsed excitation in the octave bands with $f_{sh}=31.5\text{--}250$ Hz than with constant excitation. The results obtained indicate that the acoustic insulation of rooms significantly depends on the nature of noise exposure: at low frequencies, the transmission of pulsed noise between rooms is much weaker than the transmission of constant noise. It is noted that the results of the field experiment are qualitative in nature, for reliable quantitative estimates of the isolation of pulse noise, additional field and laboratory studies are needed to confirm the recorded effect, as well as the development of a theoretical basis for calculating the transmission of pulse noise between rooms.

Keywords: air noise isolation, constant noise, pulse noise, shot sound.

The authors express their gratitude to Irina Skorkina for technical support when conducting acoustic measurements.

For citation: Kanev N.G., Fadeev A.S., Tsukernikov I.E. Evaluation of sound insulation of intense sources of pulsed noise by building structures in natural conditions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 6, pp. 25–29. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-25-29>

Импульсный шум оказывает более негативное влияние на человека по сравнению с постоянным [1], поэтому разрабатываются особые критерии по оценке шумового воздействия [2]. Отечественные санитарно-гигиенические нормативы [3] устанавливают специальные требования для импульсного шума на рабочих местах, а также в жилых и общественных зданиях.

Один из самых громких источников импульсного шума – огнестрельное оружие. Влияние шума на стрелков исследуется во многих работах [4–9], предлагаются мероприятия по его снижению. Если стрелковая галерея граничит с другими помещениями, то возникает задача защиты помещений от шумового воздействия [7]. Известно достаточно много способов звукоизоляции [10–14], от выбора подходящего устройства ограждающих конструкций до мероприятий по дополнительной звукоизоляции существующих ограждений.

Методики по расчету звукоизоляции и шума, проникающего из одного помещения в другое, хорошо проработаны, на практике используют нормативно-технические документы СП 275.1325800.2016 «Конструкции ограждающие жилых и общественных зданий. Правила проектирования звукоизоляции». Основные теоретические подходы рассматривают стационарные задачи, в рамках решения которых получены зависимости параметров звукоизоляции ограждающих конструкций от их характеристик. Во многих случаях достигается хорошее согласие теории с лабораторными и натурными экспериментами. Вместе с тем звукоизоляция нестационарного шума отдельно не рассматривается: полагается, что известные теоретические результаты остаются справедливыми. Методики измерения звукоизоляции также предлагают использовать широкополосные шумовые сигналы для возбуждения звукового поля в помещениях (ГОСТ Р ИСО 10140-2–2012 «Акустика. Лабораторные измерения звукоизоляции элементов зданий. Часть 2. Измерение звукоизоляции воздушного шума»; ГОСТ 27296–2012 «Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций»).

Системные теоретические и экспериментальные исследования изоляции импульсного шума не проводились, хотя можно ожидать некоторые отличия от известных закономерностей, полученных для стационарного случая, поскольку звуковая энергия одного импульса сосредоточена на узком временном интервале, поэтому одиночный импульс не способен эффективно возбудить строительные конструкции на их резонансных частотах. В настоящей работе приводятся результаты натурных измерений передачи шума выстрелов из стрелковой галереи в смежные помещения, проведенных в рамках разработки мероприятий по звукоизоляции стрелковой галереи, и проводится сравнение с передачей стационарного шума.

Натурные акустические измерения

Условия проведения акустических измерений. Измерения шума выстрелов из нескольких видов оружия проведены в действующей стрелковой галерее, а также в помещениях, расположенных вблизи галереи. На рис. 1 приведен фрагмент поэтажного плана обследуемого участка административного здания с расположением источника и приемника шума.

Стрелковая галерея, в которой располагается источник шума, является помещением высокого уровня (далее – ПВУ). Приемные помещения 1 и 2 являются помещениями низкого уровня (далее – ПНУ 1 и ПНУ 2 соответственно). Измерения проведены при закрытых дверях ПВУ и ПНУ.

В ПВУ шум создавался двумя типами источников – источником импульсного шума (звук выстрела стрелкового оружия) и источником постоянного шума («розовый» шум, воспроизведенный акустической системой).

Источник импульсного шума находился в руках стоящего на ногах стрелка на высоте около 1,6 м от поверхности пола, источник постоянного шума и приемник располагались на штативе высотой около 1,5 м от поверхности пола.

Методы измерения акустических параметров

Импульсный шум. Измерения уровней звукового давления (далее – УЗД) для четырех видов стрелкового оружия выполнены путем одновременной записи сигнала двумя шумомерами, расположенными в ПВУ и в одном из ПНУ. В качестве приемника шума в ПВУ применен шумомер-вибромметр, анализатор спектра «ЭКОФИЗИКА-110А» в комплектации с предусилителем для измерений высоких уровней шума Р200-ВУ и микрофонным капсюлем МИК-ВУ. Измерение шума в ПНУ проведено шумомером-виброметром, анализатором спектра «ЭКОФИЗИКА-110А» в базовой комплектации.

Измеряемые параметры – УЗД в октавных полосах частот и уровень звука с частотной коррекцией «А» с временной характеристикой Slow. Шумовые характеристики выстрелов фиксировали в режиме

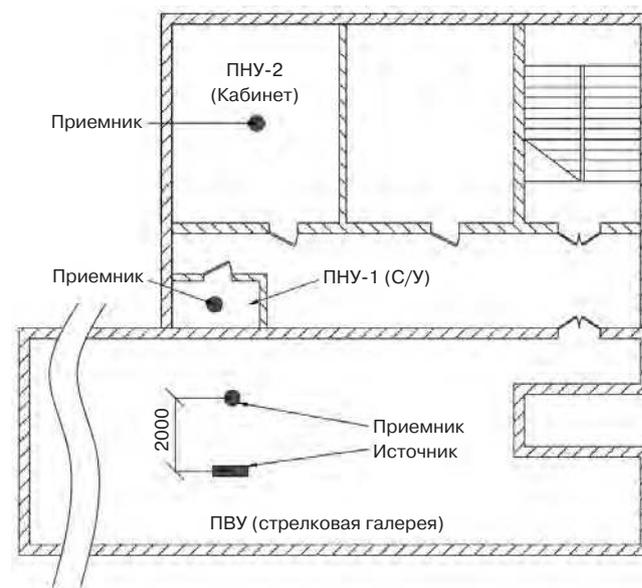


Рис. 1. Фрагмент плана этажа
Fig. 1. Fragment of the floor plan

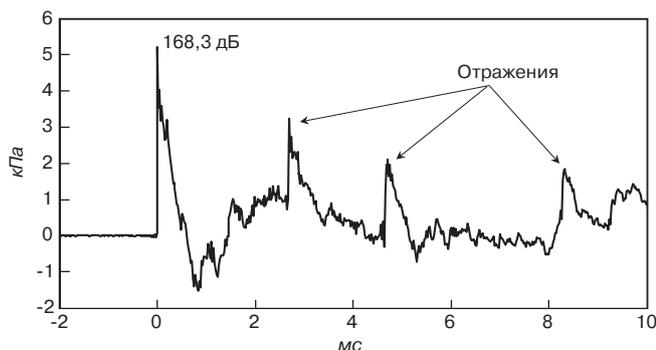


Рис. 2. Звук выстрела из винтовки калибра .338 на расстоянии 2 м
Fig. 2. The sound of a shot from a rifle of .338 caliber at a distance of 2 m

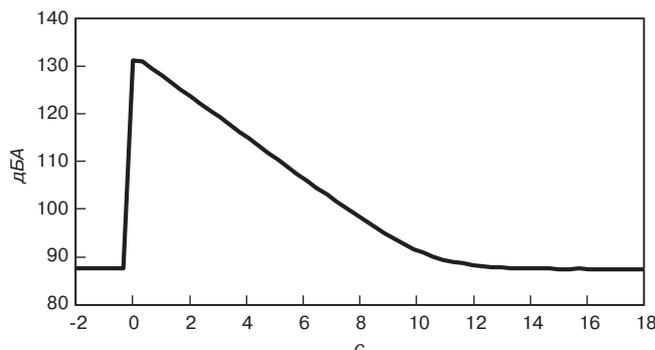


Рис. 3. Уровень звука с временной характеристикой Slow выстрела на рис. 2
Fig. 3. Sound level with time characteristic Slow shot from fig. 2

Измеренные спектры шума для разных источников
Measured noise spectra for different sources

Вид оружия, калибр	Максимальный УЗД при измерении на временной характеристике Slow, дБ, в октавной полосе со среднегеометрической частотой, Гц									Максимальный уровень звука L _{Амакс} , дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Винтовка, .338	126,2	125,7	128,2	125	126,6	125,8	122,4	118,6	115,7	134,4
Винтовка, .30–06 (springfield)	123,4	125,1	128,6	124,7	125,3	124,8	120,8	117,6	114,6	134
Гладкоствольное ружье, 12 мм	110,8	108,1	112,1	109,9	112,8	113,3	113,2	108,6	108,2	121,1
Пистолет, 9×19	112	108,3	108,1	110,8	112,4	118,2	111,1	106,9	107	122,3
Источник постоянного шума	69,1	94,8	97,5	100	98,5	99	96,5	95,3	93,6	103,9

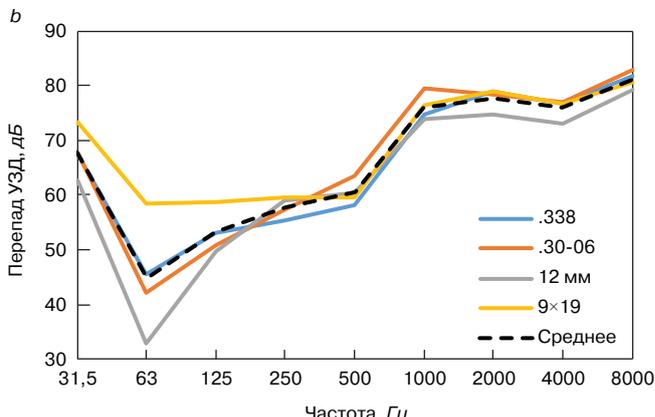
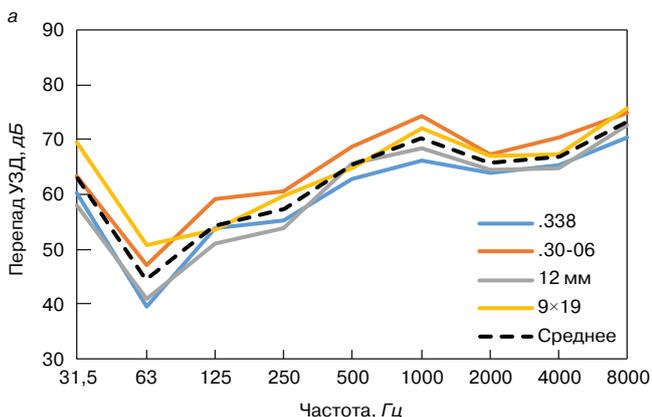


Рис. 4. Перепад УЗД между стрелковой галереей и ПНУ-1 (с/у) (а) и ПНУ-2 (класс) (b) для импульсного шума
Fig. 4. Difference in sound pressure levels between the shooting gallery and low-level rooms-1 (a) and low-level rooms-2 (class) (b) for impulse noise

«мультизапись» и обработаны в программном комплексе «SIGNAL+».

Постоянный шум. Измерения УЗД в ПВУ и ПНУ для источника постоянного шума выполнены согласно положениям (ГОСТ 27296–2012 «Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций»). В качестве источника шума использовали акустическую систему OPERA 615, на которую подавали сигнал «розовый» шум. Измеряемые параметры – УЗД в октавных полосах частот и уровень звука с частотной коррекцией «А».

Характеристики источников шума

На рис. 2 в качестве примера приведена запись выстрела из винтовки калибра .338 на расстоянии 2 м, выполненная в стрелковой галерее. Пиковое звуковое давление составляет 5,2 кПа, что соответствует уровню 168,3 дБ при опорном значении 20 мкПа. На записи

отчетливо видны пики, соответствующие отражениям от потолка, пола и стен галереи. При нормировании непостоянного шума [3] используется временная характеристика Slow – экспоненциальное усреднение с постоянной времени 1 с. На рис. 3 приведена временная зависимость уровня звука, полученная для выстрела на рис. 2. Высокий (около 88 дБА) пороговый уровень на рис. 3 обусловлен комплектацией шумомера для измерения высоких уровней шума.

В таблице приведены спектры шума выстрелов для максимальных значений УЗД, измеренных на временной характеристике Slow и усредненных по двум выстрелам. Также в таблице приведены УЗД для постоянного источника шума.

Оценка звукоизоляции

Для характеристики передачи шума из стрелковой галереи в смежные помещения рассмотрим разность

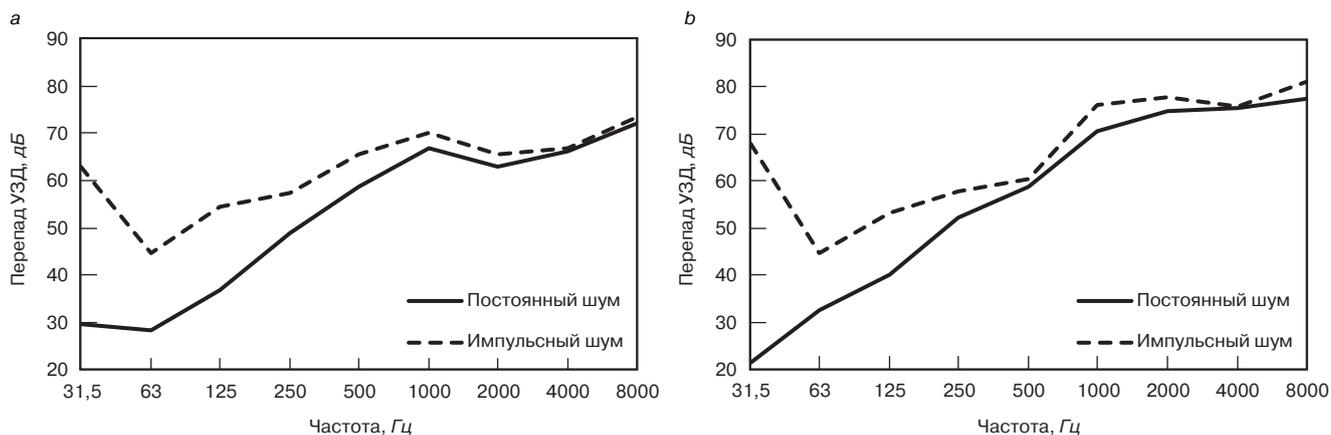


Рис. 5. Сравнение перепада УЗД между стрелковой галереей и ПНУ-1 (a) и ПНУ-2 (b) для импульсного и постоянного шумов
Fig. 5. Comparison of the difference in sound pressure levels between the shooting gallery and low-level rooms-1 (a) and low-level rooms-2 (b) for impulse and constant noise

(перепад) УЗД в этих помещениях. Стрелковое оружие – нестабильный источник шума, поскольку возможны некоторые девиации шумовых характеристик для разных выстрелов. По этой причине разность УЗД определяли для каждого выстрела, затем проводили усреднение разности по двум выстрелам из каждого типа оружия. Разность УЗД для каждого из четырех типов оружия для двух смежных помещений ПНУ-1 и ПНУ-2 обозначены на рис. 4 цветными линиями.

В качестве интегральной характеристики передачи импульсного шума рассмотрим среднее по всем видам оружия значение перепада УЗД, обозначенное на рис. 4 штриховой линией. В первой серии измерений для ПНУ-1 отличие измеренных значений разности УЗД от среднего не превышает 5 дБ на всех частотах, во второй серии измерений отличия на низких частотах значительно выше.

Аналогичные значения перепада УЗД найдены для постоянного шума и сопоставлены с перепадом для импульсного шума на рис. 5. В обоих случаях перепад существенно отличается в октавных полосах со среднегеометрическими частотами ($f_{сг}$) ниже 250 Гц, при этом в полосах с $f_{сг}=31,5, 63$ и 125 Гц значения перепада отличаются более чем на 10 дБ. В полосах с $f_{сг}$ выше 500 Гц перепад постоянного и импульсного шумов примерно одинаковый.

Необходимо отметить, что приведенные результаты получены по измерениям в одной точке в каждом помещении, при этом положение точек измерения было одинаковым при использовании разных источников звука, что позволяет проводить качественное сопоставление звукоизоляционных характеристик помещений. Однако из-за модовой структуры звукового поля на низких частотах распределение УЗД не является

равномерным, поэтому можно предположить, что при выборе других точек измерения возможны отличия от результатов, приведенных на рис. 5.

Заключение

В работе проведено экспериментальное сравнение передачи импульсного и постоянного шумов из одного помещения в другое. Источником импульсного шума было огнестрельное оружие четырех типов, источником постоянного шума – громкоговоритель. Измерения проведены в действующей стрелковой галерее и в смежных помещениях, одно из которых непосредственно граничит с галереей, а другое не имеет общих с ней ограждающих конструкций. В обоих случаях установлено, что перепад уровней звукового давления в галерее и смежном помещении значительно больше при импульсном возбуждении в октавных полосах с $f_{сг}=31,5–250$ Гц, чем при постоянном. В полосах с $f_{сг}=500–8000$ Гц значения перепада сопоставимы для двух типов источников шума.

Полученные результаты демонстрируют, что акустическая изоляция помещений существенным образом зависит от характера шумового воздействия: на низких частотах передача импульсного шума между помещениями значительно слабее, чем передача постоянного шума.

Необходимо отметить, что результаты натурального эксперимента носят качественный характер; для достоверных количественных оценок изоляции импульсного шума необходимы дополнительные натурные и лабораторные исследования, которые подтвердят зафиксированный эффект, а также разработка теоретической базы для расчетов передачи импульсного шума между помещениями.

Список литературы

1. Суворов Г.А., Лихницкий А.М. Импульсный шум и его влияние на организм человека. Л.: Медицина, 1975. 207 с.
2. Chan P.C., Ho K.H., Kan K.K., et al. Evaluation of impulse noise criteria using human volunteer data //

References

1. Suvorov G.A., Likhnitsky A.M. Impul'snyy shum i yego vliyaniye na organizm cheloveka [Impulse noise and its effect on the human body]. Leningrad: Medicine. 1975. 207 p.
2. Chan P.C., Ho K.H., Kan K.K., et al. Evaluation of impulse noise criteria using human volunteer data.

- Journal of the Acoustical Society of America*. 2001. Vol. 110 (4), pp. 1967–1975. DOI: 10.1121/1.1391243
3. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
 4. Pfander F., Bongart H., Brinkman H., Kietz H. Danger of auditory impairment from impulse noise: A comparative study of the CHABA damage-risk criteria and those of the Federal Republic of Germany // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1980. Vol. 67, pp. 628–633. DOI: 10.1121/1.383886
 5. Логаткин С.М., Рыжиков М.А., Кузнецов М.С. Особенности воздействия импульсного шума стрелкового оружия на орган слуха в условиях применения противозвучаний // *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2018. № 4. С. 84–89.
 6. Анищенко Е.Б., Гранковская Л.В., Ковальчук В.К. Факторы риска нарушения здоровья работников ведомственной охраны железнодорожного транспорта // *Гигиена и санитария*. 2015. Т. 94. № 4. С. 39–44.
 7. Kardous C.A., Willson R.D., Hayden C.S., Szlapa P., Murphy W.J., Reeves E.F. Noise exposure assessment and abatement strategies at an indoor firing range // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2003. Vol. 18, pp. 629–636. DOI: 10.1080/10473220301409
 8. Murphy W.J., Tubbs R.L. Assessment of noise exposure for indoor and outdoor firing ranges // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, pp. 688–697. DOI:10.1080/15459620701537390
 9. Murphy W.J., Kardous C.A. Noise abatement for indoor firing ranges // *Noise Control Engineering Journal*. 2010. Vol. 58(4), pp. 345–356. DOI: 10.3397/1.3455050
 10. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом. М.: Логос, 2013. 424 с.
 11. Щевьев Ю.П., Белоус А.А. Аналитические методы расчета шумозащитных конструкций. СПб.: Политехника, 2002. 385 с.
 12. Осипов Г.Л., Бобылев В.Н., Борисов Л.А. и др. Звукоизоляция и звукопоглощение. М.: ООО «Издательство АСТ»; ООО «Издательство Астрель», 2004. 450 с.
 13. Афонина О.А., Жилина Т.С. Способы борьбы с шумом в жилых зданиях. В сборнике: *Актуальные проблемы архитектуры, строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири: Сборник материалов международной научно-практической конференции. В 2 т.* Тюменский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. С. 139–144.
 14. Кочкин Н.А., Шубин И.Л. Исследование влияния способов соединения гибкой плиты на отношение звукоизоляции ограждений при реконструкции зданий // *Жилищное строительство*. 2019. № 7. С. 9–15. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-7-9-15>
 3. SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness to humans of environmental factors. (In Russian).
 4. Pfander F., Bongart H., Brinkman H., Kietz H. Danger of auditory impairment from impulse noise: A comparative study of the CHABA damage-risk criteria and those of the Federal Republic of Germany. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1980. Vol. 67, pp. 628–633. DOI: 10.1121/1.383886
 5. Logatkin S.M., Ryzhikov M.A., Kuznetsov M.S. Peculiarities of the impulse noise impact of small arms on the hearing organ under the conditions of using antinoise. *Medico-biological and socio-psychological problems of safety in emergency situations*. 2018. No. 4, pp. 84–89. (In Russian).
 6. Anischenko E.B., Trankovskaya L.V., Kovalchuk V.K. Risk factors of health disorders of workers of departmental protection of railway transport. *Gigiyena i sanitariya*. 2015. Vol. 94. No. 4, pp. 39–44. (In Russian).
 7. Kardous C.A., Willson R.D., Hayden C.S., Szlapa P., Murphy W.J., Reeves E.F. Noise exposure assessment and abatement strategies at an indoor firing range. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2003. Vol. 18, pp. 629–636. DOI: 10.1080/10473220301409
 8. Murphy W.J., Tubbs R.L. Assessment of noise exposure for indoor and outdoor firing ranges. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, pp. 688–697. DOI:10.1080/15459620701537390
 9. Murphy W.J., Kardous C.A. Noise abatement for indoor firing ranges. *Noise Control Engineering Journal*. 2010. Vol. 58(4), pp. 345–356. DOI:10.3397/1.3455050
 10. Ivanov N.I. Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika bor'by s shumom [Engineering acoustics. Theory and practice of noise control]. Moscow: Lotos. 2013. 424 p.
 11. Shcheviev Yu.P., Belous A.A. Analiticheskiye metody rascheta shumozashchitnykh konstruktsiy [Analytical methods for calculating noise protection structures]. Saint Petersburg: Polytechnic. 2002. 385 p.
 12. Osipov G.L., Bobylev V.N., Borisov L.A. etc. Zvukoizolyatsiya i zvukopogloshcheniye [Sound insulation and sound absorption]. Moscow: ООО “AST Publishing House”, ООО “Astrel Publishing House”. 2004. 450 p.
 13. Afonina O.A., Zhilina T.S. Methods for dealing with noise in residential buildings. In the collection: *Actual problems of architecture, construction, ecology and energy conservation in Western Siberia. Collection of materials of the international scientific and practical conference*. Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering. 2015, pp. 139–144.
 14. Kochkin N.A., Shubin I.L. Study of the influence of ways of connecting the flexible plate with a space on soundproofing of enclosing structures when reconstructing buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2019. No. 7, pp. 9–15. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-7-9-15>

С.И. КРЫШОВ¹, канд. техн. наук, начальник отдела (skryshov@yandex.ru),

Д.Е. КОТЕЛЬНИКОВ¹, инженер-эксперт (yorik487@yandex.ru);

О.В. ГРАДОВА², руководитель сектора № 42.1 «Акустические материалы и конструкции»

¹ Центр экспертиз, исследований и испытаний в строительстве (ГБУ «ЦЭИИС») (109052, г. Москва, Рязанский пр., 13)

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

Проблемы звукоизоляции междуэтажных перекрытий в панельных зданиях и применение закона массы

Рассматривается звукоизоляция междуэтажных перекрытий в жилых панельных домах на основе статистических данных испытаний, проведенных в 2020 г. сотрудниками Центра экспертиз, исследований и испытаний в строительстве по заказу Комитета государственного строительного надзора города Москвы. Выполнен анализ собранной статистики с описанием возможных причин отклонений от действующих нормативов. Проведено сравнение двух конструктивных решений пола междуэтажных перекрытий с покрытием из ламината на упругой подложке и конструкции плавающего пола, а также оценено применение закона массы, согласно которому удвоение массы однослойного ограждения способствует увеличению параметров звукоизоляции на 5–6 дБ для улучшения звукоизоляционных характеристик конструкции перекрытия. Исследование показало, что достичь повышения звукоизоляционных характеристик конструкции перекрытия возможно некоторым увеличением массы конструктивных слоев пола.

Ключевые слова: звукоизоляция, индекс изоляции воздушного шума, панельные здания, закон массы, плавающий пол.

Для цитирования: Крышов С.И., Котельников Д.Е., Градова О.В. Проблемы звукоизоляции междуэтажных перекрытий в панельных зданиях и применение закона массы // *Строительные материалы*. 2021. № 6. С. 30–32.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-30-32>

S.I. KRYSHOV¹, Candidate of Sciences (Engineering), Head of Department (skryshov@yandex.ru), D.E. KOTELNIKOV¹, Engineer-Expert (yorik487@yandex.ru); O.V. GRADOVA², Head of Sector No. 42.1 "Acoustic materials and structures"

¹ Center for Expertise, Research and Testing in Construction (State Budgetary Institution "CEIS") (13, Ryazanskiy Prospect, Moscow, 109052, Russian Federation)

² Research Institute of Building Physics, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivnyi proezd, Moscow, 127238, Russian Federation)

Problems of Sound Insulation of Inter-Floor Floors in Panel Buildings and the Application of the Law of Mass

Sound insulation of inter-floor floors in residential panel houses is considered on the basis of statistical data of tests conducted in 2020 by employees of the Center for Expertise, Research and Testing in Construction by the order of the Committee of State Construction Supervision of the City of Moscow. The analysis of the collected statistics with the description of possible reasons for deviations from the current standards is carried out. A comparison of two design solutions for covering a clean floor of inter-floor floors with a laminate coating on an elastic substrate and a floating floor structure with a cement-sand screed coating is made, as well as the application of the mass law, according to which, doubling the mass of a single-layer fence contributes to an increase in sound insulation parameters by 5-6 dB, to improve the sound insulation characteristics of the floor structure. The study showed that it is possible to achieve an increase in the sound insulation characteristics of the floor structure by simply increasing the mass of the structural layers of a clean floor.

Keywords: sound insulation, air noise insulation index, panel buildings, law of mass, floating floor.

For citation: Kryshov S.I., Kotelnikov D.E., Gradova O.V. Problems of sound insulation of inter-floor floors in panel buildings and the application of the law of mass. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 6, pp. 30–32. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-30-32>

Комфортность современного жилья во многом определяется звукоизоляцией ограждающих конструкций [1–3]. Несоблюдение требований звукоизоляции ведет к критичному снижению качества жизни [4–6].

Нормируемым параметром изоляции воздушного шума является индекс изоляции воздушного шума R_w .

Согласно действующим нормам СП 51.13330.2011 «Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03–2003», величина R_w для перекрытий между помещениями квартир и перекрытий, отделяющих помещения квартир от холлов, лестничных клеток и используемых чердачных помещений, должна быть не менее 52 дБ.

В практике современного жилищного строительства применяются два конструктивных типа зданий:

– панельные дома из сборных элементов стен и перекрытий [7, 8];

– дома с монолитным каркасом, монолитными перекрытиями и лестнично-лифтовыми узлами [9, 10].

Статистические данные результатов измерений индексов изоляции воздушного шума по 48 конструкциям перекрытий, проведенных сотрудниками ГБУ «ЦЭИИС», представлены на диаграмме (рис. 1).

Как видно из статистики, в панельных домах существует проблема соблюдения нормативных требований по изоляции воздушного шума перекрытиями (не ниже 52 дБ) [11]. Возможными причинами подобного несоответствия являются небольшая толщина плит перекрытий – 140 мм (индекс изоляции воздушного шума в диапазоне 47–51 дБ) и некачественная заделка стыков и технологических пустот для скрытых коммуникаций (индекс изоляции воздушного шума менее 45 дБ).

В строительной акустике известен «закон массы», согласно которому удвоение массы однослойного

ограждения способствует увеличению параметров звукоизоляции на 5–6 дБ; таким образом, улучшить звукоизоляционные характеристики ограждения можно увеличением массы конструкции.

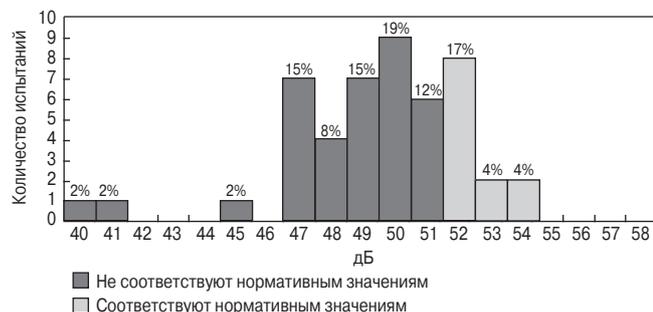


Рис. 1. Индексы изоляции воздушного шума перекрытий в панельных домах
Fig. 1. Indices of insulation of airborne noise of floors in panel houses

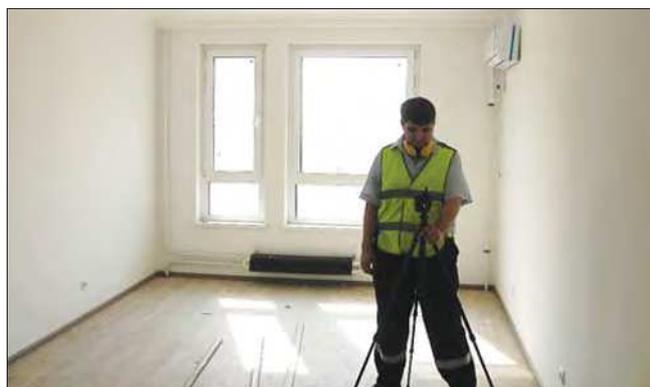


Рис. 2. Полы с покрытием из ламината на упругой подложке
Fig. 2. Floors covered with laminate on a resilient backing

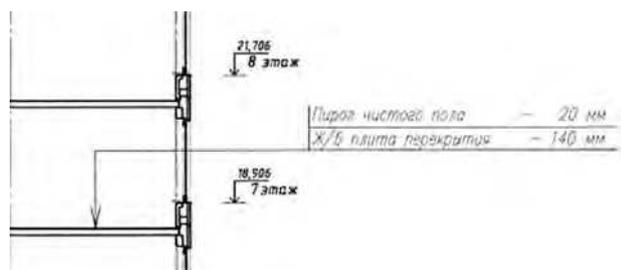


Рис. 3. Конструктивный состав перекрытия с покрытием из ламината на упругой подложке
Fig. 3. Structural composition of the floor with a laminate coating on an elastic substrate

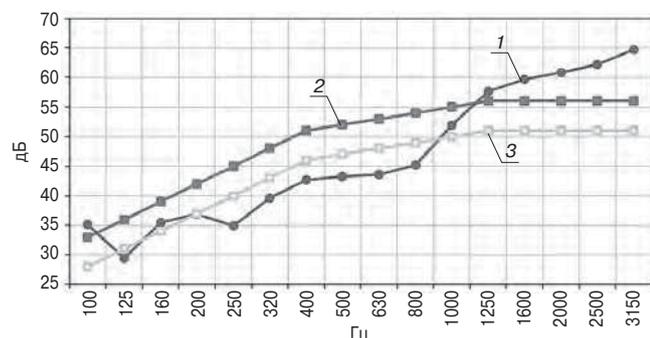


Рис. 4. Частотная характеристика и измеренный индекс изоляции воздушного шума перекрытия с покрытием из ламината на упругой подложке ($R_w=47$ дБ): 1 – частотная характеристика; 2 – нормативный спектр; 3 – сдвинутый нормативный спектр
Fig. 4. Frequency response and measured airborne sound insulation index with laminated floor covering on resilient backing ($R_w=47$ dB): 1 – frequency response; 2 – regulatory spectrum; 3 – shifted regulatory spectrum

Рассмотрим применение закона массы на примере проведенных испытаний в двух домах.

Конструкция покрытия пола в первом случае выполнена из слоя ламината на упругой подложке



Рис. 5. Полы с покрытием из цементно-песчаной стяжки
Fig. 5. Floors covered with cement-sand screed

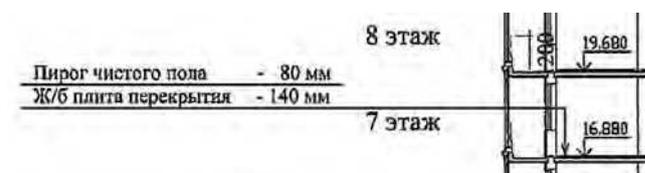


Рис. 6. Конструктивный состав перекрытия с покрытием из цементно-песчаной стяжки
Fig. 6. Structural composition of the ceiling with a coating of cement-sand screed

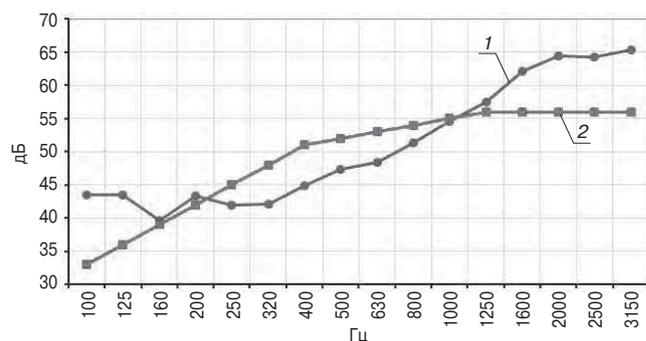


Рис. 7. Частотная характеристика и измеренный индекс изоляции воздушного шума перекрытия с покрытием из цементно-песчаной стяжки ($R_w=52$ дБ): 1 – частотная характеристика; 2 – нормативный спектр
Fig. 7. Frequency response and measured airborne noise insulation index with cement-sand screed covering ($R_w=52$ dB): 1 – frequency response; 2 – regulatory spectrum



Рис. 8. Вскрытый участок стяжки пола
Fig. 8. Opened area of the floor screed

(рис. 2, 3), индекс изоляции воздушного шума составил 47 дБ (рис. 4). Во втором случае принята конструкция плавающего пола [12], повышающая изоляцию как воздушного, так и ударного шума (рис. 5, 6); индекс изоляции воздушного шума составил 52 дБ (рис. 7).

Как видно из конструктивного решения перекрытия во втором случае, его массивность больше на ве-

личину поверхностной плотности (массы одного квадратного метра) цементно-песчаной стяжки из жесткого раствора (рис. 8).

Таким образом, улучшить звукоизоляцию междуэтажных перекрытий панельных зданий можно устройством конструкции плавающего пола, включающего стяжку достаточной плотности и толщины.

Список литературы

1. Бобылев В.Н., Тишков В.А., Монич Д.В., Красов Д.В. О резервах звукоизоляции внутренних ограждающих конструкций зданий // *Academia. Архитектура и строительство*. 2009. № 5. С. 246–249.
2. Боганик А.Г. Эффективные конструкции для дополнительной звукоизоляции помещений // *Строительные материалы*. 2004. № 10. С. 18–21.
3. Боголепов И.И. Увеличение звукоизоляции двустенных конструкций за счет применения звукоизолирующих мостиков // *Инженерно-строительный журнал*. 2009. № 2 (4). С. 46–53.
4. Шубин И.Л. Нормативные документы по энергосбережению и строительной акустике, разработанные НИИСФ РААСН // *Бюллетень строительной техники*. 2012. № 2. С. 7–13.
5. Спиридонов А.В., Цукерников И.Е., Шубин И.Л. Мониторинг и анализ нормативных документов в области внутреннего климата помещений и защиты от вредных воздействий. Ч. 3. Акустические факторы (шум, вибрация, инфразвук, ультразвук) // *Бюллетень строительной техники*. 2016. № 6. С. 8–11.
6. Анджелов В.Л., Пороженко М.А. Оценка и нормирование звукоизоляции ограждающих конструкций зданий // *Academia. Архитектура и строительство*. 2010. № 3. С. 170–174.
7. Абрамов М.А. Новая серия панельных домов высотой до 25 этажей // *Жилищное строительство*. 2013. № 3. С. 9–15.
8. Мойзер Ф. Десять параметров для типовых домов. Особенности и перспективы панельного домостроения в XXI в. // *Жилищное строительство*. 2015. № 5. С. 52–55.
9. Федюнина Т.В., Материнский С.В. Монолитное строительство как наиболее прогрессивная технология в строительной отрасли. *Инновационная наука и современное общество: Сборник статей Международной научно-практической конференции*. Уфа, 2014. С. 72–74.
10. Коровяков В.Ф. Роль научно-технического сопровождения строительства в повышении качества монолитного строительства // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 5. С. 34–36.
11. Анджелов В.Л., Анджелов Л.В. Звукоизоляция междуэтажных перекрытий современных крупнопанельных зданий. *Материалы международной научно-практической конференции «Энергосбережение и экология в строительстве и ЖКХ, транспортная и промышленная экология»*. Москва–Будва. 2010. С. 195–197.
12. Крышов С.И. Проблемы звукоизоляции строящихся зданий // *Жилищное строительство*. 2017. № 6. С. 8–10.

References

1. Bobylev V.N., Tishkov V.A., Monich D.V., Krasov D.V. On the reserves of sound insulation of internal enclosing structures of buildings. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2009. No. 5, pp. 246–249. (In Russian).
2. Boganik A.G. Effective structures for additional sound insulation of premises. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2004. No. 10, pp. 18–21. (In Russian).
3. Bogolepov I.I. Increase of sound insulation of double-walled structures due to the use of sound-insulating bridges. *Civil Engineering Journal*. 2009. No. 2 (4), pp. 46–53. (In Russian).
4. Shubin I.L. Regulatory documents on energy saving and building acoustics, developed by NIISF RAASN. *Byulleten' stroitel'noy tekhniki*. 2012. No. 2, pp. 7–13. (In Russian).
5. Spiridonov A.V., Tsukernikov I.E., Shubin I.L. Monitoring and analysis of normative documents in the field of indoor climate of premises and protection from harmful influences. Part 3. Acoustic factors (noise, vibration, infrasound, ultrasound). *Byulleten' stroitel'noy tekhniki*. 2016. No. 6, pp. 8–11. (In Russian).
6. Angelov V.L., Porozhenko M.A. Assessment and regulation of sound insulation of building envelopes. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2010. No. 3, pp. 170–174. (In Russian).
7. Abramov M.A. A new series of panel houses up to 25 floors. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2013. No. 3, pp. 9–15. (In Russian).
8. Moiser F. Ten parameters for typical houses. features and prospects of panel housing construction in the XXI century. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2015. No. 5, pp. 52–55. (In Russian).
9. Fedyunina T.V., Materinsky S.V. Monolithic construction as the most advanced technology in the construction industry. *Innovative science and modern society. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference*. Ufa. 2014, pp. 72–74. (In Russian).
10. Korovyakov V.F. The role of scientific and technical support of construction in improving the quality of monolithic construction. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014. No. 5, pp. 34–36. (In Russian).
11. Andzhelov V.L., Angelov L.V. Sound insulation of interfloor ceilings of modern large-panel buildings. *Materials of the international scientific-practical conference "Energy saving and ecology in construction and housing and communal services, transport and industrial ecology"*. Moscow-Budva. 2010, pp. 195–197. (In Russian).
12. Kryshov S.I. Problems of sound insulation of buildings under construction. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2017. No. 6, pp. 8–10. (In Russian).

УДК 692.82

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-33-40>

Е.В. КОРКИНА^{1,2}, канд. техн. наук (elena.v.korkina@gmail.com);
И.А. ШМАРОВ¹, канд. техн. наук (Shmarovigor@yandex.ru);
М.Д. ТЮЛЕНЕВ², аспирант (tulenevm@gmail.com)

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Влияние современных фасадных покрытий на величину средневзвешенного альbedo фасада здания

При проектировании зданий применяются методы, направленные на энергосбережение, при этом особое внимание уделяется обеспечению комфортной среды в помещениях. Одной из важных составляющих комфорта является достаточный уровень естественной освещенности, который нормируется коэффициентом естественной освещенности (КЕО). При проведении расчетов КЕО учитывается отражение солнечного излучения в видимом диапазоне от фасада противостоящего здания, обращенного в сторону исследуемого фасада. Кроме того, в настоящее время разрабатываются методы учета отражения солнечной радиации во всем диапазоне солнечного излучения. Однако недостаточно справочных данных по отражению солнечной радиации в видимом и во всем диапазоне различными фасадными покрытиями. В представленной работе проводятся такие исследования, а также определяется влияние покрытий на величину средневзвешенного коэффициента отражения фасада в видимой области и средневзвешенного альbedo фасада во всем диапазоне солнечного излучения.

Ключевые слова: фасадные покрытия, средневзвешенный коэффициент отражения, альbedo, КЕО, мультифункциональное остекление.

Для цитирования: Коркина Е.В., Шмаров И.А., Тюленев М.Д. Влияние современных фасадных покрытий на величину средневзвешенного альbedo фасада здания // *Строительные материалы*. 2021. № 6. С. 33–40.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-33-40>

E.V. KORKINA^{1,2}, Candidate of Sciences (Engineering) (elena.v.korkina@gmail.com);

I.A. SHMAROV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (Shmarovigor@yandex.ru); M.D. TYULENEV², postgraduate (tulenevm@gmail.com).

¹ Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

² National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Influence of Modern Facade Coatings on The Value of the Weighted Average Albedo of the Building Façade

When designing buildings, methods are applied aimed at energy saving, with special attention paid to ensuring a comfortable indoor environment. One of the important components of comfort is a sufficient level of natural light, which is normalized by the coefficient of natural light. When calculating the coefficient of natural light, the reflection of solar radiation in the visible range from the facade of the opposing building facing the studied facade is taken into account. In addition, methods are currently being developed to take into account the reflection of solar radiation in the entire range of solar radiation. However, insufficient reference data was found on the reflection of solar radiation in the visible and in the entire range of various facade coatings. In this work, such studies are carried out, and their influence on the value of the weighted average reflection coefficient of the facade in the visible region and the weighted average albedo of the facade in the entire range of solar radiation is determined.

Keywords: façade coatings, weighted average reflectance, albedo, coefficient of natural light, multifunctional glazing.

For citation: Korkina E.V., Shmarov I.A., Tyulenev M.D. Influence of modern facade coatings on the value of the weighted average albedo of the building façade. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 6, pp. 33–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-33-40>

В настоящее время при проектировании зданий применяются методы, способствующие энергосбережению [1–3], при этом особое внимание уделяется повышению комфортности [4, 5] и экологичности жилища [6–8]. С целью обеспечения норм естественного освещения помещений зданий различного назначения [9, 10] проводится расчет коэффициентов естественной освещенности (КЕО) (СП 367.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования естественного и совмещенного освещения». М.: Минстрой России, 2017. 130 с.) [11, 12]. При проведении расчетов КЕО учитывается влияние противостоящего здания путем

учета отражательных характеристик его фасада, обращенного в сторону исследуемого здания [13–15]. Эти расчеты проводятся только в видимой области солнечного излучения. Также разрабатываются подходы к учету влияния противостоящего здания для всего спектра солнечного излучения [2, 16, 17], включая ближнее инфракрасное (тепловое) излучение. Так, в работе авторов [18] сформирован подход, учитывающий отражение солнечной радиации от противостоящего здания и поступление ее в область светопроема исследуемого помещения. При этом производится расчет средневзвешенного альbedo фасада противостоящего здания. Данная величина расчи-

тывается исходя из коэффициентов отражения солнечной радиации фасадными покрытиями во всей области солнечного излучения согласно нормативным документам (СП 345.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования тепловой защиты». М.: Минстрой России, 2017. 51 с.). Однако в справочной литературе очень мало данных о коэффициентах отражения непрозрачных фасадных покрытий во всей области спектра солнечного излучения. Настоящая работа посвящена проведению экспериментальных исследований коэффициентов отражения видимого света и всей солнечной радиации непрозрачными фасадными покрытиями, а также исследованию влияния их применения на величину средневзвешенного коэффициента отражения фасада (в видимой области) и средневзвешенного альбеда фасада (во всем диапазоне солнечного излучения).

Материалы и методы

Экспериментальные исследования по отражению солнечного излучения образцами фасадных материалов проводились на спектрофотометрах СФ-256 УВИ (ультрафиолетовый и видимый диапазоны, часть ближнего инфракрасного диапазона) и СФ-256 БИК (ближний инфракрасный диапазон) с приставками диффузного отражения. Оборудование имеет свидетельства о поверке. Отбор образцов, проведение измерений и обработка результатов соответствуют требованиям стандарта (ГОСТ Р 56709–2015. «Здания и сооружения. Методы измерения коэффициентов отражения света поверхностями помещений и фасадов». М.: Стандартинформ, 2016. 6 с.). Для проведения экспериментальных исследований отобраны образцы финишного слоя фасадных покрытий, применяемых в системах фасадных теплоизоляционных композиционных (СФТК), образцы керамиче-

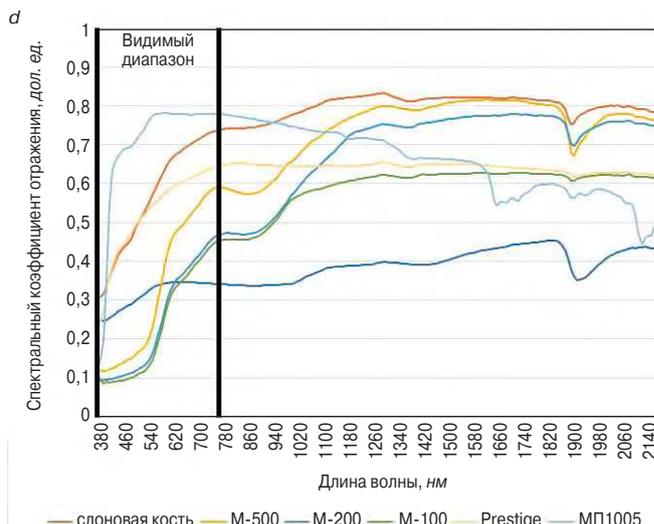
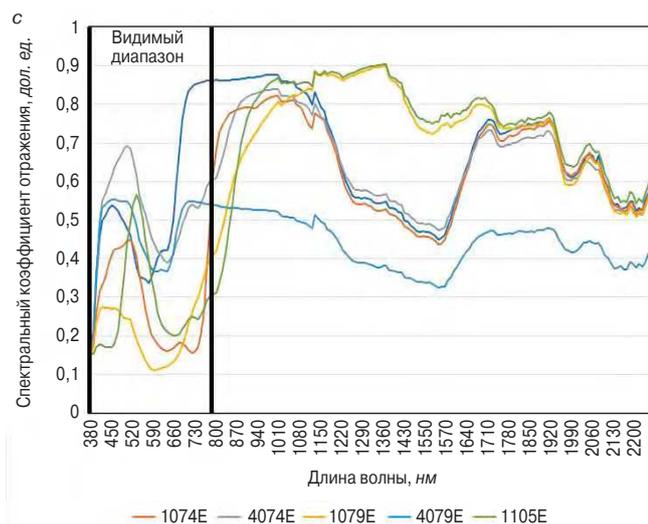
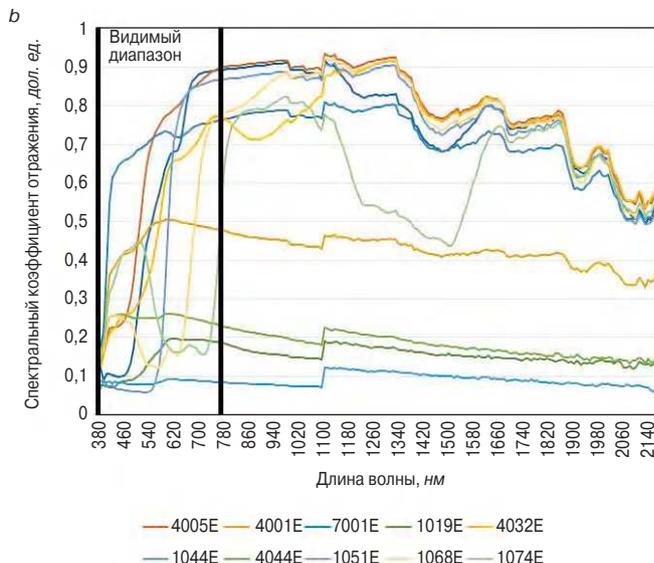
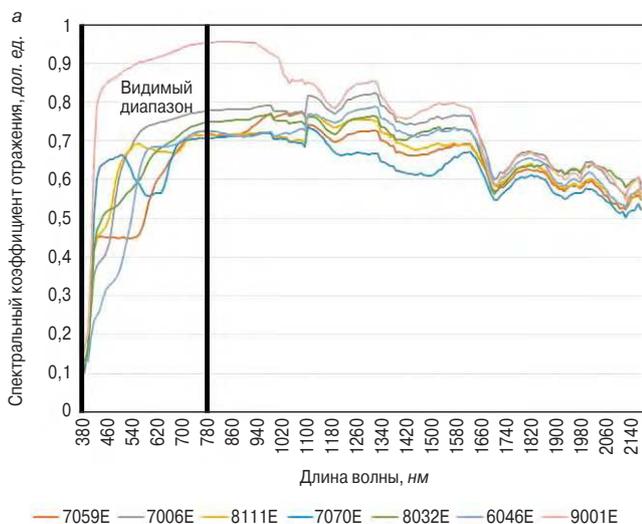


Рис. 1. Результаты измерений спектрального отражения солнечного излучения образцами: а – штукатурного финишного слоя Murexin; б – штукатурного слоя краски Murexin (первая группа); с – образцами штукатурного слоя краски Murexin (вторая группа); д – образцами керамического кирпича, керамогранита, композитных материалов, ЦПР

Fig. 1. Results of measurements of the spectral reflection of solar radiation by: а – samples of the Murexin plaster finishing layer; б – samples of the plaster layer of Murexin paint (the first group); с – by samples of the plaster layer of Murexin paint (second group); д – samples of ceramic bricks, porcelain stoneware, composite materials, cement-sand mortar

Таблица 1
Table 1

Образцы непрозрачных фасадных материалов для измерения коэффициентов отражения солнечной радиации
Samples of opaque facade materials for measuring the reflection coefficients of solar radiation

Образцы	Наименование группы образцов	Количество образцов
1–7	Фасадная штукатурка Murexin (для СФТК)	7
8–35	Фасадная краска Murexin (для СФТК)	24
36–41	Лицевой керамический кирпич	6
42–45	Керамогранит	4
46–51	Композитный материал	5
52–53	Оштукатуренная поверхность	6
54–56	Образцы оконных профилей	3

ского лицевого кирпича, керамогранита, композитных материалов, штукатурки, а также образцы оконных профилей. Количество образцов каждой группы материалов представлено в табл. 1.

Производились последовательные измерения спектральных коэффициентов отражения отобранных образцов в области спектра от 300 до 2700 нм. Затем по методике стандарта (ГОСТ Р 56709–2015) рассчитывались интегральные коэффициенты отражения каждого образца в двух диапазонах:

$$\rho_v = \frac{\sum_{\lambda=380 \text{ нм}}^{760 \text{ нм}} \rho(\lambda) \cdot D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380 \text{ нм}}^{760 \text{ нм}} D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda}, \quad (1)$$

$$\rho_e = \frac{\sum_{\lambda=300 \text{ нм}}^{2700 \text{ нм}} \rho(\lambda) \cdot S_\lambda \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300 \text{ нм}}^{2700 \text{ нм}} S_\lambda \Delta\lambda}, \quad (2)$$

где $\rho(\lambda)$ – измеренный спектральный коэффициент отражения образца; D_λ – относительное спектраль-

ное распределение мощности стандартного источника света D_{65} ; $V(\lambda)$ – спектральная эффективность освещения для дневного зрения, характеризующая стандартного наблюдателя для фотометрии; $\Delta\lambda$ – интервал длин волн; S_λ – относительное спектральное распределение солнечного излучения.

Коэффициент отражения ρ_v , рассчитываемый по формуле (1), характеризует отражение видимого света в соответствии со спектральной чувствительностью глаза и применяется в расчетах естественного освещения (СП 367.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования естественного и совмещенного освещения». М.: Минстрой России, 2017. 130 с.). Коэффициент отражения ρ_e , рассчитываемый по формуле (2), характеризует отражение всей солнечной радиации, включая ближнее инфракрасное (тепловое) излучение, и применяется в расчетах теплоступлений от солнечной радиации (СП 345.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования тепловой защиты». М.: Минстрой России, 2017. 51 с.).

Для наглядного отображения распределения отражения солнечного излучения исследуемыми образцами на рис. 1 представлены сводные графики.

Результаты расчетов интегральных коэффициентов отражения света и всей солнечной радиации согласно формулам (1)–(2) приведены в табл. 2.

На рис. 1 видно, что спектральные коэффициенты отражения некоторых образцов увеличиваются от длины волны, а некоторые уменьшаются (см. фасадные краски 4032E, 4068E 1074E, 1079E, 4079E, 1105E, лицевой кирпич М-200).

Как видно из данных табл. 2, значения коэффициента отражения во всем диапазоне солнечного излучения могут значительно превышать коэффициенты отражения, рассчитанного только для видимой области (см. фасадные краски 4032E, 1051E, 1068E, 1074E, 1041E, лицевой кирпич). Другие образцы имеют су-

Таблица 2
Table 2

Интегральные коэффициенты отражения видимого света и солнечной радиации непрозрачными фасадными материалами
Integral coefficients of reflection of visible light and solar radiation by opaque facade materials

№ п/п	Марка, наименование	Цвет (наиболее близкий оттенок)	ρ_v , дол. ед.	ρ_e , дол. ед.
Фасадная штукатурка Murexin (для СФТК)				
1	7059E	Розовый	0,49	0,61
2	7006E	Желтый	0,7	0,7
3	8111E	Желтый	0,67	0,67
4	7070E	Голубой	0,6	0,65
5	8032E	Розовый	0,6	0,67
6	6046E	Желтый	0,57	0,62
7	9001E	Белый	0,9	0,87
Фасадная краска Murexin (для СФТК)				
8	4001E	Серый	0,48	0,46
9	7001E	Светло-серый	0,71	0,72
10	1002E	Желтый	0,72	0,69
11	4002E	Светло-желтый	0,78	0,77

Окончание табл. 2
End of the table 2

№ п/п	Марка, наименование	Цвет (наиболее близкий оттенок)	R_u , дол. ед.	R_e , дол. ед.
12	1005E	Светло-оранжевый	0,5	0,67
13	4005E	Светло-персиковый	0,67	0,74
14	1019E	Светло-фиолетовый	0,15	0,16
15	4019E	Светло-сиреневый	0,36	0,37
16	1032E	Розово-коричневый	0,21	0,43
17	4032E	Светло-розовый	0,45	0,62
18	1044E	Темно-серый	0,08	0,09
19	4044E	Серый	0,25	0,23
20	1051E	Красно-коричневый	0,2	0,6
21	4051E	Розовый	0,34	0,66
22	1068E	Синий	0,15	0,53
23	4068E	Голубой	0,4	0,63
24	1074E	Морской волны	0,3	0,47
25	4074E	Светло-бирюзовый	0,53	0,61
26	1079E	Синий	0,16	0,44
27	4079E	Темно-голубой	0,44	0,48
28	1105E	Зеленый	0,41	0,49
29	4105E	Светло-зеленый	0,64	0,6
30	1112E	Салатовый	0,6	0,65
31	4112E	Светло-салатовый	0,75	0,73
32	1041E	Красно-коричневый	0,08	0,25
33	1101E	Темно-зеленый	0,21	0,32
34	2088E	Темно-серый	0,1	0,1
35	1042E	Черный	0,05	0,06
Кирпич керамический лицевой				
36	Марка М-100	Красно-коричневый	0,25	0,52
37	Марка М-200	Красно-коричневый	0,26	0,6
38	Марка М-500	Красно-коричневый	0,34	0,66
39	1НФ М-175с	Светло-бежевый	0,43	0,67
40	М-175к	Коричневый	0,13	0,46
41	М-175б	Светло-бежевый	0,58	0,72
Керамогранитные панели				
42	Prestige Bianco Diamante Levigato-Rettificato	Белый	0,54	0,62
43	Слоновая кость	Светло-бежевый	0,58	0,75
44	Краспан ВСт Колор (зеленый)	Светло-зеленый	0,42	0,53
45	Краспан ВСт Колор (белый)	Белый	0,5	0,43
Композитный материал				
46	M329 Energy Creativ	Черный, белый, бежевый	0,36	0,35
47	Alcotex образец 1	Темно-красный	0,14	0,39
48	Alcotex образец 1 (оборот)	Металлик	0,59	0,63
49	A+	Белый	0,55	0,6
50	B2	Серый	0,41	0,5
51	МП1005 Ral 9010	Белый	0,72	0,67
Цементно-песчаный раствор				
52	Цементно-песчаный раствор № 1	Серый	0,32	0,38
53	Цементно-песчаный раствор № 2	Серый	0,36	0,45
Оконные профили				
54	RAL5000	Синий	0,1	0,14
55	RAL8019mat	Темно-серый	0,05	0,06
56	RAL9016	Белый	0,86	0,73

ущественное различие коэффициентов отражения в видимой области и близкие значения во всем диапазоне (1051E, 1005E). Такие изменения спектрального коэффициента отражения от длины волны возможно использовать для регулирования величины отраженной солнечной радиации.

Расчет средневзвешенного коэффициента отражения и альbedo фасада противостоящего здания

Здания застройки отражают солнечную радиацию со всей поверхности фасада в соответствии с отражательными способностями облицовочных материалов. Расчет средневзвешенного коэффициента отражения фасада $\rho_{\text{ср}}$ и средневзвешенного альbedo фасада A_k проводится по формулам нормативных документов (СП 367.1325800.2017 и Методическое пособие «Расчеты теплопоступлений в здание от проникающей солнечной радиации за отопительный период». М.: Минстрой России. ФАУ ФЦС. 2017. 111 с.) соответственно:

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{\sum_i^n \rho_{v_i} \cdot A_i}{\sum_i^n A_i}; \quad (3)$$

$$A_k = \frac{\sum_i^n \rho_{e_i} \cdot A_i}{\sum_i^n A_i}, \quad (4)$$

где ρ_{v_i} , ρ_{e_i} – коэффициенты отражения света и всей солнечной радиации для i -го типа покрытия согласно формулам (1) и (2) соответственно, дол. ед.; A_i – площадь поверхностей с i -м типом покрытия, м².

Таким образом, при расчете средневзвешенного коэффициента отражения фасада по формуле (3) учитывается спектральная чувствительность глаза, которая входит в расчет коэффициента отражения облицовочного материала в видимой области согласно формуле (1). Поэтому средневзвешенный коэффициент отражения рассчитывается только для видимой области. При расчете средневзвешенного альbedo фасада учитывается отражение всего диапазона солнечного излучения без поправки на зрение стандартного наблюдателя (формулы (2) и (4)). Этот диапазон включает так называемое коротковолновое инфракрасное излучение, поэтому присутствует индекс k в обозначении средневзвешенного альbedo.

Сравнительные расчеты средневзвешенного коэффициента отражения и средневзвешенного альbedo фасада

В нормативном документе (СП 367.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования естественного и совмещенного освещения») в таблице А.3 приведены значения средневзвешенного коэффициента отражения света фасадом при применении различных облицовочных материалов. Проведем сравнительные расчеты средневзвешенного коэффициента отражения света фасадом согласно данным нормативного документа (СП 367.1325800.2017) и по формуле (3) с использованием полученных экспери-

ментальных данных. В качестве методического примера рассматривается здание серии П-55 (рис. 2).

Здание имеет площадь фасада без учета светопроемов 1220 м²; суммарную площадь стеклопакетов (остекления) без учета переплетов 188 м²; суммарную площадь видимой части переплетов 46 м². Суммарная площадь остекления составляет 15% всей площади фасада.

Для расчетов принимается, что в здании сначала применяются двухкамерные стеклопакеты со стеклами без покрытий, затем стеклопакеты со стеклами с покрытиями.

Характеристики выбранных стеклопакетов:
– стеклопакет со стеклами без покрытий 4М1-16Аг-4М1-16Аг-4М1 ($\rho_v^{\text{clear}}=0,2$; $\rho_e^{\text{clear}}=0,18$);

– стеклопакет со стеклами с мультифункциональными (низкоэмиссионными и солнцезащитными) покрытиями 4СИ-16Аг-4М1-16Аг-4М1 ($\rho_v^{\text{low-e}}=0,15$, $\rho_e^{\text{low-e}}=0,36$), где СИ – стекло толщиной 4 мм с мультифункциональным покрытием. Отличие выбранных мультифункциональных стеклопакетов от стеклопакетов без покрытий состоит в том, что они имеют примерно такой же коэффициент пропускания в видимой области и повышенный коэффициент отражения в инфракрасной области. Также такие покрытия способствуют снижению теплопотерь.

В здании используются переплеты RAL9016 ($\rho_v=0,86$; $\rho_e=0,73$).

Сравнение результатов расчета средневзвешенного альbedo фасада приведено в табл. 3.

По результатам проведенных экспериментальных исследований и последующим расчетам по формулам (1) и (2) для отобранных образцов принимаются следующие величины: ρ_v – коэффициент отражения света образцом, дол. ед.; ρ_e – коэффициент отражения солнечной радиации образцом, дол. ед.;

По формулам (3) и (4) рассчитываются следующие величины: $\rho_{\text{ср}}^{\text{clear}}$ – средневзвешенный коэффициент отражения фасада для видимого света при применении остекления без покрытий, дол. ед.; A_k^{clear} – средневзвешенное альbedo фасада для солнечной радиации при применении остекления без покрытий, дол. ед.; $\rho_{\text{ср}}^{\text{low-e}}$ – средневзвешенный коэффициент отражения фасада для видимого света при применении остекления с мультифункциональными покрытиями, дол. ед.; $A_k^{\text{low-e}}$ – средневзвешенное альbedo фасада для солнечной радиации при применении остекления с мультифункциональными покрытиями, дол. ед.

По нормативному документу (СП 367.1325800.2017) принимаются следующие величины: $\rho_v^{\text{нп}}$ – коэф-

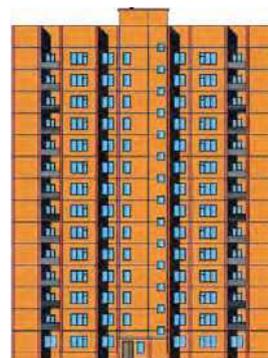


Рис. 2. Пример здания серии П-55, в котором возможно применение исследуемых облицовочных материалов

Fig. 2. An example of a building of the P-55 series, in which it is possible to use the studied facing materials

Таблица 3
Table 3

Исходные данные для расчетов и результаты расчета средневзвешенного коэффициента отражения и альбедо фасада (см. примеч. к табл. 3)
Initial data for calculations and the results of calculating the weighted average reflection coefficient and the albedo of the facade (see the note to Table 3)

Материал	Цвет	$\rho_{\text{в}}$, дол. ед.	$\rho_{\text{е}}$, дол. ед.	$\rho_{\text{в}}^{\text{СП}}$, дол. ед.	$\rho_{\text{ср}}^{\text{СП}}$, дол. ед.	$\rho_{\text{ср}}^{\text{clear}}$, дол. ед.	A_k^{clear} , дол. ед.	$\rho_{\text{ср}}^{\text{low-e}}$, дол. ед.	$A_k^{\text{low-e}}$, дол. ед.	$\frac{\rho_{\text{ср}}^{\text{СП}} - \rho_{\text{ср}}^{\text{clear}}}{\rho_{\text{ср}}^{\text{СП}}} \cdot 100\%$	$\frac{\rho_{\text{ср}}^{\text{СП}} - \rho_{\text{ср}}^{\text{low-e}}}{\rho_{\text{ср}}^{\text{СП}}} \cdot 100\%$
Штукатурка											
7059E	Розовый	0,49	0,61	0,6	0,6	0,46	0,56	0,46	0,58	23	24
7006E	Желтый	0,7	0,7	0,6	0,6	0,64	0,63	0,63	0,66	-7	-6
9001E	Белый	0,9	0,87	0,7	0,55	0,81	0,78	0,8	0,8	-47	-46
Краска											
4001E	Серый	0,48	0,46	0,4	0,34	0,46	0,43	0,45	0,46	-34	-32
7001E	Светло-серый	0,71	0,72	0,5	0,41	0,65	0,65	0,64	0,67	-58	-57
1044E	Темно-серый	0,08	0,09	0,2	0,2	0,12	0,12	0,11	0,15	40	43
4044E	Серый	0,25	0,23	0,4	0,34	0,26	0,24	0,26	0,26	23	25
1068E	Синий	0,15	0,53	0,2	0,2	0,18	0,49	0,17	0,51	11	14
1101E	Зеленый	0,21	0,32	0,2	0,2	0,23	0,31	0,22	0,34	-15	-11
1042E	Черный	0,05	0,06	0,2	0,2	0,09	0,1	0,09	0,12	53	56
Кирпич											
М-500	Красно-коричневый	0,34	0,66	0,3	0,27	0,34	0,60	0,33	0,62	-25	-23
М-175б	Белый	0,58	0,72	0,6	0,48	0,54	0,65	0,53	0,67	-12	-11
М-175к	Коричневый	0,13	0,46	0,3	0,27	0,16	0,43	0,16	0,46	40	42
Керамогранит											
Prestige	Белый	0,54	0,62	0,7	0,55	0,51	0,57	0,50	0,59	8	9
Композит											
Alcotex 1	Темно-красный	0,14	0,39	0,2	0,2	0,17	0,37	0,16	0,4	15	18
МП1005	Белый	0,72	0,67	0,7	0,55	0,66	0,61	0,65	0,63	-19	-18

коэффициент отражения света материалом, дол. ед.; $\rho_{\text{ср}}^{\text{ср}}$ — средневзвешенный коэффициент отражения фасада для видимого света, дол. ед.

В табл. 3 проводится сравнение следующих величин: $\rho_{\text{ср}}^{\text{ср}}$ и $\rho_{\text{ср}}^{\text{clear}}$; $\rho_{\text{ср}}^{\text{ср}}$ и $\rho_{\text{ср}}^{\text{low-e}}$.

Обсуждение результатов

При сравнении результатов расчета экспериментально полученных коэффициентов отражения света образцами ρ_0 и принятых по нормативному документу СП 367.1325800.2017 $\rho_0^{\text{ср}}$ видно, что существенных отличий нет (табл. 3). При сравнении средневзвешенных коэффициентов отражения фасада, рассчитанных и принятых по СП, $\frac{\rho_{\text{ср}}^{\text{ср}} - \rho_{\text{ср}}^{\text{clear}}}{\rho_{\text{ср}}^{\text{ср}}} 100\%$ и $\frac{\rho_{\text{ср}}^{\text{ср}} - \rho_{\text{ср}}^{\text{low-e}}}{\rho_{\text{ср}}^{\text{ср}}} 100\%$ имеется существенное различие, достигающее значительных величин, как с превышением $\rho_{\text{ср}}^{\text{ср}}$ (на 56%) для темного фасадного покрытия, так и с понижением $\rho_{\text{ср}}^{\text{ср}}$ (на 58%) для светлого фасадного покрытия. Такие различия в расчетах показывают, что влияние темного фасада противостоящего здания недооценено, а влияние светлого фасадного покрытия переоценено в нормативных документах.

Влияние замены остекления без покрытий на остекление с покрытиями на величину средневзвешенного коэффициента отражения и альbedo фасада можно оценить по различиям следующих величин: $\rho_{\text{ср}}^{\text{clear}}$ и $\rho_{\text{ср}}^{\text{low-e}}$, A_k^{clear} и $A_k^{\text{low-e}}$. Из данных табл. 3 видно, что величина средневзвешенного коэффициента отражения при замене остекления, $\rho_{\text{ср}}^{\text{clear}} - \rho_{\text{ср}}^{\text{low-e}}$, изменяется на 0,01 дол. ед., а величина средневзвешенного альbedo фасада, т. е. $A_k^{\text{clear}} - A_k^{\text{low-e}}$, изменяется на 0,03 дол. ед. Значит, для рассматриваемого примера замена остекления на мультифункциональное не вызывает значительного изменения рассматриваемых величин.

Сравнение величин средневзвешенных коэффициентов отражения и средневзвешенных альbedo показывает, что применение определенных облицовочных материалов повышает их величину пропорционально полученному экспериментально коэффициенту отражения этого облицовочного материала, так как облицовочные материалы занимают большую площадь на фасаде.

Из представленного анализа следует, что при вычислении по рассматриваемой методике значительное влияние на величину средневзвешенного коэффициента отражения и средневзвешенного альbedo оказывает облицовочный материал, занимающий значительную площадь на фасаде.

Заключение

Таким образом, проведены исследования по спектральному отражению видимого света и всего диапазона солнечного излучения образцами различных облицовочных материалов. Показано, что различные материалы, имея примерно равные коэффициенты отражения в видимой области, в инфракрасной области способны увеличивать или уменьшать

отражение солнечной радиации. Данный факт возможно использовать для регулирования величины отражаемой солнечной радиации в инфракрасной области, исключая существенное изменение в видимом диапазоне.

Рассчитаны интегральные коэффициенты отражения видимого света и солнечной радиации для каждого образца, которые могут использоваться как справочные данные.

На основе полученных экспериментальных данных проведены расчеты средневзвешенного коэффициента отражения фасада (в видимой области с поправкой на спектральную чувствительность глаза стандартного наблюдателя) и средневзвешенного альbedo фасада (во всей области солнечного излучения, включая ближнее инфракрасное (тепловое) излучение) для здания с площадью остекления, занимающей 15% всей площади фасада. Расчеты проводились при изменении типа фасадного покрытия и, следовательно, его коэффициента отражения, и при последовательной замене остекления без покрытий на остекление с мультифункциональными покрытиями, способствующими снижению теплопотерь и обеспечивающими солнцезащиту.

Проведено сравнение рассчитанного средневзвешенного коэффициента отражения фасада с принятым по нормативному документу. Показано, что при использовании темного фасадного покрытия расчет по нормативному документу является завышенным, а при использовании светлого покрытия — заниженным.

Показано, что влияние замены остекления, занимающего 15% от площади фасада, на изменение величины средневзвешенного коэффициента отражения и средневзвешенного альbedo фасада невелико.

При оценке влияния смены облицовочного материала показано, что полученные экспериментально их коэффициенты отражения оказывают наибольшее влияние на средневзвешенный коэффициент отражения и средневзвешенное альbedo за счет большей площади, занимаемой облицовочным материалом на фасаде.

Исходя из вышеизложенного следует учесть важность применения рассматриваемого расчета средневзвешенного альbedo фасада в нормативных документах, а также формирование базы данных коэффициентов отражения облицовочных материалов в видимой области и альbedo (во всем диапазоне солнечного излучения).

Список литературы / References

1. Esquivias P.M., Moreno D., Navarro J. Solar radiation entering through openings: Coupled assessment of luminous and thermal aspects. *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 175, pp. 208–218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.021>
2. Kontoleon K.J. Energy saving assessment in buildings with varying façade orientations and types of glazing

- systems when exposed to sun. *International Journal of Performability Engineering*. 2013. Vol. 9. No. 1, pp. 33–48.
3. Korkina E.V., Shmarov I.A., Tyulenev M.D. Effectiveness of energy-saving glazing in various climatic zones of Russia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869 (7). 072010. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/7/072010>
 4. Yunsong Han, Hong Yu, Cheng Sun. Simulation-based multiobjective optimization of timber-glass residential buildings in severe cold regions. *Sustainability*. 2017. Vol. 9 (12). 2353. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9122353>
 5. Zubarev K.P., Gagarin V.G. Determining the coefficient of mineral wool vapor permeability in vertical position. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. Vol. 1259, pp. 593–600. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_56
 6. Соловьёв А.К. Оценка освещения помещений с применением теории светового поля // *Светотехника*. 2013. № 4. С. 66–68.
 6. Solov'ev A.K. Assessment of indoor lighting using light field theory. *Svetotekhnika*. 2013. No. 4, pp. 66–68. (In Russian).
 7. Cheng Sun, Qianqian Liu and Yunsong Han. Many-objective optimization design of a public building for energy, daylighting and cost performance improvement. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10 (7). 2435. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10072435>
 8. Mardaljevic J., and Christoffersen J. A. Roadmap for upgrading national/eu standards for daylight in buildings. *Proceedings of the CIE Centenary Conference*. Paris. 2013, pp. 178–187.
 9. Nguyen P.T.K., Solovyov A.K., Pham T.H.H., Dong K.H. Confirmed method for definition of daylight climate for tropical Hanoi. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 982, pp. 35–47. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8_4
 10. Brembilla E., Mardaljevic J. Climate-Based Daylight Modelling for compliance verification: Benchmarking multiple state-of-the-art methods. *Building and Environment*. 2019. Vol. 158, pp. 151–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.051>
 11. Zemtsov V., Korkina, E., Zemtsov V. Relative brightness of facades in the L-shaped urban buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 896. 012027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012027>
 12. Куприянов, В.Н., Халикова Ф.Р. Пропускание ультрафиолетовой радиации оконными стеклами при различных углах падения луча // *Жилищное строительство*. 2012. № 6. С. 64–65.
 12. Kupriyanov, V.N., Khalikova F.R. Transmission of ultraviolet radiation by window panes at different angles of incidence of the beam. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2012. No. 6, pp. 64–65. (In Russian).
 13. Стецкий С.В., Ларионова К.О. Расчет естественной освещенности помещений с системой верхнего естественного освещения с учетом светотехнического влияния окружающей застройки // *Вестник МГСУ*. 2014. №12. С. 20–30. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.12.20-30>
 13. Stetskii S.V., Larionova K.O. Calculation of natural illumination of rooms with an overhead natural lighting system, taking into account the lighting influence of the surrounding buildings. *Vestnik MGSU*. 2014. No. 12, pp. 20–30. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.12.20-30>
 14. Соловьёв А.К. Зеркальные фасады: их влияние на освещение противостоящих зданий // *Светотехника*. 2017. № 2. С. 28–31.
 14. Solov'ev A.K. Mirrored facades: their effect on the lighting of opposing buildings. *Svetotekhnika*. 2017. No. 2, pp. 28–31. (In Russian).
 15. Zhang Y., Long E., Li Y., Li P. Solar radiation reflective coating material on building envelopes: Heat transfer analysis and cooling energy saving. *Energy Exploration & Exploitation*. 2017, pp. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1177/0144598717716285>
 16. Коркина Е.В., Шмаров И.А. Аналитический метод расчета рассеянной солнечной радиации, поступающей на вертикальную поверхность при частично перекрытом небосводе // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2018. № 3 (375). С. 230–236.
 16. Korkina E.V., Shmarov I.A. Analytical method of calculation of the diffuse solar radiation received on a vertical surface with partially. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2018. No. 3 (375), pp. 230–236. (In Russian).
 17. Ivanova S.M. Estimation of background diffuse irradiance on orthogonal surfaces under partially obstructed anisotropic sky. Part 1 – Vertical surfaces. *Solar Energy*. 2013. Vol. 95, pp. 376–391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.01.021>
 18. Коркина Е.В., Шмаров И.А., Земцов В.А., Тюленев М.Д. Аналитический метод расчета отраженной от фасада противостоящего здания солнечной радиации // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2019. № 4 (382). С. 189–196.
 18. Korkina E.V., Shmarov I.A., Zemtsov V.A., Tyulenev M.D. Analytical method of calculation of the reflected solar radiation from the facade of the opposing building. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2019. No. 4 (382), pp. 189–196. (In Russian).

Е.В. ЛЕВИН¹, канд. физ.-мат. наук; А.Ю. ОКУНЕВ^{1,2}, канд. физ.-мат. наук; Е.Ю. ЦЕШКОВСКАЯ¹, инженер

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

² Государственный университет по землеустройству (105064, г. Москва, ул. Казакова, 15)

Экология помещений. Влияние строительных и отделочных материалов

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на здоровье человека, является загрязненность внутреннего воздуха помещения. Токсичные примеси, поступающие в органы дыхания человека, находящегося в помещении, в значительной степени связаны с тем, какие применены в нем строительные и отделочные материалы. Среди таких токсичных примесей – формальдегид, выделяемый склеенными материалами на основе древесины, минераловатными утеплителями на фенолформальдегидных связующих; бензол, выделяемый линолеумом, ламинированными покрытиями, лаками и красками; фенол, выделяемый виниловыми обоями, линолеумом и др. При этом выделения строительных материалов суммируются с выделениями, связанными с жизнедеятельностью людей, и поступлениями с наружным воздухом. Безопасность внутренней среды оказывается комплексным фактором, обусловленным загрязнениями и вентиляцией. При этом в настоящее время практически отсутствует государственное регулирование в части токсичности строительных отделочных материалов, а проектировщики не имеют необходимых данных для обеспечения людей новых и реконструируемых зданий безопасным воздухом. В статье на примере использования различных отделочных материалов показана степень загрязненности жилых помещений и ее соответствие существующим санитарно-гигиеническим требованиям. Сделан вывод о необходимости учета прогнозируемого качества воздуха в помещениях на этапах проектирования зданий, а также об обязательной сертификации строительных и эксплуатируемых объектов на качество воздуха.

Ключевые слова: экология помещений, строительные и отделочные материалы, токсичные вещества, качество воздуха, предельно допустимые концентрации.

Для цитирования: Левин Е.В., Окунев А.Ю., Цешковская Е.Ю. Экология помещений. Влияние строительных и отделочных материалов // *Строительные материалы*. 2021. № 6. С. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-41-46>

E.V. LEVIN¹, Candidate of Science (Physics and Mathematics); A.Y. OKUNEV^{1,2}, Candidate of Science (Physics and Mathematics); E.Yu. TSESHKOVSKAYA¹, (Engineer)

¹ Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction (21, Lokomotivny Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

² State University of Land Use Planning (15, Kazakova Street, Moscow, 105064, Russian Federation)

Ecology of Premises. Influence of Building and Finishing Materials

One of the most important factors affecting human health is indoor air pollution. Toxic impurities entering the respiratory organs of a person in a room are largely related to the construction and finishing materials used in it. Among such toxic impurities is formaldehyde (released by glued wood-based materials, mineral wool insulation based on phenol-formaldehyde binders); benzene (produced by linoleum, laminated coatings, varnishes and paints); phenol (released by vinyl wallpaper, linoleum) and others. In this case, the emissions of building materials are summed up with the emissions associated with the vital activity of people and with the intake from the outside air. The safety of the indoor environment turns out to be a complex factor due to pollution and ventilation. At the same time, at present, there is practically no state regulation in terms of the toxicity of building finishing materials, and the designers do not have the necessary data to provide people with safe air for new and reconstructed buildings. The article shows the degree of pollution of residential premises and its compliance with the existing sanitary and hygienic requirements using the example of the use of various finishing materials. It is concluded that it is necessary to take into account the predicted indoor air quality at the stages of building design, as well as the mandatory certification of construction and operating facilities for air quality.

Keywords: ecology of premises, construction and finishing materials, toxic substances, air quality, maximum permissible concentration.

For citation: Levin E.V., Okunev A.Yu., Tseschkovskaya E.Yu. Ecology of premises. Influence of building and finishing materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 6, pp. 41–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-41-46>

Одной из национальных целей развития Российской Федерации является улучшение жилищных условий не менее 5 млн семей ежегодно (Указ Президента РФ № 2041 от 07.05.2018). При этом необходимо достижение устойчивого сокращения непригодного для проживания жилищного фонда [1].

На территории РФ ведется активное строительство жилых домов, безопасность внутренней среды которых нельзя считать достаточной, так как нормирование, с помощью которого можно было бы осуществлять оценку качества жилой среды по всем важным для здоровья человека параметрам, отсутствует. В настоящий момент жилой фонд оценивается по таким показателям, как стоимость квадратного метра жилой площади,

престижность отделочных материалов, эргономика и логистика, дизайн и интерьер помещений. Воздействие материалов на здоровье населения не учитывается. Более того, существующий жилой фонд страны и качество зданий зачастую не отвечают действующим эколого-гигиеническим требованиям [2]. Руководство Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [3] прямо указывает на существование данной проблемы во всем мире, не только в РФ: «...Неудовлетворительное качество воздуха внутри помещений расценивается в качестве серьезного фактора риска для здоровья в странах как с низким, так и со средним и высоким уровнями дохода. Важность данного вопроса обусловлена еще и тем, что люди проводят в помещении значительную

часть времени...» По мнению экспертов ВОЗ, уровень загрязнения воздуха остается опасно высоким во многих регионах планеты. Оценки показывают, что девять из десяти жителей Земли дышат воздухом с опасной для здоровья концентрацией загрязняющих веществ [4, 5]. Комбинированное воздействие атмосферного (наружного) и домашнего (внутреннего) воздуха вызывает около 7 млн преждевременных смертей ежегодно, в основном в результате увеличения смертности от инсульта, болезней сердца, хронической обструктивной болезни легких, рака легких и острых респираторных инфекций [6, 7].

Цель настоящей статьи – на примере опубликованных данных показать, к какому качеству воздуха может привести использование современных строительных и отделочных материалов. Рассматриваются не только выделения, происходящие в помещениях, но и токсические вещества, поступающие в вентиляционном воздухе и выделяемые самим человеком.

По данным [8], в воздушной среде жилых помещений наблюдается 560 различных токсичных органических соединений. Установлено, что в воздухе концентрации этилбензола, ацетальдегида, аммиака превышали ПДКсс (среднесуточную предельно допустимую концентрацию) в среднем в 2,5 раза, стирола – в 2,6 раза, формальдегида – в 8,3 раза, двуокиси азота и оксида углерода – в 1,2–1,6 раза [4, 8]. В настоящее время появились веские доказательства связи таких заболеваний, как сердечно-сосудистые, респираторные и онкологические, с загрязнением воздуха и воздействием химических веществ [9]. К факторам, способствующим развитию и распространению аллергической патологии среди населения, следует отнести уровень химического загрязнения жилой среды [10]. При этом:

- диоксид азота и формальдегид способствуют проявлению атопического дерматита и астмы;
- стирол, бензол, фенол, сероуглерод обладают гонадотропным действием (нарушение половых функций) [8];
- бензол и фенол вызывают нарушения внутриутробного развития плода;

– бензол, толуол обладают канцерогенным действием [8].

Эмиссия газообразных веществ из полимерных материалов связана с:

- выделением низкомолекулярных компонентов (непрореагировавшие мономеры, эмульгаторы, растворители, катализаторы);
- «старением» полимеров в виде постепенного разрушения полимерных цепочек;
- химическим взаимодействием с окружающей средой [11, 12].

В соответствии с СанПиН 2.1.2.2645–10 концентрации химических веществ в воздухе жилых помещений *при сдаче их в эксплуатацию* не должны превышать величины среднесуточных предельно допустимых концентраций (ПДКсс) загрязняющих веществ, установленных гигиеническим нормативом ГН 2.1.6.3492–17 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений». Но если учесть, что в большинстве сдаваемых в эксплуатацию квартир внутренняя отделка еще не произведена, а если и произведена, она оценивается только будущими жильцами, то требования СанПиН 2.1.2.2645–10 в большинстве случаев являются формальными и реальные экологические условия в квартире могут оказаться совсем иными.

В соответствии с полученными данными [8] наиболее опасный молекулярный загрязнитель внутреннего воздуха помещений – формальдегид. В работах В.Б. Хабарова проанализированы выделения формальдегида из пиломатериалов сосны и березы [13] и березовой фанеры с КФС (карбамидо-формальдегидными смолами) марок КФ-115-53 и КФМТ-15 [13, 14].

В табл. 1 приведены концентрации формальдегида, которые могут образовываться при использовании в помещениях материалов из древесины.

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что концентрации формальдегида многократно превышают ПДК (0,01 мг/м³), в том числе в случае тради-

Таблица 1
Table 1

Концентрации формальдегида, выделяющегося из древесосодержащих материалов при насыщенности 1 мг/м³, при температуре 20 и 40°C при воздухообмене 1 ч⁻¹ [14]
The concentration of formaldehyde released from wood-containing materials at a saturation of 1 mg/m³, at a temperature of 20 and 40°C with an air exchange of 1 h⁻¹ [14]

Материал	Концентрация формальдегида, в помещении, мг/м ³	
	при 20°C	при 40°C
Свежие образцы древесины березы толщиной 10 мм	0,078	0,191
Образцы древесины березы толщиной 10 мм через 30 сут кондиционирования образцов	0,042	0,047
Свежие образцы древесины сосны толщиной 19 мм	0,2	0,206
Образцы древесины сосны толщиной 19 мм через 6 мес кондиционирования	0,081	0,09
Фанера из шпона березы на основе КФС марки КФ-115-53 толщиной 8 мм	0,048	Нет данных
Фанера из шпона березы на основе КФС марки КФ-115-53 толщиной 15 мм	0,1	Нет данных
Фанера из шпона березы на основе КФС марки КФМТ-15 толщиной 9 мм	0,055	Нет данных
Фанера из шпона березы на основе КФС марки КФМТ-15 толщиной 18 мм	0,08	Нет данных

Таблица 2
Table 2

Средние концентрации формальдегида, реализуемые в помещении при использовании различных материалов [15]
Average concentrations of formaldehyde realized indoors using various materials [15]

Строительный (отделочный) материал	Концентрация формальдегида, в помещении, мг/м ³
Цементно-стружечные плиты со стены	0,0015±0,0001
Цементно-стружечные плиты с пола	0,0011±0,0003
Минеральная вата с пола	0,0020±0,00014
Минеральная вата со стены	0,0017±0,00014
Гипсокартонный лист с межкомнатной стены	0,0023±0,0003
Утеплитель (минеральная вата)	0,0018±0,0003
Фанера прессованная	0,0028±0,0004
ГВЛ межкомнатной стены	0,0019±0,0003
ГВЛ пола	0,0027±0,0005
ОСП, пол	0,0021±0,0001
Изолирующий материал пола	0,003±0,0006
Суммарно: 8 одновременно применяемых материалов	0,013±0,0026

ционно считающихся экологичными пиломатериалов на основе сосны и березы (без клея) [13, 14].

В табл. 2 приведены данные по содержанию формальдегида при использовании других материалов.

Эти данные в соответствии с работой [15] получены для строительных материалов, предусмотренных проектом каркасного жилого дома. Данные по концентрации формальдегида получены при температуре в помещении 20°C, относительной влажности воздуха 30%, кратности воздухообмена 0,5 ч⁻¹. Исследования материалов [15] проведены в климатических камерах в соответствии с методикой МУ 2.1.2.1829–04 «Санитарно-гигиеническая оценка полимерных и полимерсодержащих строительных материалов и конструкций».

Как видно из табл. 2, суммарная концентрация формальдегида в каркасном доме (полученная путем сложения концентраций формальдегида, выделяющихся из восьми материалов), должна составлять 0,013 мг/м³ (1,3 ПДК_{сс}). Прямые инструментальные измерения качества воздуха внутри помещений сборно-каркасных строений подтвердили расчетные данные. Среднесуточные концентрации формальдегида в каркасных домах доходили до 8,3 ПДК_{сс} [15].

В работе [16] представлены результаты инструментальных исследований воздуха 77 жилых помещений каркасных домов в микрорайоне Усольский-2 г. Березники Пермского края. Показано, что в 90% помещений концентрация формальдегида в 1,5–10 раз выше ПДК (0,01 мг/м³). Исследования состояния здоровья жителей показали, что у взрослого населения, проживающего в исследованных помещениях в течение 1,5–3 лет, уровень распространенности болезней органов дыхания достоверно выше соответствующего значения территории сравнения [16].

В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 28.01.2006 № 478 (далее –

ПП478) измерения загрязненности воздуха проводятся по перечню, содержащему 22 вещества (см. табл. 3 документа). Перечень загрязняющих веществ по ПП478, помимо приведенных в табл. 3, включает металлы: ртуть, свинец и его неорганические соединения, которые практически не выделяются из строительных материалов.

На сегодняшний день перечень ПП478, состоящий из 22 веществ, не может считаться в полной мере достаточным; на практике реализуются значимые загрязнения воздуха по следующим компонентам [1]: акрилонитрил (проп-2-енонитрил), тетрахлорметан (четырёххлористый углерод), трихлорметан (хлороформ), трихлорэтилен, фталевый ангидрид (изобензофуран-1,3-дион), хлорэтен (винилхлорид, хлористый винил), эпихлоргидрин (3-хлор-1,2-эпоксипропан, хлорметилоксиран).

Результаты испытаний строительных материалов, проведенных в НИИСФ РААСН за последние 20 лет, показали необходимость расширить перечень до 30–33 веществ. По данным авторов, из таких широко используемых строительных материалов, как линолеум, выделяют следующие вредные вещества: бензол, толуол, фенол, этилбензол, трихлорметан и др. Хлорированные углеводороды не входят в список ПП478.

В материалах на основе эпоксидных смол, таких как наливные полы, обнаружены: эпихлоргидрин, этилендиамин, стирол, этилбензол и др. Представляется, что в перечень ПП478 необходимо добавить эпихлоргидрин, этилендиамин и ацетон. Авторы работы [1] придерживаются такого же мнения.

Из материалов на основе искусственного камня (керамический гранит) и керамической плитки выделяются следующие вредные вещества: метилакрилат, метилметакрилат, формальдегид, акрилонитрил и др. Акрилонитрил отсутствует в перечне ПП478.

В выделениях из древесно-стружечных плит (ДСП) на основе фенолформальдегидной смолы обнаружены: фенол, формальдегид, ацетальдегид, метанол, ацетон. ДСП на основе мочевиноформальдегидной смолы дополнительно к перечисленным выделяет аммиак.

Химический состав воздуха помещений зависит не только от выделений из строительных материалов, но и от загрязнения приточного воздуха [4–6] и антропоксинов (веществ, выделяющихся в результате жизнедеятельности организма человека) [17, 18]. Установлено, что человек в процессе своей жизнедеятельности выделяет около 400 токсичных веществ [8], среди них диоксид углерода, ацетон, аммиак, амины и аммонийные соединения, сероводород, летучие жирные кислоты, фенолы и др. Длительное пребывание человека в плохо вентилируемых помещениях приводит к накоплению в организме антропоксинов, которое может сопровождаться головной болью, снижением работоспособности, общей слабостью и т. д. или никак не проявляться и не замечаться человеком вплоть до появления опасных заболеваний [8, 17].

В работе [19] приведены результаты исследования качества воздуха в жилых и общественных помещениях в модельных условиях загрязнения, учитываю-

Таблица 3
Table 3

Загрязнения воздуха жилого помещения [20]
Residential air pollution [20]

№ п/п	Наличие вещества в ПП478	Название	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	Отношение средней концентрации к ПДК
1	-	1,2,4 Триметилбензол	0,015	2	0,01
2	-	1,3,5 Триметилбензол	0,1	3	0,02
3	-	2 Метилбута-1,3-диен	0,1	3	0,01
4	+	Аммиак	0,04	4	2,61
5	+	Ацетальдегид	0,01	3	0,01
6	+	Ацетон	0,35	4	0,02
7	+	Бенз(а)пирен	0,000001	1	0,4
8	+	Бензол	0,1	2	0,43
9	-	Бута-1,3-диен	1	4	<0,01
10	-	Бутилакрилат	0,0075	2	0,02
11	-	Винилацетат	0,15	3	0,04
12	-	Гексен-1	0,085	3	0,01
13	-	Гептан	1,5	3	0,01
14	+	Диметилбензол (ксилол)	0,2	3	0,05
15	-	Диоксид азота	0,04	3	1,60
16	+	Диоксид углерода CO ₂	1800	4	0,91
17	-	Дихлорметан	8,8	4	<0,01
18	-	Изобутилен	0,1	4	0,00
19	+	Метилметакрилат	0,01	2	0,01
20	+	Оксид азота	0,06	3	0,30
21	+	Оксид углерода	3	4	0,44
22	+	Стирол (этенилбензол)	0,002	2	0,06
23	+	Сероводород	0,08	2	0,01
24	-	Тетрахлорметан	0,7	4	<0,01
25	+	Толуол	0,6	2	0,01
26	-	Трихлорметан	0,03	2	<0,01
27	+	Фенол	0,006	2	0,20
28	+	Формальдегид	0,01	2	1,23
29	-	Циклогексанон	0,04	3	<0,01
30	+	Этилбензол	0,02	3	<0,01

щих поступления вредных веществ с вентиляционным воздухом и их эмиссию внутри помещений отделочными материалами и веществ, выделяемых в процессе жизнедеятельности людей. В качестве загрязнений наружной атмосферы использованы данные по Московскому региону за 2018 г. Данные по эмиссии отделочных материалов получены из протоколов испытаний в лабораториях НИИСФ за прошедшие годы. Основная цель проведенных исследований – показать, какие вещества могут быть основными загрязнителями воздуха помещения в условиях крупного города на примере Москвы и какие уровни загрязнения реализуются на практике; определить влияние вентиляционного воздухообмена на загрязненность помещений.

В работе [20] проведено исследование загрязнения внутреннего воздуха помещения, содержащего 13 различных строительных и отделочных материалов. В помещении постоянно находятся два человека, помещение вентилируется наружным воздухом с постоянным расходом 70 м³/ч. В данном помещении с учетом выделений строительных и отделочных материалов, загрязнения наружного воздуха и выделений людьми реализуется следующий состав по вредным примесям (табл. 3):

Как видно из табл. 3, основными загрязнителями воздуха помещения являются диоксид азота, формальдегид, диоксид углерода и аммиак. Концентрация формальдегида в помещении выросла незначительно по отношению к наружному воздуху, что связано с конкретным выбором материалов. При этом, как показано в табл. 1 и 2, могут быть случаи, когда загрязнение формальдегидом за счет строительных и отделочных материалов значительно, например из-за использования ДСП, фанеры и других строительных материалов, которые в рамках работы [20] не рассматривались. По данным, представленным в табл. 3, концентрация аммиака выросла более чем в два раза относительно наружного воздуха, а концентрация CO₂ – более чем в 2,5 раза, причиной чего является их выделение человеком.

Застройщикам и дизайнерам на сегодняшний момент негде ознакомиться с выделениями вредных веществ из строительных материалов и выбрать материал, наименее опасный для человека. До 2010 г. на строительную продукцию, представляющую потенциальную опасность для человека и окружающей среды, в обязательном порядке Федеральное бюджетное учреждение здравоохранения (ФБУЗ) «Центр гигиены и эпидемиологии» Роспотребнадзора РФ оформляло санитарно-эпидемиологические заключения на основании протоколов санитарно-гигиенических исследований (испытаний). Ознакомиться с выданными заключениями можно было в Реестре санитарно-эпидемиологических заключений. С образованием Таможенного союза санитарно-эпидемиологические заключения отменили. В настоящее время реестр санитарно-эпидемиологических заключений не ведется и ознакомиться с гигиеническими характеристиками строительных материалов негде. Как считает Ю.Д. Губернский [2], «наконец, настало время, когда добровольная сертификация построенных объектов должна быть заменена на обязательную. При этом объективно с гигиенической точки зрения необходимы:

- эколого-гигиеническая экспертиза всех видов строительных и отделочных материалов;
- оценка микроклиматических параметров помещения;
- определение воздухообмена и эффективности воздухообмена» [2].

Заключение

Проблема качества воздуха помещений, его безопасности для людей стоит достаточно остро. Строительные и отделочные материалы никак не нормируются в части

выделения вредных веществ в воздух помещений, а многочисленные результаты исследований говорят о многократном превышении ПДК по ряду компонентов в жилых помещениях. По отдельным компонентам (например, формальдегид, аммиак) имеет место совместное влияние внешнего воздуха, выделений людьми и эмиссия строительными и отделочными материалами. При этом ВОЗ также указывает на существование проблемы, никак не предлагая ее решения.

С целью разрешения создавшейся ситуации целесообразно создать условия, в которых качество внутреннего воздуха, его состав по различным токсичным примесям станут предметом проектирования и будут известны до ввода в эксплуатацию. Должны учитываться применяемые материалы и экология места застройки (в том числе прогнозная), режим эксплуатации и вентиляции помещений. При определении требуемого качества воздуха появится возможность обоснованно

обеспечивать энергосберегающий эффект путем сокращения вентиляционного воздухообмена, когда это допустимо [21]. Для достижения данной цели необходимо проводить испытания материалов на эмиссию вредных примесей, делать результаты испытаний доступными, а также разрабатывать и нормировать критерии оценки качества воздуха на основании набора показателей. Единственное существующее в настоящий момент требование состоит в том, что, с одной стороны, концентрации по всем загрязняющим примесям не должны превышать ПДК. Но это требование недостаточно полно описывает воздействие на человека многокомпонентной токсичной смеси, а с другой — зачастую является практически невыполнимым. Например, в Москве в наружном воздухе наблюдается превышение ПДК по формальдегиду для значительной части территории. Внутри помещений концентрация формальдегида только возрастает.

Список литературы

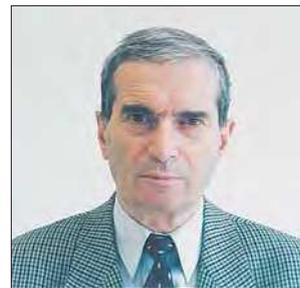
1. Крийт В.Е., Сладкова Ю.Н., Бадаева Е.А., Смирнов В.В., Зарицкая Е.В. К вопросу о гигиенических требованиях к качеству воздуха закрытых помещений на объектах жилищного строительства на стадии ввода в эксплуатацию // *Гигиена и санитария*. 2019. № 6. С. 608–615. DOI: <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2019-98-6-608-612>
2. Губернский Ю.Д. Проблемные вопросы гигиены жилых и общественных зданий и концепция развития исследований на перспективу // *Гигиена и санитария*. 2012. № 4. С. 12–15.
3. Руководство ВОЗ по качеству воздуха в помещениях: избранные загрязняющие вещества. Всемирная организация здравоохранения, 2011. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/132957/e94535_exsumR.pdf
4. Иваненко А.В. и др. Оценка риска здоровью населения от воздействия атмосферных загрязнений на отдельных территориях города Москвы // *Гигиена и санитария*. 2017. № 3. С. 206–210.
5. Рахманин Ю.А., Михайлова Р.И. Окружающая среда и здоровье: приоритеты профилактической медицины // *Гигиена и санитария*. 2014. № 5. С. 5–9.
6. Информационный бюллетень ВОЗ. Качество атмосферного воздуха и здоровье. 18 мая 2018 г.
7. Пресс-релиз ВОЗ. Всемирная организация здравоохранения. 2 мая 2018 г. Женева. <https://www.who.int/ru/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
8. Зарипова Л.Р., Иванов А.В., Тафеева Е.А. Внутрижилищная среда и здоровье населения // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 5. С. 161.
9. Погоньшева И.А., Погоньшев Д.А. Актуальные проблемы взаимосвязи окружающей среды и здоровья человека в странах Европейского союза. Обзор литературы // *Гигиена и санитария*. 2019. № 5. С. 473–477. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-5-473-477>

References

1. Kriyt V.E., Sladkova Yu.N., Badaeva E.A., Smirnov V.V., Zaritskaya E.V. On the issue of hygienic requirements for air quality of enclosed spaces at housing construction projects at the stage of commissioning. *Gigiena i sanitariya*. 2019. No. 6, pp. 608–612. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2019-98-6-608-612>.
2. Gubernskiy Yu.D., Litskevich V.K., Rakhmanin Yu.A., Kalinina N.V. Problem questions of hygiene of residential and public buildings and concept of development of studies for the future. *Gigiena i sanitariya*. 2012. No. 4, pp. 12–15. (In Russian).
3. WHO Indoor Air Quality Guidelines: Selected Pollutants. World Health Organization. 2011. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/132957/e94535_exsumR.pdf
4. Ivanenko A.V. et al. Assessment of public health risk from exposure to atmospheric pollution in certain areas of the city of Moscow. *Gigiena i sanitariya*. 2017. No. 3. pp. 206–210. (In Russian).
5. Rahmanin Yu.A., Mihajlova R.I. Environment and health: priorities for preventive medicine. *Gigiena i sanitariya*. 2014. No. 5, pp. 5–9. (In Russian).
6. WHO newsletter. Ambient air quality and health. May 18, 2018.
7. WHO press release. World Health Organization. May 2, 2018 Geneva. <https://www.who.int/ru/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
8. Zaripova L.R., Ivanov A.V., Tafeyeva E.A. Internal environment and public health. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. No. 5, p. 161 (In Russian).
9. Pogonysheva I.A., Pogonyshev D.A. Actual problems of the relationship between the environment and human health in the European Union. Literature review. *Gigiena i sanitariya*. 2019. No. 5, pp. 473–477. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-5-473-477>
10. Gubernskij Yu.D., Fedoseeva V.N., Makoveckaya A.K., Kalinina N.V., Fedoskova T.G. Ecological and hy-

10. Губернский Ю.Д., Федосеева В.Н., Маковецкая А.К., Калинина Н.В., Федоскова Т.Г. Экологические аспекты сенсibilизированности населения в жилой среде // *Гигиена и санитария*. 2017. № 5. С. 414–417. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-5-414-417>
11. Строганов В.Ф., Сагадеев Е.В. Биоповреждение строительных материалов // *Строительные материалы*. 2015. № 5. С. 5–9.
12. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Дергунова А.В., Сураева Е.Н., Смирнов В.Ф., Богатов А.Д., Казначеев С.В., Карпушин С.Н. Биологическая и климатическая стойкость цементных композитов // *Архитектура и строительство*. 2016. № 3. С. 119–126.
13. Хабаров В.Б. Применение газовой хроматографии при контроле санитарно-химических характеристик древесины сосны, березы и фанеры из шпона березы // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2009. № 1. С. 14–18.
14. Хабаров В.Б. Санитарно-химические характеристики композиционных древесных материалов и синтетических смол по данным газовой хроматографии // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2015. № 2. С. 196–215.
15. Никифорова Н.В., Май И.В. К проблеме нормирования миграции формальдегида из полимерсодержащих строительных, отделочных материалов и мебели // *Гигиена и санитария*. 2018. № 1. С. 43–49. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-1-43-49>
16. Никифорова Н.В., Май И.В., Евдошенко В.С., Лужецкий К.П., Отавина Е.А. Условия проживания и состояние здоровья жителей сборно-каркасных домов микрорайона Усольский-2 (г. Березники, Пермский край) // *Гигиена и санитария*. 2017. № 1. С. 40–44. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-1-40-44>
17. Бродач М.М., Шилкин Н.В. Создание безопасной среды обитания человека. Здания больные и здания здоровые // *Энергосбережение*. 2021. № 1. С. 1–11.
18. Горбанев С.А., Мозжухина Н.А., Ерёмин Г.Б., Носков С.Н., Карелин А.О., Выучейская Д.С., Копытенкова О.И., Бадаева Е.А. Об обосновании предложений по изменению и дополнению санитарно-эпидемиологических требований к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях // *Гигиена и санитария*. 2019. № 7. С. 707–712. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-7-707-712>
19. Волкова Н.Г., Левин Е.В., Окунев А.Ю. и др. Уточнение параметров микроклимата помещений жилых и общественных зданий. Отчет о НИР. № Г.Р. АААА-А19-119062790104-6. М.: НИИСФ РААСН, 2019. 230 с.
20. Левин Е.В., Окунев А.Ю. Качество воздуха в жилых и общественных зданиях. Роль вентиляционного воздухообмена // *Жилищное строительство*. 2020. № 7. С. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-7-41-51>
21. Левин Е.В., Окунев А.Ю. О нормировании качества воздуха в помещениях жилых и общественных зданий // *БСТ. Бюллетень строительной техники*. 2020. № 6. С. 60–63.
- gientic aspects of population sensitization in the living environment. *Gigiena i sanitariya*. 2017. No. 5, pp. 414–417. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-5-414-417>
11. Stroganov V.F. Sagadeev E.V. Bio-damage to building materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 5, pp. 5–9 (In Russian).
12. Erofeev V.T., Rodin A.I., Dergunova A.V., Surava E.N., Smirnov V.F., Bogatov A.D., Kaznacheev S.V., Karpushin S.N. Biological and climatic durability of cement composites. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2016. No. 3, pp. 119–126. (In Russian).
13. Habarov V.B. Primenenie gazovoj hromatografii pri kontrole sanitarno-himicheskikh harakteristik drevesiny sosny, beryozy i fanery iz shpona beryozy. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'*. 2009. No. 1, pp. 14–18.
14. Khabarov V.B. Sanitary-chemical characteristics of composite wood-based materials and synthetic resins according to gas chromatography. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2015. No. 2, pp. 196–215. (In Russian).
15. Nikiforova N.V., May I.V. To the problem of rationing the migration of formaldehyde from polymer-containing building, finishing materials and furniture. *Gigiena i sanitariya*. 2018. No. 1, pp. 43–49. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-1-43-49>
16. Nikiforova N.V., May I.V., Evdoshenko V.S., Luzhetsky K.P., Otavina E.A. On the evolution of living conditions and health status of residents in precast framed houses of the micro-district Usolsky-2 (the city of Berezniki, the Perm region). *Gigiena i sanitariya*. 2017. No. 1, pp. 40–44 (In Russian).
17. Brodach M.M., Shilkin N.V. Creation of a safe human environment. Buildings are sick and buildings are healthy. *Energoberezhnie*. 2021. No. 1, pp. 1–11. (In Russian).
18. Gorbanev S.A., Mozzhuhina N.A., Eryomin G.B., Noskov S.N., Karelin A.O., Vyucheskaya D.S., Kopytenkova O.I., Badaeva E.A. On the substantiation of proposals for changes and additions to the sanitary and epidemiological requirements for living conditions in residential buildings and premises. *Gigiena i sanitariya*. 2019. No. 7, pp. 707–712. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-7-707-712>
19. Volkova N.G., Levin E.V., Okunev A.Y., et al. Clarification of the microclimate of residential and public buildings. Report on research. No. G.R. АААА-А19-119062790104-6. М.: NIISF RAASN. 2019. 230 p. (In Russian).
20. Levin E.V., Okunev A.Yu. Air quality in residential and public buildings. Ventilation air exchange role. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2020. No. 7, pp. 41–51. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-7-41-51>
21. Levin E.V. Okunev A.Y. About normalizing air quality in rooms of residential and public buildings. *BST*. 2020. No. 6. pp. 60–63. (In Russian).

К 85-летию Владимира Ильича ТРАВУША



4 мая 2021 г. исполнилось 85 лет ученому, вице-президенту РААСН, профессору, доктору технических наук, главному конструктору и заместителю генерального директора ЗАО «Горпроект», заслуженному деятелю науки Российской Федерации, заслуженному строителю Российской Федерации, почетному строителю России, лауреату премии Совета Министров СССР, трижды лауреату премии Правительства Российской Федерации Владимиру Ильичу Травушу.

Владимир Ильич Травуш – автор более 300 научных трудов, патентов, нормативных документов, национальных нормативных документов по строительным конструкциям, зданиям и сооружениям; автор выдающихся объектов, среди которых Останкинская телевизионная башня, дворцы спорта в Москве, Архангельске, Твери и Сочи; Музей Хо Ши Мина в Ханое, «Москва-парк» в Астане, а также уникальные проекты ММДЦ «Москва-Сити» и «Лахта-центр» в Санкт-Петербурге, открывшие новую страницу в истории российского высотного строительства.

В настоящее время Владимир Ильич ведет активную научно-творческую деятельность по подготовке аспирантов и докторантов в ряде вузов страны, за последние годы под его руководством защищены ряд докторских и кандидатских диссертаций. Лекции, которые читает В.И. Травуш в вузах, вызывают огромный интерес не только у студентов, аспирантов и преподавателей, но и у широкой инженерной общественности. Владимир Ильич Травуш обладает колоссальной работоспособностью, большим авторитетом, коммуникабельностью, уникальным умением достигать цели в решении задач архитектурно-строительной отрасли.



К 85-летию Николая Ивановича КАРПЕНКО

21 мая 2021 г. исполнилось 85 лет одному из ведущих ученых России, заведующему лабораторией «Проблемы прочности и качества в строительстве» НИИСФ РААСН, академику РААСН, профессору, доктору технических наук, дважды лауреату премии Правительства РФ в области науки и техники, кавалеру ордена Дружбы, заслуженному деятелю науки РФ, почетному строителю Москвы, заслуженному строителю РФ Николаю Ивановичу Карпенко.

За свою трудовую деятельность он подготовил 30 кандидатов и 10 докторов технических наук. Опубликовал более 200 научных статей и 3 монографии.

Карпенко Н.И. является признанным специалистом в области механики железобетона. Занимается теорией расчета зданий и сооружений из монолитного железобетона с учетом физической нелинейности и трещинообразования при различных напряженных состояниях; общими критериями разрушения и моделями деформирования бетона и железобетона; компьютерными методами расчета и проектирования; разработкой нормативных документов по расчету и проектированию статически неопределимых железобетонных конструкций; диагностикой состояния зданий для реконструкции; научным сопровождением строительства крупных объектов; прочностной экспертизой проектов.

В течение последних лет направление деятельности Николая Ивановича и его учеников сконцентрировано на решении широкого диапазона научно-практических проблем. Им разработан новый метод диаграммного расчета зданий из монолитного железобетона с учетом различных факторов физической нелинейности и трещинообразования в зависимости от возраста бетона и его класса, который вошел в Свод правил СП 63.13330.2012 «Бетоны и железобетонные конструкции. Общие положения».

Сегодня Николай Иванович Карпенко продолжает активную научную деятельность и является примером для коллег, аспирантов и студентов.

Редакция журнала «Строительные материалы»[®] и коллектив НИИСФ РААСН сердечно поздравляют Владимира Ильича Травуша и Николая Ивановича Карпенко с юбилеем и желают крепкого здоровья, больших творческих и научных успехов на благо российской науки!

УДК 666.982

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-48-56>

Н.И. КАРПЕНКО¹, д-р техн. наук, профессор (niisf_lab9@mail.ru);
Вл.И. КОЛЧУНОВ^{1,2}, д-р техн. наук, профессор (vlik52@mail.ru),
В.И. КОЛЧУНОВ^{1,2}, д-р техн. наук, профессор (asiorel@mail.ru);
В.И. ТРАВУШ¹, д-р техн. наук, профессор (travush@mail.ru);
А.И. ДЕМЬЯНОВ², канд. техн. наук (speccompany@gmail.com)

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

² Юго-Западный государственный университет (305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94)

Деформирование железобетонных конструкций при изгибе с кручением

Предложена расчетная модель деформирования, трещиностойкости и прочности сложноподвижных железобетонных стержневых конструкций при совместном действии изгибающих и крутящих моментов, нормальных и поперечных сил. До настоящего времени расчет железобетонных конструкций при таком напряженном состоянии в отечественной и зарубежной практике производится с использованием весьма условных физических и расчетных моделей. Достаточно отметить, что в США, ряде европейских и других стран до настоящего времени при расчете таких сложноподвижных конструкций используется модель ферменной аналогии. В статье приведено решение задачи по созданию расчетной модели железобетонного элемента коробчатого сечения при совместном действии изгибающих и крутящих моментов, нормальных и поперечных сил в стадии после образования трещин, наиболее полно учитывающей специфику трещинообразования, деформирования и разрушения таких элементов. При этом действие крутящего момента и поперечной силы сводится к действию потока касательных сил по контуру коробчатого сечения конструкции.

Ключевые слова: железобетон, расчетная модель, деформирование, сложное сопротивление, кручение с изгибом, трещины.

Для цитирования: Карпенко Н.И., Колчунов Вл.И., Колчунов В.И., Травуш В.И., Демьянов А.И. Деформирование железобетонных конструкций при изгибе с кручением // *Строительные материалы*. 2021. № 6. С. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-48-56>

N.I. KARPENKO¹, Doctor of Sciences (Engineering), Professor (niisf_lab9@mail.ru);
V.I. KOLCHUNOV^{1,2}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, (vlik52@mail.ru),
V.I. KOLCHUNOV^{1,2}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor (asiorel@mail.ru);
V.I. TRAVUSH¹, Doctor of Sciences (Engineering), Professor (travush@mail.ru);
A.I. DEM'YANOV², Candidate of Sciences (Engineering) (speccompany@gmail.com)

¹ Research Institute of Building Physics, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivnyi Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

² Southwest State University (94, 50 let Oktyabrya Street, Kursk, 305040, Russian Federation)

Deformation of Reinforced Concrete Structures During Bending with Torsion

A computational model of deformation, crack resistance, and strength of complexly stressed reinforced concrete rod structures under the combined action of bending and torsional torques, normal and transverse forces is proposed. Until now, in the design practice, the calculation of reinforced concrete structures under such a stressed state in domestic and foreign practice is carried out using very conditional physical and computational models. It is enough to note that in the United States, a number of European and other countries, the truss analogy model is still used in the calculation of such complex structures. The article presents a solution to the problem of creating a design model of a reinforced concrete element of box section under the combined action of bending and torque moments, normal and transverse forces in the stage after the formation of cracks, which most fully takes into account the specifics of crack formation, deformation and destruction of such elements. In this case, the action of the torque and the transverse force is reduced to the action of the flow of tangential forces along the contour of the box section of the structure.

Keywords: reinforced concrete, design model, deformation, complex resistance, torsion with bending, cracks.

For citation: Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kolchunov V.I., Travush V.I., Dem'yanov A.I. Deformation of reinforced concrete structures during bending with torsion. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 6, pp. 48–56. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-48-56>

Несмотря на достаточно широкое распространение в практике проектирования и строительства железобетонных конструкций, испытывающих сложное напряженное состояние, и в частности кручение с изгибом, методы расчета жесткости трещиностойкости и прочности таких конструкций в научных публикациях российских и зарубежных авторов [1–8] и действующих нормативных документах СП 63.13330.2018 остаются недостаточно строгими. В то же время кон-

струкции, испытывающие такое напряженное состояние, часто применяются в ответственных конструктивных системах, например в ядрах жесткости высотных зданий, обвязочных ригелях наружного контура зданий, ригелях дисков перекрытий и др.; и надежность при их проектировании во многом определяется качеством применяемых расчетных моделей.

В настоящее время в исследованиях сложного сопротивления железобетонных конструкций все шире

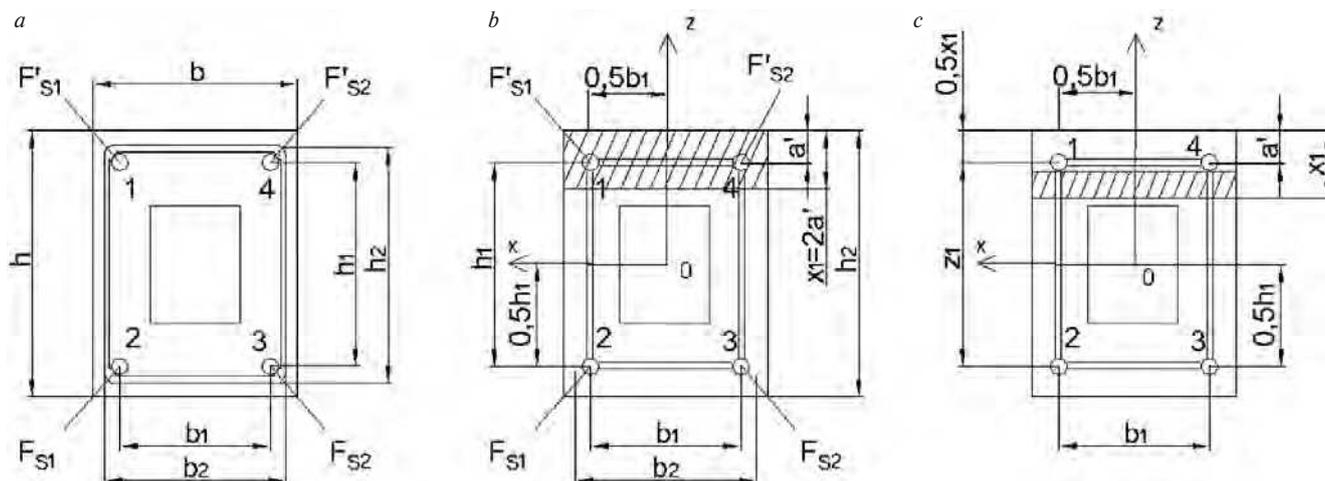


Рис. 1. Схема поперечного коробчатого сечения: а – с выделением расчетных контуров 1–2–3–4; б – по частной схеме; с – по общей схеме
 Fig. 1. The scheme of the cross box section: a – with the allocation of the calculated contours 1–2–3–4; b – according to the private scheme; c – according to the general scheme

применяются численные методы и конечно-элементные модели [1, 9, 10]. Они позволяют получить приемлемые решения при расчете в линейно-упругой постановке, а также в нелинейной постановке при использовании приведенных физико-механических и жесткостных характеристик.

В то же время, как показывают данные экспериментальных исследований [11–16] и результаты анализа [9, 10, 17], для расчета сложнапряженных железобетонных конструкций необходимо использование более совершенных физических моделей процесса деформирования и трещинообразования и совершенствование самих расчетных схем путем учета ряда новых эффектов деформирования железобетона с трещинами.

Поэтому в рассматриваемой работе с использованием общей методологии решения задач жесткости, трещиностойкости и прочности железобетона [17, 18, 19, 20] приведено построение компактной и достаточно общей расчетной модели сложнапряженного железобетонного элемента коробчатого или сплошного сечения, испытывающего совместное действие изгибающих и крутящих моментов, нормальных и поперечных сил в стадии после образования пространственных трещин, с учетом пространственного характера трещин, класса бетона, напряженного состояния в продольных и поперечных стержнях, а также в бетоне сжатой зоны.

Расчетная модель

сложнапряженного железобетонного элемента

Схема поперечного сечения коробчатого элемента.

Поперечное сечение коробчатого элемента сечением $h \times b$ представлено на рис. 1, а. Сечение армировано двумя стержнями продольной арматуры в растянутой зоне общей площадью $2F_s$ и в сжатой зоне общей площадью $2F'_s$. Расстояние между стержнями h_1 и b_1 (рис. 1, б). Поперечную арматуру окаймляют замкнутые хомуты с площадью стержней F_{sw} и шагом U_{sw0} ; h_2 и b_2 – размеры хомутов. В расчетной модели хому-

ты переносятся на уровень продольной арматуры (рис. 1, б) с уменьшенным шагом U_{sw} , где:

$$U_{sw} = U_{sw0} \frac{(b_1 + h_1)}{(b_2 + h_2)}. \quad (1)$$

Погонная площадь хомутов составит:

$$f_{sw} = F_{sw} / U_w = F_{sw} \frac{(b_2 + h_2)}{(b_1 + h_1) U_{sw0}}. \quad (2)$$

На рис. 1, б, с представлены два случая. В первом случае высота сжатой зоны:

$$X_T = 2a',$$

где a' – расстояние от верхней поверхности сечения до центра тяжести арматуры сжатой зоны. При этом высота сечения равна h_1 .

Во втором случае $X_T > 2a'$, при этом высота сечения равна Z_1 .

Как более общий рассмотрим второй случай при определении потоков касательных сил. Переход к первому случаю осуществляется заменой Z_1 на h_1 .

Выделим из коробчатого сечения пространственный расчетный коробчатый элемент размером $b_1 \times Z_1$ (рис. 1, с), где Z_1 – расстояние от растянутой арматуры $2F_s$ до центра тяжести бетона сжатой зоны:

$$Z_1 = h_1 + a' - 0,5X_T. \quad (3)$$

При этом в запас прочности арматура сжатой зоны переносится на новую линию 1–4 (рис. 1, с).

Также несколько уточняется погонная площадь арматуры:

$$f_{sw} = F_{sw} \frac{(b_1 + h_1)}{(b_1 + Z_1) U_{sw0}}. \quad (4)$$

Действие крутящего момента сводится к действию потока касательных сил N_{yx} и N_{yz} по контуру 1–2–3–4 в общем случае (рис. 2):

$$N_{yx} = N_{yz} = \frac{T}{2b_1 \cdot Z_1}. \quad (5)$$

Далее рассматривается общий случай. В частном случае во всех формулах Z_1 заменяется на h_1 .

Действие поперечных сил сводится потоком N_Q (рис. 2, с), в общем случае (рис. 2, д):

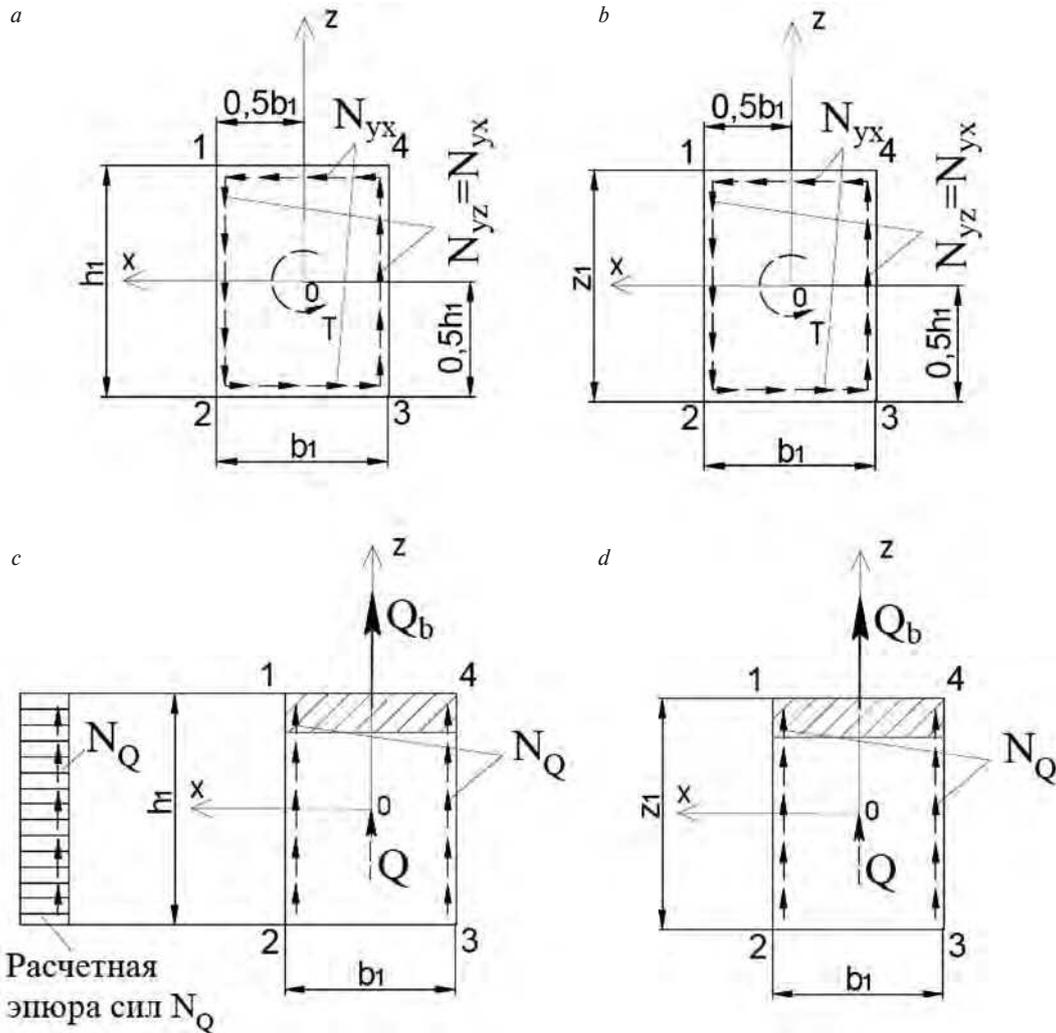


Рис. 2. Схема потоков касательных сил N_{yx} , N_{yz} от действия крутящего момента (a, b) и от действия поперечной силы (c, d) по расчетным контурам 1–2–3–4 по частной схеме (a, c); по общей схеме (b, d).
Fig. 2. Diagram of the flow of tangential forces from the action of the torque (a, b) and from the action of the transverse force (c, d) according to the calculated contours 1–2–3–4 according to the private scheme (a, c); according to the general scheme (b, d)

$$N_Q = \frac{Q - Q_b}{2Z_1}, \quad (6)$$

где Q_b – поперечная сила, воспринимаемая бетоном сжатой зоны. Если влиянием Q_b можно пренебречь, тогда потоки N_Q соответственно составят:

$$N_Q = \frac{Q}{2Z_1}. \quad (7)$$

Общий поток касательных сил по линии 1–2 составит:

$$N_{yz(1)} = \frac{T}{2b_1 \cdot Z_1} - \frac{(Q - Q_b)}{2Z_1}. \quad (8)$$

Аналогичный поток касательных сил по линии 3–4 будет равен:

$$N_{yz(2)} = \frac{T}{2b_1 \cdot Z_1} + \frac{(Q - Q_b)}{2Z_1}. \quad (9)$$

Расчетная схема коробчатого элемента

В дальнейших построениях необходимо выделять два случая.

- В случае 1 $N_{yz} > N_Q$, $N_{yz(1)} > 0$.
- В случае 2 $N_{yz} < N_Q$, $N_{yz(1)} < 0$.

Рассмотрим первый случай. Расчетная схема коробчатого элемента для этого случая представлена на рис. 3. С левой стороны расчетная схема ограничена расчетным прямоугольным контуром 1–2–3–4. К прямоугольному контуру с центром в точке 0 приложены: M – изгибающий момент; N – нормальная сила; T – крутящий момент; Q – поперечная сила. Действие крутящего момента T и поперечной силы Q на контур элемента 1–2–3–4 представляется в виде потоков N_{yz} , N_Q , N_{yx} , которые приведены на рис. 3. Общие потоки $N_{yz(1)}$, $N_{yz(2)}$ представлены формулами (8), (9).

С левой стороны контур ограничен линиями 7–11; 11–8; 8–12; 12–3; 3–13; 13–7. Расчетная схема приобретает компактную форму в связи с принятием $\alpha_3 = \alpha_s$.

Для представленного расчетного сечения, используя условия статики, определяются усилия \bar{N}_b и напряжения в бетоне сжатой зоны; угол наклона линии сжатой зоны 7–13 к линии 7–10, параллельной оси x (α_c), и напряжения в хомутах:

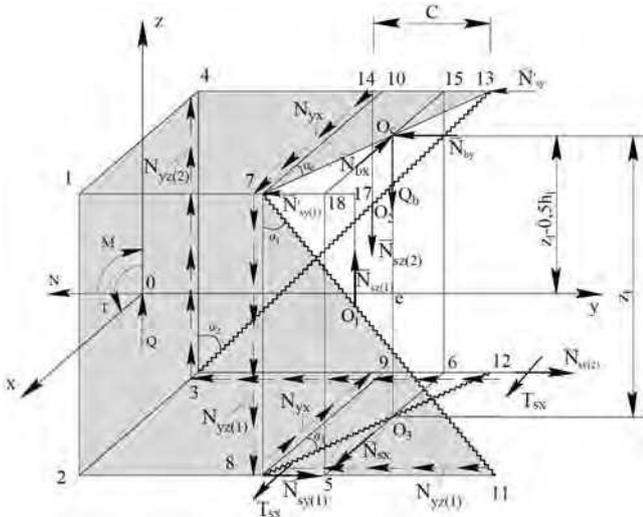


Рис. 3. Расчетная схема железобетонного элемента при действии крутящих и изгибающих моментов, поперечных и нормальных сил
Fig. 3. Design scheme of a reinforced concrete element under the action of torque and bending moments, transverse and normal forces

$$\bar{N}_b = \bar{N}_{by} \cos \alpha_c + \bar{N}_{bx} \sin \alpha_c; \quad (10)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_c = \frac{\bar{N}_{bx}}{\bar{N}_{by}}. \quad (11)$$

Главные напряжения в бетоне сжатой зоны при прямоугольной эпюре будут равны:

$$\sigma'_b = -\frac{\bar{N}_b}{F_c}, \quad (12)$$

где F_c – площадь бетона сжатой зоны, которая определяется с учетом всего сечения элемента:

$$F_c = X_1 b / \cos \alpha_c. \quad (13)$$

Наклонные линии 7–11 и 3–13 проходят по наклонным трещинам; $\bar{N}_{sz(1)}$ и $\bar{N}_{sz(2)}$ – общие усилия, приложенные к хомутам, которые пересекают наклонные трещины. Эти усилия определяются через потоки (8) и (9) касательных сил $N_{yz(1)}$ и $N_{yz(2)}$, приложенных к линиям 7–8 и 3–4, в результате:

$$\left. \begin{aligned} \bar{N}_{sz(1)} &= N_{yz(1)} Z_1 = \frac{T Z_1}{2 b_1} - \frac{(Q - Q_b)}{2} \\ \bar{N}_{sz(2)} &= N_{yz(2)} Z_1 = \frac{T Z_1}{2 b_1} + \frac{(Q - Q_b)}{2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Усилия $\bar{N}_{sz(1)}$ и $\bar{N}_{sz(2)}$ также выражаются через напряжения (соответственно $\sigma_{sz(1)}$ и $\sigma_{sz(2)}$) в вертикальных хомутах на основании зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{sz(1)} f_{sw} l_{8-11} &= \sigma_{sz(1)} f_{sw} Z_1 \operatorname{tg} \alpha_1 = \bar{N}_{sz(1)}, \\ \sigma_{sz(2)} f_{sw} l_{4-13} &= \sigma_{sz(2)} f_{sw} Z_1 \operatorname{tg} \alpha_2 = \bar{N}_{sz(2)}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Из этих соотношений, учитывая (14), можно определить напряжения в вертикальных стержнях поперечной арматуры:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{sz(1)} &= \frac{T}{2 b_1 \cdot Z_1 f_{sw} \operatorname{tg} \alpha_1} - \frac{(Q - Q_b)}{2 f_{sw} Z_1 \operatorname{tg} \alpha_1}, \\ \sigma_{sz(2)} &= \frac{T}{2 b_1 \cdot Z_1 f_{sw} \operatorname{tg} \alpha_2} + \frac{(Q - Q_b)}{2 f_{sw} Z_1 \operatorname{tg} \alpha_2} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Общее усилие \bar{N}_{sx} в хомутах, пересекающих наклонную трещину 8–12, совместно с нагельными силами, приложенными к продольной арматуре, составит:

$$\bar{N}_{sx} + 2 T_{sx} = N_{yx} l_{8-9} = N_{yx} b_1. \quad (17)$$

При этом нагельные усилия в хомутах не учитываются. Учитываются только нагельные усилия T_{sx} в продольной арматуре. Следуя [19], влияние начальных усилий можно учесть при помощи коэффициента λ_x . При этом:

$$\bar{N}_{sx} = N_{yx1} b_1 - 2 T_{sx} \approx N_{yx} b_1 \lambda_x, \quad (18)$$

где

$$\frac{1}{\lambda_x} = \frac{15 f_{sw}}{15 f_{sw} + f_{sy} \operatorname{ctg}^2 \alpha}; \quad (19)$$

$$f_{sy} = \frac{2 F_{sy}}{b_1}. \quad (20)$$

Усилие \bar{N}_{sx} можно выразить через напряжения σ_{sx} в нижних хомутах:

$$\bar{N}_{sx} = N_{yx} b_1 \lambda_x = \sigma_{sx} f_{sw} l_{9-10} = \sigma_{sx} f_{sw} b_1 \operatorname{tg} \alpha_3, \quad (21)$$

откуда:

$$\sigma_{sx} = \frac{N_{yx} \lambda_x}{f_{sw} \operatorname{tg} \alpha_3} = T \frac{\lambda_x}{2 b_1 \cdot Z_1 f_{sw} \operatorname{tg} \alpha_3}, \quad (22)$$

Определение усилий \bar{N}_{bx} и \bar{N}_{by} в бетоне сжатой зоны и напряжения в хомутах. Проекция всех усилий, приложенных к правому расчетному криволинейному контуру на ось x , приводит к зависимости:

$$\bar{N}_{bx} - \bar{N}_{sx} + 2 T_{sx} = \bar{N}_{bx} - N_{yx} b_1 = 0.$$

Откуда, учитывая (4):

$$\bar{N}_{bx} = N_{yx} b_1 = \frac{T}{2 Z_1}. \quad (23)$$

Сумма моментов всех усилий, действующих параллельно плоскости ZOY относительно нижней линии, параллельной b_1 и проходящей через нижнюю точку O_3 , составит:

$$\bar{N}_{by} \cdot Z_1 + \bar{N}_{sz(1)} l_{18-17} + \bar{N}_{sz(2)} l_{14-15} - (M + Q \cdot l_{0-e}) + 0,5 h_1 N = 0, \quad (24)$$

где $M + Q \cdot l_{0-e} = M_e$; M_e – момент в точке e на линии y (рис. 3).

Из рис. 1 следует:

$$\left. \begin{aligned} l_{18-17} &= 0,5 Z_1 \operatorname{tg} \alpha_1 - 0,5 b_1 \operatorname{tg} \alpha_c \\ l_{14-15} &= 0,5 Z_1 \operatorname{tg} \alpha_2 - 0,5 b_1 \operatorname{tg} \alpha_c \\ l_{19-0c} &= Z_1 \operatorname{tg} \alpha_2 - 0,5 b_1 \operatorname{tg} \alpha_c \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

С учетом этих значений из (24), (25) и учитывая (14), получим:

$$\begin{aligned} \bar{N}_{by} &= \frac{M_e - 0,5 h_1 N}{Z_1} - \left(\frac{T}{4 b_1 \cdot Z_1} - \frac{(Q - Q_b)}{4 Z_1} \right) (Z_1 \operatorname{tg} \alpha_1 - b_1 \operatorname{tg} \alpha_c) - \\ &\quad - \left(\frac{T}{4 (b_1 + Z_1)} + \frac{(Q - Q_b)}{4 Z_1} \right) (Z_1 \operatorname{tg} \alpha_2 - b_1 \operatorname{tg} \alpha_c). \end{aligned} \quad (26)$$

Определение угла α_c наклона главной линии 7–13 бетона сжатой зоны. Определив \bar{N}_{by} , можно по форму-

лам (10)–(12) перейти к определению значения α_c и главных напряжений σ_{b1} в бетоне сжатой зоны.

Внося в зависимость (11) значения \bar{N}_{bx} и \bar{N}_{by} , определяемых по формулам (23) и (26), приходим к квадратному уравнению по определению $\text{tg } \alpha_c$:

$$\left[\begin{aligned} & \left(\frac{\bar{M} - 0,5h_1N}{Z_1} \text{tg } \alpha_c - \left(\frac{T}{4b_1 \cdot Z_1} - \frac{Q - Q_b}{4Z_1} \right) Z_1 \text{tg } \alpha_1 \text{tg } \alpha_c + \right. \\ & \left. + \left(\frac{T}{4b_1 \cdot Z_1} - \frac{Q - Q_b}{4Z_1} \right) b_1 (\text{tg } \alpha_c)^2 - \left(\frac{T}{4b_1 \cdot Z_1} + \frac{Q}{4Z_1} \right) Z_1 \text{tg } \alpha_2 \text{tg } \alpha_c - \right. \\ & \left. - \left(\frac{T}{4b_1 \cdot Z_1} + \frac{Q - Q_b}{4Z_1} \right) b_1 (\text{tg } \alpha_c)^2 - \frac{T}{2Z_1} = 0 \right] \end{aligned} \quad (27)$$

Таким образом, угол α_c определяется из решения квадратного уравнения (28) относительно неизвестного $\text{tg } \alpha_c$. В первом приближении в зависимостях (26), (27) можно принимать $\alpha_2 = 45^\circ$:

$$\alpha_1 \approx \alpha_2 N_{yz(1)} / N_{yz(2)}. \quad (28)$$

В предельной стадии главные напряжения в сжатой зоне $\sigma'_b = R_b$, в результате предельная высота $X_T = \hat{X}_T$ с учетом влияния сжатой арматуры будет равна:

$$\hat{X}_T = \frac{(\bar{N}_b - 2F'_s R_{sc}) \cos \alpha_c}{R_b b}. \quad (29)$$

Определение высоты сжатой зоны X_T и значения Z_1

Для определения X_T и Z_1 в эксплуатационной стадии с некоторым приближением может быть использована формула СНиП 2-03.01-84*. Для этого необходимо дополнительно определить геометрические характеристики сечения h'_0 , h'_f , приведенный момент и приведенную продольную силу.

В практических расчетах в зависимостях для приведенного момента и продольной силы допускается принимать $Z_1 = h_1$.

Значение поперечной силы, воспринимаемой бетоном сжатой зоны, с некоторым приближением можно определить по известной формуле:

$$Q_b \approx \frac{\Phi_{b2} R_{bt} b h_0^2}{C} \cdot \beta_Q \quad (30)$$

с ограничениями:

$$0,5 R_{bt} b h_0 < \frac{\Phi_{b2} R_{bt} b h_0^2}{C} \leq 2,5 \cdot R_{bt} b h_0,$$

где Φ_{b2} – коэффициент, принимаемый равным 1,5;

$$\beta_Q \approx \sqrt{|\sigma_{b1} / R_b|}, \quad |\sigma_{b1} / R_b| \leq 1.$$

Коэффициент β_Q еще требует уточнения.

Определение усилий $\bar{N}_{sy(1)}$, $\bar{N}_{sy(2)}$ и напряжений в стержнях растянутой арматуры. Проецируя все силы, приложенные к расчетному элементу (рис. 4) вдоль оси u на горизонтальную плоскость, приходим без непосредственного учета сил $N'_{sx(1)}$ и $N'_{sy(2)}$ в арматуре сжатой зоны к зависимости:

$$\bar{N}_{sy(1)} + \bar{N}_{sy(2)} = \bar{N}_{by} + N_{yx} Z_1 \text{tg } \alpha_2 + N_{yz(1)} Z_1 \text{tg } \alpha_2 + N. \quad (31)$$

Вращение сил вокруг оси $O_c - O_3$ в плоскости yz также без непосредственного учета сил $N'_{sx(1)}$ и $N'_{sy(2)}$ приводит к уравнению:

$$\bar{N}_{sy(2)} - \bar{N}_{sy(1)} = N_{yx} Z_1 \text{tg } \alpha_2 - N_{yz(1)} Z_1 \text{tg } \alpha_1, \quad (32)$$

а совместное решение уравнений (31), (32) относительно $\bar{N}_{sx(1)}$ и \bar{N}_{sy} приводит к зависимостям:

$$\left. \begin{aligned} \bar{N}_{sy(1)} &= 0,5 \bar{N}_{by} + N_{yz(1)} Z_1 \text{tg } \alpha_1 + 0,5 N; \\ \bar{N}_{sy(2)} &= 0,5 \bar{N}_{by} + N_{yx} Z_1 \text{tg } \alpha_2 + 0,5 N. \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Согласно зависимостям (33) напряжения растяжения в нижних продольных стержнях арматуры будут несколько различаться. Они выравниваются в областях, где поперечная сила равна нулю.

Напряжения в стержнях нижней арматуры будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{sy(1)} &= \frac{\bar{N}_{sy(1)}}{F_{sy(1)}} = \frac{0,5 \bar{N}_{by} + N_{yz(1)} Z_1 \text{tg } \alpha_1 + 0,5 N}{F_{sy(1)}} \\ \sigma_{sy(2)} &= \frac{\bar{N}_{sy(2)}}{F_{sy(2)}} = \frac{0,5 \bar{N}_{by} + N_{yx} Z_1 \text{tg } \alpha_2 + 0,5 N}{F_{sy(2)}} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Определение деформаций в нижней зоне элемента (условно в зоне 2–3)

Относительные деформации в стержнях 1 и 2 нижней продольной арматуры определяются по зависимостям:

$$\varepsilon_{sy(1)} = \frac{\sigma_{sy(1)} \Psi_{sy(1)}}{E_s}; \quad \varepsilon_{sy(2)} = \frac{\sigma_{sy(2)} \Psi_{sy(2)}}{E_s}, \quad (35)$$

где $\Psi_{sy(1)}$, $\Psi_{sy(2)}$ – коэффициенты, учитывающие влияние сцепления арматуры с бетоном на участках между трещинами (коэффициенты Мурашева).

Средние деформации арматуры и нижних стержней хомутов соответственно равны:

$$\varepsilon_{sy} = \frac{\varepsilon_{sy(1)} + \varepsilon_{sy(2)}}{2}; \quad (36)$$

$$\varepsilon_{sx} = \frac{\sigma_{sx}}{E_s}. \quad (37)$$

После появления трещин напряжения σ_{bt} и деформации ε_{bt} полос бетона вдоль трещин согласно [18] в основном будут зависеть от касательных напряжений τ_{yx} :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{bt} &\approx -2\tau_{yx} \sin \alpha_3 \cos \alpha_3 \\ \varepsilon_{bt} &\approx \frac{\sigma_{bt}}{E_{II} v_{nx}} = -\frac{2\tau_{yx} \sin \alpha_3 \cos \alpha_3}{E_{II} v_{nx}} \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

где E_{II} – модуль деформации полос бетона:

$$E_{II} = E_b \beta_{II} \approx 0,8 E_b; \quad (39)$$

$\beta_{II} \approx 0,8$ – коэффициент влияния разрыхления полос бетона трещинами на модуль; v_{nx} – коэффициент, учитывающий влияние пластических деформаций полос бетона в процессе увеличения напряжений ε_{bt} .

Касательные напряжения определяются в функции от погонных касательных усилий N_{yx} :

$$\tau_{yx} \approx \frac{N_{yx}}{2a\beta_{xy}}; \quad \sigma_{bt} = -\frac{2N_{yx} \sin \alpha_3 \cos \alpha_3}{2a\beta_{xy}}, \quad (40)$$

где a – толщина защитного слоя нижней арматуры; β_{xy} – коэффициент влияния остальных слоев бетона на значение τ_{yx} ; знак минус означает, что полосы сжимаются.

С учетом (39), (40):

$$\varepsilon_{bt} = -\frac{2N_{yx} \sin \alpha_3 \cos \alpha_3}{2a \beta_{xy} E_b \beta_{\Pi} \nu_{\Pi x}} = -\frac{2N_{yx} \sin \alpha_3 \cos \alpha_3}{2a E_b \tilde{\nu}_{\Pi x}}, \quad (41)$$

где

$$\tilde{\nu}_{\Pi x} = \beta_{\Pi} \nu_{\Pi x} \beta_{xy}. \quad (42)$$

Коэффициент $\tilde{\nu}_{\Pi x}$ определяется экспериментальным путем.

Следуя [18] и учитывая (41), угол сдвига в нижней зоне 2–3 будет равен:

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} &= \varepsilon_{sx} \operatorname{ctg} \alpha_3 + \varepsilon_{sy} \operatorname{tg} \alpha_3 - \varepsilon_{bt} / \sin \alpha_3 \cos \alpha_3 = \\ &= \frac{\sigma_{sx} \Psi_{sx}}{E_s} \operatorname{ctg} \alpha_3 + \frac{\sigma_{sy} \Psi_{sy}}{E_s} \operatorname{tg} \alpha_3 + \frac{2N_{yx}}{2a E_b \tilde{\nu}_{\Pi x}}, \end{aligned} \quad (43)$$

где E_s – модуль деформации арматуры в пластической стадии деформирования арматуры; везде E_s заменяется на $E_s \nu_s$, где ν_s – коэффициент секущего модуля, определяемый по зависимостям [18, 21].

Определение деформаций в верхней сжатой зоне бетона. Деформации бетона сжатой зоны определяют по зависимости:

$$\varepsilon'_b = \frac{\sigma'_b}{E_b \nu'_b} = \frac{N'_b}{F_c E_b \nu'_b}, \quad (44)$$

где F_c – площадь бетона наклонной сжатой зоны, определяемая по формуле (13); ν'_b – коэффициент развития пластических деформаций в бетоне сжатой зоны. Следуя [18, 21], коэффициент ν'_b определяем по формуле:

$$\nu'_b = \hat{\nu}'_b \pm (\nu_0 - \hat{\nu}'_b) \sqrt{1 - \omega \eta' - (1 - \omega)(\eta')^2}, \quad (45)$$

(для восходящей ветви диаграммы принимается знак $< + >$, а для нисходящей – знак $< - >$), где η' – уровень главных напряжений в бетоне (положительная величина):

$$\eta' = \frac{\sigma'_b}{\hat{\sigma}'_b}, \quad (46)$$

где текущие главные напряжения σ'_b определяются по формуле (12); $\hat{\sigma}'_b$ – напряжения в вершине диаграммы ($\hat{\sigma}'_b = -R_{b,ser}$); $\hat{\nu}'_b$ – коэффициент изменения секущего модуля в вершине диаграммы (положительная величина):

$$\hat{\nu}'_b = \frac{\hat{\sigma}'_b}{E_b \hat{\varepsilon}'_b}; \quad (47)$$

$$\hat{\varepsilon}'_b = -\frac{B}{E_b} \lambda \frac{1 + \left(0,8 - 0,15 \frac{B^2}{10000} \lambda B / 60 + 0,2 \lambda / B\right)}{0,12 + 1,03 B / 60}, \quad (48)$$

где B – класс бетона, соответствующий $R_{b,ser}$; λ – безразмерный коэффициент, зависящий от вида бетона (для тяжелого и мелкозернистого бетона $\lambda=1$); ν_b – начальный коэффициент изменения секущего модуля; ω – коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы деформирования бетона, для восходящей ветви диаграммы в зависимости (48):

$$\nu_0 = 1; \quad \omega = 2 - 2,5 \hat{\nu}'_{b1} \quad (49)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$\nu_0 = 2,05 \hat{\nu}'_b; \quad \omega = 1,95 \hat{\nu}'_b - 0,138. \quad (50)$$

Представленные выше формулы относятся к случаю сжатия верхней зоны бетона (зоны 1–4) при $\sigma'_b < 0$. В случае если главные напряжения являются растягивающими ($\sigma'_b = \sigma'_{bt} > 0$), но трещины еще не появились, диаграмму растяжения бетона ($\varepsilon'_{bt} - \hat{\sigma}'_{bt}$) рекомендуется принимать по формулам (44)–(50), где $\varepsilon'_b, \hat{\varepsilon}'_b, \sigma'_b, \hat{\sigma}'_b, \nu'_b, \hat{\nu}'_b, \eta'$ заменяются соответственно на $\varepsilon'_{bt}, \hat{\varepsilon}'_{bt}, \sigma'_{bt}, \hat{\sigma}'_{bt}, \nu'_{bt}, \hat{\nu}'_{bt}, \eta'_{bt}$:

$$\eta'_{bt} = \sigma'_{bt} / \hat{\sigma}'_{bt}, \quad (51)$$

где $\hat{\sigma}'_{bt}, \hat{\varepsilon}'_{bt}$ – напряжения и относительные деформации в вершине диаграммы растяжения, для нормативной диаграммы:

$$\hat{\sigma}'_{bt} = R_{bt,ser} \gamma_{btq}; \quad \hat{\varepsilon}'_{bt} = \frac{\hat{\sigma}'_{bt}}{E_b \hat{\nu}'_{bt}}, \quad (52)$$

где

$$\hat{\nu}'_{bt} = (0,55 + 0,15 R_{bt,ser} / R_{0bt}) / \tilde{\gamma}_{btq}, \quad (53)$$

где $R_{bt} = 2,5$ МПа; γ_{btq} – коэффициент, учитывающий влияние градиентов деформаций на трещиностойкость:

$$\tilde{\gamma}_{btq} = (\tilde{\gamma}_b + 0,007), \quad (54)$$

где $0,9 \leq \tilde{\gamma}_b \leq 2 - \sqrt{h/h_3}$; $h_3 = 0,3$ м – некоторая эталонная высота (значения $\tilde{\gamma}_{btq}$ определялись для изгибаемых элементов; для изгиба с кручением в будущем, возможно, потребуется уточнение $\tilde{\gamma}_{btq}$).

Нормальные σ'_{by} и касательные τ'_{xy} напряжения в бетоне сжатой зоны, действующие нормально и вдали линии 7–10 (рис. 3), будут равны:

$$\sigma'_{by} = -\frac{(\bar{N}_{by} - N_{yc} b_1 \operatorname{tg} \alpha_c)}{F'_{cy}} = -\frac{\bar{N}_{by} - N_{yx} b \operatorname{tg} \alpha_c}{X_T b}; \quad \tau'_{xy} = \frac{N_{yx}}{X_T}. \quad (55)$$

Соответственно нормальные и сдвиговые относительные деформации составят:

$$\varepsilon'_{by} = \frac{\sigma'_{by}}{E_b \nu'_b} = -\frac{(\bar{N}_{by} - N_{yx} b_1 \operatorname{tg} \alpha_c)}{X_T b E_b \nu'_b}; \quad \gamma'_{xy} = -\frac{2N_{yx}(1 + \mu'_b)}{X_T E_b \nu'_b}, \quad (56)$$

где μ'_b – коэффициент поперечных деформаций бетона:

$$\mu'_b = \hat{\mu}'_b + (\mu_b - \hat{\mu}'_b) \sqrt{1 - \eta'}, \quad (57)$$

μ_b – начальный коэффициент поперечных деформаций бетона ($\mu_b \approx 0,175$); $\hat{\mu}'_b$ – коэффициент, соответствующий вершине диаграммы:

$$\hat{\mu}'_b = \mu_b + (1 - \sqrt[3]{\hat{\nu}'_b}); \quad (58)$$

\bar{N}_{by} определяется по формуле (26), а N_{yx} – по формуле (5).

Кривизна элемента и относительные деформации ε_{0y} на уровне оси y . Определив по формуле (36) ε_{sy} , а по формуле (56) ε'_{by} , можно определить кривизну элемента и относительные деформации ε_{0y} :

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\rho_y} &= \frac{\varepsilon_{sy} - \varepsilon'_{by}}{Z_1} \\ \varepsilon_{0y} &= \frac{\varepsilon_{sy}(Z_1 - 0,5h_1) + 0,5\varepsilon'_{by}h_1}{Z_1} \end{aligned} \right\} \quad (59)$$

Выражая ε_{sy} и ε'_{by} через общие усилия M, N, T, Q на основании формул (36) и (55), придем к окончатель-

ным зависимостям для определения кривизны относительных деформаций ε_{0y} .

Углы сдвига вертикальных стенок элемента. Рассмотрим элемент 7–8–11 (рис. 3). Средние относительные деформации этого элемента вдоль оси будут равны:

$$\varepsilon_{y(1)} = \frac{\varepsilon_{sy(1)} + \varepsilon'_{by}}{2}, \quad (60)$$

где $\varepsilon_{sy(1)}$, ε_{by} определяются по формулам (35), (56).

Напряжения $\sigma_{sz(1)}$ в вертикальных стержнях хомутов согласно (15) составят:

$$\sigma_{sz(1)} = \frac{\bar{N}_{sz(1)}}{f_{sw} Z_1 \operatorname{tg} \alpha_1}. \quad (61)$$

Соответственно относительные деформации вертикальных стержней хомутов в области 7–8–9 будут равны:

$$\varepsilon_{sz(1)} = \frac{\sigma_{sz(1)} \Psi_{sz(1)}}{E_s}, \quad (62)$$

где $\Psi_{sz(1)}$, $\Psi_{sy(2)}$ – коэффициенты, учитывающие влияние сцепления арматуры с бетоном на участках между трещинами (коэффициенты Мурашева) для направления поперечной арматуры по координатам z и y .

Остаются справедливыми формулы (38)–(43), где τ_{xy} заменяется τ_{zy} , N_{yx} – на $N_{zy(1)}$, α_3 – на α_1 , в индексах x – на $Z(1)$; в результате:

$$\gamma_{yz(1)} = \varepsilon_{sz(1)} \operatorname{ctg} \alpha_1 + \varepsilon'_{by} \operatorname{tg} \alpha_1 + \frac{2N_{yz(1)}}{2aE_b \tilde{\nu}_{nyz(1)} - \tilde{\nu}_{pz(1)}}, \quad (63)$$

где по аналогии с формулой (42):

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\nu}_{pz(1)} &= \beta_{pz} \nu_{pz(1)} \beta_{yz(1)} \\ \beta_{pz} &\approx 0,8; \beta_{yz(1)} \approx \beta_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (64)$$

Используя формулы (16), получаем выражение $\gamma_{yz(1)}$ в функции от T и Q .

Рассмотрим элемент 3–4–13. Напряжения $\sigma_{sz(2)}$, деформации $\varepsilon_{z(2)}$ и углы сдвига $\gamma_{yz(2)}$ определяются по формулам (60)–(64), $\varepsilon_{y(1)}$, $\varepsilon_{sy(1)}$, $\sigma_{sz(1)}$, $\bar{N}_{sz(1)}$, α_1 , $\Psi_{sz(1)}$, $\tilde{\nu}_{pz(1)}$, β_{pz} , $\beta_{yz(1)}$ заменяются соответственно на $\varepsilon_{y(2)}$, $\varepsilon_{sy(2)}$, $\sigma_{sz(2)}$, $\bar{N}_{sz(2)}$, α_2 , $\Psi_{sz(2)}$, $\tilde{\nu}_{pz(2)}$, β_{pz} , $\beta_{yz(1)}$, в результате:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{y(2)} &= \frac{\varepsilon_{sy(2)} + \varepsilon'_{by}}{2} \\ \sigma_{sz(2)} &= \frac{\bar{N}_{sz(2)}}{f_{sw} Z_1 \operatorname{tg} \alpha_2} \\ \varepsilon_{sz(2)} &= \frac{\sigma_{sz(2)} \Psi_{sz(2)}}{E_s} \end{aligned} \right\}; \quad (65)$$

$$\gamma_{yz(2)} = \varepsilon_{sz(2)} \operatorname{ctg} \alpha_2 + \varepsilon_{y(2)} \operatorname{tg} \alpha_2 + \frac{2N_{yz(2)}}{2aE_b \tilde{\nu}_{pz(2)}}, \quad (66)$$

где:

$$\tilde{\nu}_{pz(2)} = \beta_{pz} \nu_{pz(2)} \beta_{yz(2)}, \beta_{pz} \approx 0,8; \beta_{yz(2)} \approx \beta_{xy}.$$

На основании зависимостей (16) угол сдвига $\gamma_{yz(2)}$ выражается через величины T и Q .

Угол закручивания Ψ , следуя [19, 20], определяется через значения углов сдвига: γ_{xy} – нижней поверхности согласно (43); γ'_{xy} – верхней сжатой зоны согласно (56); $\gamma_{yz(1)}$ – первой вертикальной стенки согласно (63) и $\gamma_{yz(2)}$ – второй вертикальной стенки согласно (66) по формуле:

$$\varphi = \frac{b_1(\gamma_{xy} + \gamma'_{xy}) + Z_1(\gamma_{yz(1)} + \gamma_{yz(2)})}{2b_1 Z_1}. \quad (67)$$

На основании зависимостей (5)–(9), (14), (16), (26), (34), (35) угол закручивания φ выражается в функции от M , N , Q и T .

Результаты и обсуждение

Приведенные расчетные зависимости построены таким образом, что толщина стенок элемента коробчатого сечения не ограничена и дает возможность перехода к сплошному сечению. Следует только учитывать, что в элементах сплошного сечения, согласно данным экспериментальных исследований [11, 14–16], после образования трещин часть крутящего момента T_2 может восприниматься некоторым еще сплошным ядром сечения, которое остается в элементе после трещинообразования, а часть момента T_1 воспринимается сечением с трещиной. При этом для применения полученных для коробчатого сечения зависимостей в формулах крутящий момент T заменяется на T_1 . Значение моментов T_1 , T_2 в относительных величинах может быть определено по опытным графикам «момент – угол закручивания» [11, 14–16]. В первом приближении можно использовать формулу, полученную в работе Т.П. Чистовой [22]:

$$T = T_1 + T_2; \quad T_1 = T \left[1 - 0,3 \left(\frac{T_{cr}}{T} \right)^4 \right], \quad (68)$$

где T_{cr} – крутящий момент в момент образования трещин; T – текущий момент ($T > T_{cr}$).

При этом, как показали экспериментальные исследования [11–16], при изгибе с кручением при наличии в расчетном сечении бетона сжатой зоны влиянием бетонного ядра можно пренебречь. Учитывать это влияние целесообразно только при наличии спиральных трещин, развивающихся по всему контуру [22].

Выводы

1. Предложена уточненная расчетная модель сложного сопротивления железобетонных конструкций коробчатого сечения, испытывающих совместное действие изгибающих и крутящих моментов, продольных и поперечных сил в стадии после образования пространственных трещин. Расчетная модель позволяет определять напряжения в бетоне сжатой зоны, высоту сжатого бетона, напряжения в хомутах, деформации в сжатой зоне бетона, а также в стержнях продольной и поперечной арматуры, кривизну элемента и угол его закручивания.

2. Расчетная модель позволяет учитывать все основные внешние воздействия для железобетонного стержневого элемента коробчатого и прямоугольного сечений: крутящий (T) и изгибающий (M) моменты, поперечную (Q) и продольную (N) силы. При этом действие крутящего момента и поперечной силы сводится к действию потока касательных сил по прямоугольному контуру сечения.

3. Предложенная аналитическая модель для вычисления расчетных параметров может быть использована при проектировании широкого класса железобетонных конструкций зданий и сооружений из обычного и высокопрочного бетона и фиброжелезобетона, испытывающих кручение с изгибом.

зобетонных конструкций зданий и сооружений из обычного и высокопрочного бетона и фиброжелезобетона, испытывающих кручение с изгибом.

Список литературы

References

1. Арзамасцев С.А., Родевич В.В. К расчету железобетонных элементов на изгиб с кручением // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2015. № 9. С. 99–109.
2. Касаев Д.Х. Трещиностойкость железобетонных элементов прямоугольного сечения при изгибе с кручением // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион*. 2005. № 2. С. 124–125.
3. Морозов В.И., Бахотский И.В. К расчету фиброжелезобетонных конструкций, подверженных совместному воздействию кручения с изгибом // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 5. С. 109.
4. Федоров В.С., Колчунов В.И., Покусаев А.А. Расчет расстояния между пространственными трещинами и ширины их раскрытия в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом (случай 2) // *Жилищное строительство*. 2016. № 5. С. 16–21.
5. Adheena Thomas, Afia S Hameed. An experimental study on combined flexural and torsional behaviour of RC beams. // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4. Iss. 5, pp. 1367–1370.
6. Mostofinejad D., Talaeitaba S.B. Nonlinear modeling of RC beams subjected to torsion using the smeared crack model // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 14, pp. 1447–1454.
7. Klein G., Lucier G., Rizkalla S., Zia P., Gleich H. Torsion simplified: a failure plane model for design of spandrel beams // *ACI Concrete International Journal*. 2012, pp. 1–19.
8. Ilker Kalkan, Saruhan Kartal. Torsional rigidities of reinforced concrete beams subjected to elastic lateral torsional buckling // *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 11. No. 7, pp. 969–972.
9. Булкин С.А. Кручение с изгибом сталефиброжелезобетонной балки // *Строительство и реконструкция*. 2021. С. 3–13. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-94-2-3-15.
10. Демьянов А.И., Алькади С.А. Статико-динамическое деформирование железобетонных элементов пространственной рамы при их сложном сопротивлении // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2018. № 11 (719). С. 20–33.
11. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.В. Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного и коробчатого сечений из высокопрочного бетона при кручении с изгибом // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 6. С. 32–43.
1. Arzamascev S.A., Rodevich V.V. To the calculation of reinforced concrete elements for bending with torsion. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo*. 2015. No. 9, pp. 99–109. (In Russian).
2. Kasaev D.Kh. Crack resistance of reinforced concrete elements of rectangular cross-section in bending with torsion. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavod. Severo-Kavkazskiy region*. 2005. No. 2, pp. 124–125. (In Russian).
3. Morozov V.I., Bakhotskiy I.V. To the calculation of fiber-reinforced concrete structures subject to joint action of torsion with bending. *Sovremennyye problemi nauki i obrazovaniya*. 2013. No. 5. p. 109. (In Russian).
4. Fedorov V.S., Kolchunov V.I., Pokusaev A.A. Calculation of the distance between spatial cracks and the width of their opening in reinforced concrete structures with torsion with bending (case 2). *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2016. No. 5, pp. 16–21. (In Russian).
5. Adheena Thomas, Afia S Hameed. An experimental study on combined flexural and torsional behaviour of RC beams. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4. Iss. 5, pp. 1367–1370.
6. Mostofinejad D., Talaeitaba S.B. Nonlinear modeling of RC beams subjected to torsion using the smeared crack model. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 14, pp. 1447–1454.
7. Klein G., Lucier G., Rizkalla S., Zia P., Gleich H. Torsion simplified: a failure plane model for design of spandrel beams. *ACI Concrete International Journal*. 2012, pp. 1–8.
8. Ilker Kalkan, Saruhan Kartal. Torsional rigidities of reinforced concrete beams subjected to elastic lateral torsional buckling. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 11. No. 7, pp. 969–972.
9. Bulkin S.A. Torsion with bending of a steel-fiber-reinforced concrete beam. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2021, pp. 3–13. (In Russian). DOI: 10.33979/2073-7416-2021-94-2-3-15.
10. Demyanov A.I., Alkadi S.A. Static-dynamic deformation of reinforced concrete elements of the space frame with their complex resistance. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo*. 2018. No. 11 (719), pp. 20–33. (In Russian).
11. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kapriyelov S.S., Demyanov A.I., Konorev A.V. Results of experimental studies of structures of square and box sections made of high-strength concrete in torsion with bending. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2018. No. 6, pp. 32–43. (In Russian).

12. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Булкин С.А., Московцева В.С. Результаты экспериментальных исследований сложнонапряженных балок круглого поперечного сечения из высокопрочного фиброжелезобетона // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2020. № 4. С. 290–297.
13. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.В. Основные результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций из высокопрочного бетона В100 круглого и кольцевого сечений при кручении с изгибом // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2019. № 1. С. 51–61.
14. Демьянов А.И., Сальников А.С., Колчунов В.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом и анализ их результатов // *Строительство и реконструкция*. 2017. № 4 (72). С. 17–26.
15. Демьянов А.И., Колчунов В.И., Покусаев А.А. Экспериментальные исследования деформирования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2017. № 6. С. 37–44.
16. Демьянов А.И., Наумов Н.В., Колчунов В.И. Некоторые результаты экспериментальных исследований составных железобетонных конструкций при кручении с изгибом // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 5 (79). С. 13–23.
17. Колчунов В.И., Федоров В.С. Понятийная иерархия моделей в теории сопротивления строительных конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 8. С. 16–23. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.08.16-23.
18. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 410 с.
19. Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Колчунов В.И., Травуш В.И. Расчетная модель сложнонапряженного железобетонного элемента при кручении с изгибом // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. Т. 17. № 1. С. 34–47. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-1-34-47
20. Карпенко Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами. М.: Стройиздат, 1976. 208 с.
21. Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования: Методическое пособие. М.: Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве, 2017. 197 с.
22. Чистова Т.П. Экспериментальное исследование деформаций обычных железобетонных элементов коробчатого и сплошного прямоугольного сечения при чистом кручении. Прочность и жесткость железобетонных конструкций / Под ред. С.А. Дмитриева и С.М. Крылова. М.: Стройиздат, 1971.
12. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kapriellov S.S., Demyanov A.I., Bulkin S.A., Moskovtseva V.S. Results of experimental studies of complexly stressed beams of circular cross-section made of high-strength fiber-reinforced concrete. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktсий i sooruzheniy*. 2020. No. 4, pp. 290–297. (In Russian).
13. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kapriellov S.S., Demyanov A.I., Konorev A.V. The main results of experimental studies of reinforced concrete structures made of high-strength concrete B100 of circular and circular sections in torsion with bending. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktсий i sooruzheniy*. 2019. No. 1, pp. 51–61. (In Russian).
14. Demyanov A.I., Salnikov A.S., Kolchunov V.I. Experimental studies of reinforced concrete structures in torsion with bending and analysis of their results. *Stroitel'stvo I rekonstruktsiya*. 2017. No. 4 (72), pp. 17–26. (In Russian).
15. Demyanov A.I., Kolchunov V.I., Pokusaev A.A. Experimental studies of the deformation of reinforced concrete structures during torsion with bending. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktсий i sooruzheniy*. 2017. No. 6, pp. 37–44. (In Russian).
16. Demyanov A.I., Naumov N.V., Kolchunov V.I. Some results of experimental studies of composite reinforced concrete structures in torsion with bending. *Stroitel'stvo I rekonstruktsiya*. 2018. No. 5 (79), pp. 13–23. (In Russian).
17. Kolchunov V.I., Fedorov V.S. Conceptual hierarchy of models in the theory of resistance of building structures. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2020. No. 8, pp. 16–23. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.08.16-23. (In Russian).
18. Karpenko N.I. Obshchiye modeli mekhaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow: Stroyizdat. 1996. 410 p.
19. Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kolchunov V.I., Travush V.I. Calculated model of a complex-stressed reinforced concrete element under torsion with bending. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. Vol. 17. No. 1, pp. 34–47.
20. Karpenko N.I. Teoriya deformirovaniya zhelezobetona s treshchinami [The theory of deformation of cracked reinforced concrete]. Moscow: Stroyizdat. 1976. 208 p.
21. Methodological manual “Statically indeterminate reinforced concrete structures. Diagrammatic methods of computer-aided calculation and design”. Moscow: Federal Center for Rationing, Standardization and Conformity Assessment in Construction. 2017. 197 p.
22. Chistova T.P. Experimental study of deformations of conventional reinforced concrete elements of box-shaped and solid rectangular sections in pure torsion. Strength and rigidity of reinforced concrete structures. Edited by S.A. Dmitriev and S.M. Krylov. Moscow: Stroyizdat. 1971. (In Russian).

УДК 666.914.4

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-57-61>И.В. БЕССОНОВ¹, канд. техн. наук (bessonoviv@mail.ru);А.Д. ЖУКОВ^{1,2}, канд. техн. наук (lj211@yandex.ru), Э.А. ГОРБУНОВА^{1,2}, инженер (eg15082000@mail.ru)¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Исследование водостойкости гидрофобизированных пазогребневых гипсовых плит

Пазогребневые плиты на основе гипсового или модифицированного гипсового вяжущего, монолитной структуры или с пустотами, поризованные или с введением облегчающих наполнителей, зарекомендовали себя как изделия, незаменимые при обустройстве помещений внутри здания. Исследование свойств гидрофобизированных плит позволяет расширять область применения изделий. Целью представленного исследования являлось определение возможности применения гипсовых пазогребневых гидрофобизированных плит в условиях повышенной влажности. Образцы плит подвергались испытанию по показателям водостойкости. Определялись следующие характеристики: водопоглощение, адсорбция воды внешней поверхностью плиты, коэффициент снижения прочности при увлажнении, краевой угол смачивания, коэффициент капиллярного всасывания. Комплексное исследование плит гипсовых пазогребневых гидрофобизированных показало их повышенную водостойкость по сравнению с пазогребневыми плитами обычного состава. Влажность плит при поступлении в лабораторию составила: гидрофобизированные – 0,7%; обычные – 4,5%. Водопоглощение через 2 ч у гидрофобизированных образцов составило 4,9%, у обычных – 32,5%; через 24 ч соответственно 14,2 и 33,3%. Гидрофобизированные плиты имеют значительно более низкую смачиваемость поверхности (краевой угол смачивания тупой и составляет около 120°), в то время как на обычных плитах капля воды не держится, впитывается поверхностью. Скорость капиллярного подсоса воды гидрофобизированных плит существенно ниже, чем у обычных. После проведения комплекса натурных наблюдений на объектах возможно составление рекомендаций для широкого применения гидрофобизированных пазогребневых плит в помещениях с повышенной влажностью.

Ключевые слова: пазогребневые плиты, водостойкость, повышенная влажность, коэффициент размягчения, угол смачивания, капиллярный подсос, гидрофобизация.

Для цитирования: Бессонов И.В., Жуков А.Д., Горбунова Э.А. Исследование водостойкости гидрофобизированных пазогребневых гипсовых плит // *Строительные материалы*. 2021. № 6. С. 57–61. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-57-61>

I.V. BESSONOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (bessonoviv@mail.ru); A.D. ZHUKOV^{1,2}, Candidate of Sciences (Engineering) (lj211@yandex.ru); E.A. GORBUNOVA^{1,2}, Engineer (eg15082000@mail.ru)

¹ Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

² National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Researching of the Water Resistance of Hydrophobized Tongue-and-Groove Gypsum Slabs

Tongue-and-groove slabs based on gypsum or modified gypsum binder, monolithic structure or with voids, porous or with the introduction of lightweight fillers, have established themselves as products that are indispensable for arranging premises inside a building. Researching of the properties of hydrophobized slabs allows you to expand the scope of products. The purpose of the research described in the article was to determine the possibility of using gypsum tongue-and-groove hydrophobized slabs in conditions of high humidity. Samples of slabs were tested for water resistance. The following characteristics were determined: water absorption, water adsorption by the outer surface of the slab, coefficient of strength reduction during moistening, contact angle of wetting, capillary absorption coefficient. A comprehensive research of hydrophobized tongue-and-groove gypsum slabs showed their increased water resistance in comparison with tongue-and-groove slabs of conventional composition. The humidity of the slabs upon admission to the laboratory was as follows: hydrophobized – 0.7%, ordinary – 4.5%. Water absorption after 2 hours for hydrophobized samples was 4.9%, for ordinary ones – 32.5%; after 24 hours, respectively: 14.2% and 33.3%. Hydrophobized boards have a significantly lower surface wettability (the contact angle is obtuse and is about 120°), while on ordinary slabs a drop of water does not hold, it is absorbed by the surface. The rate of capillary suction of water from hydrophobized plates is significantly lower than that of conventional plates. After a complex of field observations at the facilities, it is possible to draw up recommendations for the widespread use of hydrophobized tongue-and-groove plates in rooms with high humidity.

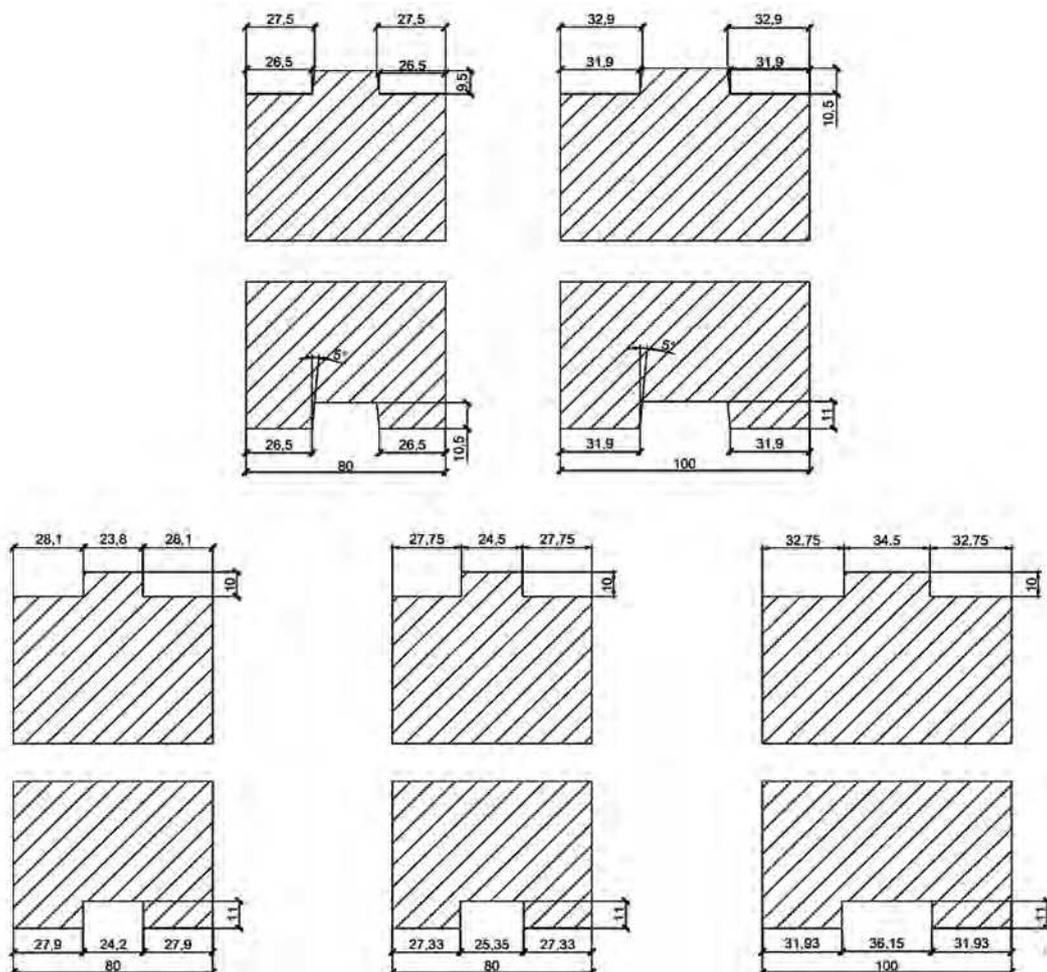
Keywords: tongue-and-groove slabs, water resistance, high humidity, coefficient of strength reduction during moistening, contact angle of wetting, capillary suction of water, hydrophobization.

For citation: Bessonov I.V., Zhukov A.D., Gorbunova E.A. Researching of the water resistance of hydrophobized tongue-and-groove gypsum slabs. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 6, pp. 57–61. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-57-61>

Строительные материалы на основе гипсовых вяжущих традиционно используют в помещениях зданий с относительной влажностью при эксплуатации до 60%, при температуре до 24°C (СП 50.13330.2012, табл. 1). В настоящее время намечается тенденция расширения области применения гипсовых строи-

тельных изделий преимущественно за счет повышения их водостойкости.

Гипсоволокнистые листы влагостойкие (ГВЛВ), гипсокартонные листы влагостойкие (ГКЛВ) применяют в помещениях зданий не только с сухим, нормальным, но и с влажным режимом эксплуата-



Формы и размеры гребня и паза гипсовых пазогребневых плит
Shapes and dimensions of a crest and a groove of gypsum tongue-and-groove slabs

ции при циклических температурно-влажностных воздействиях и при обязательном наличии вытяжной вентиляции, обеспечивающей нормативный воздухообмен по СП 54.13330.2016. Появляются новые материалы на основе гипса с повышенной стойкостью к атмосферным воздействиям, в том числе попеременному замораживанию и оттаиванию, и предназначенные для применения на фасадах зданий. В связи с этим становится актуальным продвижение модифицированных пазогребневых плит и исследование их характеристик во влажных условиях [1–9].

Гипсовые пазогребневые плиты (ГОСТ 6428–2018) имеют форму прямоугольного параллелепипеда с пазами и выступами (см. рисунок). Плиты относятся к группе трудногораемых материалов. Их изготавливают на основе неводостойких и водостойких гипсовых вяжущих с минеральными и (или) органическими заполнителями или без них. Пазогребневые плиты предназначены для перегородок, внутренних самонесущих стен жилых, бытовых, производственных и административных зданий. Основной особенностью этих плит является наличие паза и гребня как с торцов, так и в верхней и нижней их частях [10–13].

Плиты изготавливают по литьевой технологии в пластиковых формах-кассетах специальной конструкции. Точность геометрических размеров $\pm 0,5$ мм, что обеспечивает идеально ровную поверхность стены без каких-либо выступов в местах межплитных швов. Это позволяет вести кладку без раствора (насухо) или на клей. Плиты могут иметь различную декоративную отделку лицевой поверхности.

Сырьевые материалы

Для производства пазогребневых плит для стен и перегородок применяют: гипсовое вяжущее марок Г-4–Г-7 или Г-10–Г-16 (ГОСТ 125–2018); водостойкие гипсовые или ангидритовые вяжущие; песок, отвечающий требованиям ГОСТ 8736–2014; золы-уноса ТЭЦ, отходы, получаемые при дроблении известняка или других горных пород (ГОСТ 8267–93); смесь перечисленных минеральных заполнителей с древесными опилками; пено- и газообразователи для получения ячеистых или поризованных гипсобетонов; добавки, регулирующие свойства смесей и бетонов.

Плиты пазогребневые для стен и перегородок можно условно подразделить на четыре вида: легкие, нормальные, тяжелые, звукоизолирующие (табл. 1).

Таблица 1
Table 1Технические характеристики плит
Technical characteristics of slabs

Параметры	Значения параметров для плит			
	легких	нормальных	тяжелых	звукоизолирующих
Средняя плотность, кг/м ³	600–700	700–900	900–1200	1200–1500
Прочность при сжатии в сухом состоянии на гипсовом вяжущем марки, МПа, не менее:				
Г-5	2	3,5	6	8
Г-10–Г-16	–	–	8	–
Водопоглощение, мас. %, не более:				
обычных плит	40	35	25	15
гидрофобизированных	5	5	5	–
Индекс изоляции воздушного шума, дБ	30–35	35–45	40–50	Более 45
Размеры плит, мм:				
длина	600	600	600	600
ширина	300	300	300	300
толщина	80–150	80–150	80–150	80–150

Таблица 2
Table 2Прочность образцов-балочек при сжатии и при изгибе
Compression and flexural strength of samples of beams

Параметр	Условия испытаний	
	в возрасте 2 ч	высушенные до постоянной массы
Прочность образцов-балочек, МПа:		
при сжатии	3,5	5
при изгибе	1,7	2,4

Таблица 3
Table 3Результаты определения водопоглощения
Water absorption results

Пазогребневые плиты	Водопоглощение, мас. %, через		
	2 ч	24 ч	48 ч
Обычные	32,5	33,3	33,2
Гидрофобизированные	4,9	14,2	16,8

Прочность плит определяется пределом прочности при сжатии и изгибе образцов-балочек (табл. 2). К высокому классу по средней плотности относят плиты с плотностью от 1100 до 1500 кг/м³.

Ход работы и методы испытаний

Целью исследований, изложенных в статье, является определение возможности применения гипсовых пазогребневых гидрофобизированных плит в условиях повышенной влажности. Для исследования представлены плиты гипсовые пазогребневые гидрофобизированные, а также обычного состава для получения сравнительных характеристик. Геометрические размеры плит 667×500×80 мм.

Образцы плит подвергались испытанию по показателям водостойкости. Определены, в частности,

Таблица 4
Table 4Коэффициент размягчения при увлажнении гипсовых плит
Softening coefficient when wetting gypsum slabs

Пазогребневые плиты	Влажность w, мас. %	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент размягчения при увлажнении при Кразм
Обычные	Воздушно-сухие	46,4	0,4
	34,2 мас. %	19	
Гидрофобизированные	Воздушно-сухие	45,6	0,4
	13,8 мас. %	18,5	

Таблица 5
Table 5Капиллярное всасывание гипсовых плит
Capillary suction of gypsum slabs

Пазогребневые плиты	Высота капиллярного подсоса через промежутки времени, см			
	15 мин	30 мин	1 ч	1 сут
Обычные	4	5,8–6	7,8–8	Полностью увлажнились
Гидрофобизированные	0,2	0,5	1–1,2	3,5–4

следующие характеристики: водопоглощение, адсорбция воды внешней поверхностью плиты, коэффициент снижения прочности при увлажнении, краевой угол смачивания, коэффициент капиллярного всасывания.

По методике ГОСТ 6428–2018 «Плиты гипсовые пазогребневые для перегородок» была определена влажность поступивших в лабораторию пазогребневых плит. Массовая влажность гидрофобизированных плит составила 0,7%, обычных – 4,5%.

Таблица 6
Table 6

Проведение измерений геометрических размеров капли дистиллированной воды, нанесенной на поверхность гидрофобизированной гипсовой плиты, и вычисление краевых углов смачивания
Measuring the geometric dimensions of a drop of distilled water applied to the surface of a hydrophobized gypsum board and calculating the contact angles

Пазогребневые плиты	А, мм	Н, мм	tgα	α	Краевой угол смачивания Θ, °	
Гидрофобизированные	1	2,85	2,45	1,7193	59°48′	119
	2	1,83	2,75	3,0055	71°36′	143
	3	3,05	1,6	1,049	56°	112
Обычные	Капля не держится на поверхности, происходит впитывание. Краевой угол определить не представляется возможным.					

Для определения водопоглощения и прочностных показателей из плит были выпилены образцы-кубы стороной 80 мм. Результаты определения водопоглощения через 2, 28 и 48 ч приведены в табл. 3.

Коэффициент снижения прочности при увлажнении (коэффициент размягчения) определяли на шести образцах в воздушно-сухом состоянии и шести образцах, выдержанных в воде в течение суток, обычных и гидрофобизированных плит соответственно. В табл. 4 приведены средние значения прочностных показателей. Коэффициент размягчения определяли как отношение прочности образцов в сухом состоянии к показателю прочности во влажном состоянии.

Адсорбцию воды поверхностью пазогребневых плит из гидрофобизированного и обычного гипса определяли по методике, аналогичной для гипсоволокнистых листов водостойких (ГВЛВ). Использованы образцы размером 140×140×80 мм. На внешнюю поверхность образцов ставили металлические кольца диаметром 90 мм и высотой 90 мм. Стык образца с кольцом герметично заделывали. В кольца наливали 250 г воды, с тем чтобы через 2 ч воду слить, кольца снять и произвести контрольное взвешивание. Образец из обычной гипсовой плиты впитал всю воду через час, поэтому об адсорбции поверхностью говорить нельзя – происходит впитывание. Гидрофобизированный образец адсорбировал незначительное количество воды – около 1 г, что практически совпадает с возможной погрешностью эксперимента.

Для проведения эксперимента на капиллярное всасывание из плит были вырезаны призмы размером 4×4×12 см по две штуки из каждой. Призмы были установлены торцом в чашки, наполненные подкрашенной водой примерно на 1,5 см. Через определенные промежутки времени производились замеры высоты окрасившейся призмы от уровня воды. Полученные данные приведены в табл. 5.

Определение краевых углов смачивания водой образцов гипсовых пазогребневых плит проводили в лаборатории химии полимеров ИОХ РАН. Краевые углы смачивания (Θ) вычисляют по формуле: $\Theta = 2\alpha$,

$$\text{tg}\alpha = 2H/A,$$

где А – диаметр капли жидкости на горизонтальной поверхности образца, мм; Н – высота капли жидкости.

Значения А и Н измеряли с помощью инструментального микроскопа. Результаты приведены в табл. 6.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования водостойкости определили значительное преимущество гидрофобизированных плит по сравнению с обычными гипсовыми плитами по таким показателям, как водопоглощение, адсорбция воды внешней поверхностью плиты, краевой угол смачивания, коэффициент капиллярного всасывания. В то же время следует отметить, что значения коэффициента снижения прочности при увлажнении гидрофобизированных и обычных пазогребневых гипсовых плит имеют один порядок и составляют $K_{\text{разм}} = 0,4$.

Проведенные исследования плит гипсовых пазогребневых гидрофобизированных показали их повышенную водостойкость по отношению к пазогребневым плитам обычного состава. Влажность плит при поступлении в лабораторию составила: гидрофобизированные – 0,7%; обычные – 4,5%. Водопоглощение через 2 ч у гидрофобизированных образцов составило 4,9%, у обычных – 32,5%; через 24 ч соответственно: 14,2 и 33,3%. Гидрофобизированные плиты имеют значительно более низкую смачиваемость поверхности (краевой угол смачивания тупой и составляет около 120°), в то время как на обычных плитах капля воды не держится, впитывается поверхностью. Скорость капиллярного подсоса воды гидрофобизированных плит существенно ниже, чем у обычных.

Показатели, полученные по результатам лабораторных исследований, должны получить подтверждение при эксплуатации в натуральных условиях. Рекомендации для широкого применения гидрофобизированных пазогребневых плит в помещениях с повышенной влажностью могут быть целесообразны после проведения комплекса натурных наблюдений с использованием инструментально-визуального контроля. При соблюдении требований строительных норм и правил по обеспечению вентиляции, нормируемого воздухообмена, гидроизоляции, защиты поверхности плит керамической плиткой и др. можно прогнозировать достаточную длительность эксплуатации перегородок из гидрофобизированных гипсовых пазогребневых плит без проведения ремонтных работ.

Список литературы

1. Бурьянов А.Ф. Гипс, его исследование и применение от П.П. Будникова до наших дней // *Строительные материалы*. 2005. № 9. С. 46–48.
2. Пустовгар А.П., Бурьянов А.Ф., Василик П.Г. Особенности применения гиперпластификаторов в сухих строительных смесях // *Строительные материалы*. 2010. № 12. С. 61–64.
3. Бессонов И.В. «Столица» – атмосферостойкая гипсовая облицовка зданий // *Строительные материалы*. 1999. № 9. С. 12–14.
4. Бессонов И.В. Гипс повышенной водостойкости. Сборник докладов 3-й научно-практической конференции «Проблемы строительной теплофизики и энергосбережения в зданиях». Москва. НИИСФ. 1998. С. 112–117.
5. Панченко А.И., Бурьянов А.Ф., Козлов Н.В., Соловьев В.Г., Пашкевич С.А. Комплексная оценка эффективности применения гипсового вяжущего повышенной водостойкости // *Строительные материалы*. 2014. № 12. С. 72–74.
6. Хаев Т.Э., Ткач Е.В., Орешкин Д.В. Модифицированный облегченный гипсовый материал с полыми стеклянными микросферами для реставрационных работ // *Строительные материалы*. 2017. № 10. С. 45–51.
7. Meshheryakov Yu.G., Tairov T.N., Fedorov S.V. Verfahren der komplexen production der Anhydrit und GipsbinderInt/Kongress Fachmess Euro ECO. Hannover. 2011.
8. Мещеряков Ю.Г., Федоров С.В. Энергосберегающие технологии переработки фосфогипса и фосфополугидрата // *Строительные материалы*. 2005. № 12. С. 56–57.
9. Bozhenov P.I., Meshheryakov Yu.G. Einfluss der beimengungen and die technischen eigenschaften son gipsbinderu. 6 Int. Baustoff and Sieikattagung. Weimar. 1976. 43 p.
10. Sychugov S., Tokarev Y., Plekhanova T., Kazantseva A., Gaynetdinova D. Binders based on natural anhydrite and modified by finely-dispersed galvanic and petrochemical waste // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 57, pp. 1022–1028. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.129>
11. Yakovlev G., Polyanskikh I., Fedorova G., Gordina A., Buryanov A. Anhydrite and gypsum compositions modified with ultrafine man-made admixtures. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 108, pp. 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.195>
12. Yakovlev G., Khozin V., Polyanskikh I., Keriene J., Gordina A., Petrova T. Utilization of blast furnace flue dust while modifying gypsum binders with carbon nanostructures. *The 9th International Conference “ENVIRONMENTAL ENGINEERING”*. 22–23 May 2014. Vilnius. Lithuania. http://enviro2014.vgtu.lt/Articles/1/025_Yakovlev.pdf
13. Яковлев Г.И., Первущин Г.Н., Крутиков В.А., Макарова И.С., Керене Я., Фишер Х.-Б., Бурьянов А.Ф. Газобетон на основе фторангидрита, модифицированный углеродными наноструктурами // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 70–72.

References

1. Buryanov A.F. Gypsum, researching and application from P.P. Budnikov to the present time. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2005. No. 9, pp. 46–48. (In Russian).
2. Pustovgar A.P., Buryanov A.F., Vasilik P.G. Features of the use of hyperplasticizers in dry building mixtures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 12, pp. 61–64. (In Russian).
3. Bessonov I.V. “Capital” – weatherproof gypsum cladding of buildings. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 1999. No. 9, pp. 12–14.
4. Bessonov I.V. Gypsum with increased water resistance. *Collection of reports of the 3rd scientific-practical conference “Problems of building thermal physics and energy saving in buildings”*. Moscow. NIISF. 1998, pp. 112–117. (In Russian).
5. Panchenko A.I., Buryanov A.F., Kozlov N.V., Solov'ev V.G., Pashkevich S.A. Comprehensive assessment of the effectiveness of the use of gypsum binder with increased water resistance. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 12, pp. 72–74. (In Russian).
6. Khaev T.E., Tkach E.V. Oreshkin D.V. Modified lightweight gypsum material with hollow glass microspheres for restoration works. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 10, pp. 45–51. (In Russian).
7. Meshheryakov Yu.G., Tairov T.N., Fedorov S.V. Verfahren der komplexen production der Anhydrit und GipsbinderInt/Kongress Fachmess Euro ECO. Hannover. 2011.
8. Meshcheryakov Yu.G., Fedorov S.V. Energy-saving technologies for processing phosphogypsum and phosphohydrate. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2005. No. 12. pp. 56–57. (In Russian).
9. Bozhenov P.I., Meshheryakov Yu.G. Einfluss der beimengungen and die technischen eigenschaften son gipsbinderu. 6 Int. Baustoff and Sieikattagung. Weimar. 1976. 43 p.
10. Sychugov S., Tokarev Y., Plekhanova T., Kazantseva A., Gaynetdinova D. Binders based on natural anhydrite and modified by finely-dispersed galvanic and petrochemical waste // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 57, pp. 1022–1028. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.129>
11. Yakovlev G., Polyanskikh I., Fedorova G., Gordina A., Buryanov A. Anhydrite and gypsum compositions modified with ultrafine man-made admixtures. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 108, pp. 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.195>
12. Yakovlev G., Khozin V., Polyanskikh I., Keriene J., Gordina A., Petrova T. Utilization of blast furnace flue dust while modifying gypsum binders with carbon nanostructures. *The 9th International Conference “ENVIRONMENTAL ENGINEERING”*. 22–23 May 2014. Vilnius. Lithuania. http://enviro2014.vgtu.lt/Articles/1/025_Yakovlev.pdf
13. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Krutikov V.A., Makarova I.S., Kerene YA, Fisher H., Buryanov A.F. Aerated concrete based on fluoroanhydrite modified with carbon nanostructures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 3, pp. 70–72. (In Russian).

С.В. ФЕДОСОВ¹, д-р техн. наук, академик РААСН (fedosov-academic53@mail.ru);
С.А. МАЛБИЕВ², канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник (nata.khomch@yandex.ru)

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

² ООО НПП «Инженер-Строй» (153003, г. Иваново, ул. Красных Зорь, 15а, оф. 103)

Долговечность и надежность пространственных стержневых полимерных конструкций с узлами из композиционных материалов при циклическом изменении тепловлажностных параметров эксплуатации

Рассматриваются конструктивные трубчатые элементы из непластифицированного поливинилхлорида (ПВХ), одного из дешевых термопластичных материалов, отличающегося высокой стойкостью к различным химически агрессивным средам. Разработанная пластмассовая перекрестно-стержневая пространственная конструкция (ПСПК) из ПВХ труб рекомендуется для сооружений закрытого грунта (теплиц, парников, оранжерей), складов минеральных удобрений и фермерской продукции, крытых стоянок для авто- и сельскохозяйственных машин, бензозаправочных и станций технического обслуживания автомобилей, морских стационарных глубоководных платформ и др. Пониженная и повышенная температура существенно влияет на изменения механических характеристик конструкционных пластмасс: прочность при растяжении-сжатии, изгибе, потеря устойчивости, что в конечном итоге снижает эксплуатационную надежность и долговечность ПСПК. Поэтому в расчетах напряженно-деформированного состояния следует учитывать нестационарный теплоперенос в несущих пространственных стержневых системах. Рассмотрен вывод дифференциальных уравнений теплопереноса, основанный на применении закона сохранения энергии к бесконечно малому элементу окружающей среды с учетом потоков тепла через поверхность этого элемента, а также выделения или поглощения тепловой энергии в объеме этого элемента. Учет влияния технологической температуры на ПВХ трубчатые элементы во времени внутри помещений при эксплуатации ПСПК позволит повысить надежность и долговечность для прогнозирования их технического состояния, например путем принудительного изменения температурного режима с помощью специальных устройств.

Ключевые слова: пространственная стержневая конструкция, долговечность, надежность, поливинилхлорид.

Для цитирования: Федосов С.В., Малбиев С.А. Долговечность и надежность пространственных стержневых полимерных конструкций с узлами из композиционных материалов при циклическом изменении тепловлажностных параметров эксплуатации // *Строительные материалы*. 2021. № 6. С. 62–66. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-62-66>

S.V. FEDOSOV¹, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAASN (fedosov-academic53@mail.ru);

S.A. MALBIEV², Candidate of Sciences (Engineering), Leading researcher

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

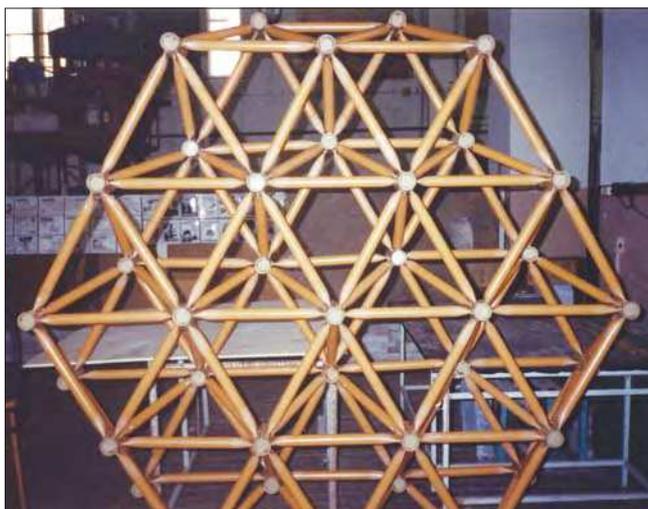
² "Engineer-Story" NPP LLC (office 103, 15a, Krasnykh Zor' Street, Ivanovo, 153003, Russian Federation)

Durability and Reliability of Space Rod Structures Made of Polymers with Nodes Made of Composite Materials at Cyclic Changes in Heat and Humidity Parameters of Operation

Structural tubular elements made of non-plasticized polyvinyl chloride (PVC), one of the cheap thermoplastic materials characterized by high resistance to various chemically aggressive environments, are considered. The developed plastic cross-rod spatial structure made of PVC pipes is recommended for closed ground structures (hot houses, greenhouses, glass houses), warehouses of mineral fertilizers and farm products, covered parking lots for cars and agricultural machines, gas stations and car service stations, offshore stationary deep-water platforms, etc. Low and high temperatures significantly affect changes in the mechanical characteristics of structural plastics: tensile strength/compression, bending, loss of stability, which ultimately reduces the operational reliability and durability of the cross-rod spatial structure. Therefore, in the calculations of the stress-strain state, it is necessary to take into account the non-stationary heat transfer in the load-bearing space rod systems. The derivation of differential heat transfer equations based on the application of the law of conservation of energy to an infinitesimal element of the environment is considered, taking into account the heat flows through the surface of this element, as well as the release or absorption of thermal energy in the volume of this element. Taking into account the influence of the process temperature on PVC tubular elements in time inside the premises during the operation of the cross-rod spatial structure will make it possible to increase the reliability and durability for predicting their technical condition, for example, by forcibly changing the temperature regime with the help of special devices.

Keywords: spatial rod structure, durability, reliability, polyvinyl chloride.

For citation: Malbiev S.A., Fedosov S.V. Durability and reliability of space rod structures made of polymers with nodes made of composite materials at cyclic changes in heat and humidity parameters of operation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 6, pp. 62–66. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-792-6-62-66>



Общий вид модели ПСПК из ПВХ труб перед испытанием
General view of a model of a cross-bar spatial structure made of PVC pipes before testing

Перекрестно-стержневые пространственные конструкции (ПСПК) регулярной ячеистой структуры широко применяются в отечественном и зарубежном строительстве для большепролетных покрытий зданий и сооружений различного назначения [1].

Отличительной особенностью ПСПК является многократная повторяемость элементарных прямоугольных, треугольных и других ячеек, образованных однотипными стержнями (см. рисунок).

Стержневые системы регулярной структуры имеют конструктивные преимущества перед другими пространственными конструкциями. Составляющие ПСПК стержни, создавая пространственную работу, испытывают в основном одноосные усилия сжатия или растяжения. При этом повышенная жесткость конструкции обеспечивается не за счет постановки связей, а преимущественно самой решеткой. Сравнительно малый шаг стержней решетки позволяет применить облегченный настил, а в ряде случаев и включить ограждающую конструкцию в работу верхнего пояса стержневой плиты.

Высокая прочность полимерных материалов при относительно низком объемном весе, стойкость к атмосферным воздействиям и химически агрессивным средам выгодно отличают их от традиционных строительных материалов. Однако значительным препятствием к широкому применению пластмасс в несущих строительных конструкциях является их относительно высокая деформативность даже при нормальных температурно-влажностных условиях. Полимерные материалы, имеющие прочность ниже легированных сталей и примерно в пять раз меньший, чем сталь, объемный вес, в то же время уступают стали по величине модуля упругости примерно в десять раз, т. е. в десять раз слабее сопротивляются деформированию. Кроме того, вследствие ползучести деформации увеличиваются во времени и могут перейти в остаточные даже при сравнительно низких уровнях напряжений.

В связи с повышенной деформативностью пластмасс существовало мнение о нецелесообразности их применения в несущих конструкциях. Тем не менее в различных странах мира несущие конструкции из полимерных материалов все же созданы. По сравнению с традиционными строительными материалами таких конструкций из пластмасс сравнительно немного, но само их существование подтверждает возможность и целесообразность применения их не только в качестве отделочных и ограждающих, но и несущих конструкций [2].

Заслуживает внимания построенная в 60-х гг. прошлого столетия в Боулдере (штат Колорадо, США) решетчатая радиобашня высотой 30 м из стеклопластиковых труб толщиной стенки 3 мм. Для удобства изготовления башня разделена по высоте на пять пространственных стержневых секций длиной 6 м каждая, что соответствует стандартной длине труб. Соединение стержней между собой выполнено с помощью конических вкладышей, закрепленных на концах труб, с замоноличиванием стыков эпоксидно-цементным раствором.

Башня выполнена в форме правильной усеченной треугольной пирамиды со сторонами 3,8 м в нижнем основании и 0,9 м – в верхнем. Общий вес башни составил 640 кг, что примерно в пять раз меньше аналогичного сооружения из стали.

Фирма «Entwurf Partner» (г. Галлен, Швейцария) разработала систему сборно-разборных пространственных фахверковых несущих конструкций покрытий из легких трубчатых профилей, изготовленных из пластика. Соединение трубок между собой осуществляется специальными зажимами. Трубки могут иметь различную длину, отличаются ребристой поверхностью и поддаются окраске в разные цвета. Сборка такого каркаса покрытия производится без применения каких-либо инструментов. Покрытию можно придавать различную архитектурную форму. При небольшой массе конструкция покрытия характеризуется достаточной жесткостью и устойчивостью. Пространственный каркас покрытия размерами в плане 6×6 м массой всего 35 кг собирается за 15 мин. В разобранном состоянии все элементы такого каркаса, уложенные на хранение или в автомашину, занимают объем 0,18 м³. Подобные конструкции рекомендуются для устройства покрытий ярмарочных павильонов, выставочных помещений и т. п.

Весьма эффективно применение полимерных материалов в сельскохозяйственном строительстве. Значительная часть территории России (северо-западная, северная, северо-восточная, восточная) находится в суровых климатических условиях. Поэтому выращивание сельскохозяйственной продукции (томатов, огурцов, шампиньонов, цитрусовых и др.) в этих регионах в сооружениях закрытого грунта (теплицах, парниках, оранжереях) позволяет стабильно снабжать население овощами, цветами и пр. Существующие конструктивные решения теплиц из

металла не выдерживают тяжелого режима эксплуатации (химически агрессивная среда от вносимых в почву минеральных удобрений, повышенная влажность и температура), поэтому необходимо регулярно ремонтировать большой объем тепличных комплексов.

Пространственные стержневые конструкции могут быть эффективно использованы также для складов минеральных удобрений, зерноскладов, помещений для хранения сельскохозяйственной техники.

Значительный интерес представляют такие конструкции из пластмасс для складов минеральных удобрений благодаря их высокой коррозионной стойкости к воздействию агрессивных сред и ядохимикатов.

Весьма эффективно применение пространственных стержневых систем из полимерных трубчатых элементов при проектировании морских стационарных платформ (ВСН 51.3–85 «Проектирование морских стационарных платформ»). Действующий нормативный документ предусматривает расчетную схему морских стационарных платформ принимать в виде пространственной конструкции с жесткими соединениями элементов в узлах с учетом совместной работы опорных блоков со свайным фундаментом (п. 1.2.2). Выбор расчетных схем, а также методов расчета стальных конструкций необходимо производить с учетом использования ЭВМ. Для сложных конструкций морских стационарных платформ допускается расчетную схему принимать в виде отдельных пространственных опорных блоков с учетом их совместной работы и взаимного влияния.

Важно, что металлоконструкции морских стационарных платформ должны быть обеспечены противокоррозионной защитой (п. 6.1), чего не требуется в случае применения полимерных конструктивных элементов. При этом морские стационарные платформы по условиям эксплуатации считаются находящимися в четырех зонах морской коррозии: атмосферной, периодического смачивания, подводной, донного грунта (п. 6.2).

Пространственные стержневые системы обеспечивают эффективное восприятие внешних воздействий окружающей среды единым комплексом всех элементов конструкций (от покрытия до фундаментов), что в конечном итоге обуславливает расход материалов на 20–50% меньше обычного. При механизированном заводском изготовлении элементов снижение трудоемкости изготовления и монтажа пространственных конструкций в конечном счете обеспечивает экономию средств на современном уровне развития строительной техники до 15%.

Разработанная пластмассовая ПСПК из ПВХ труб рекомендуется для сооружений закрытого грунта (теплиц, парников, оранжерей), складов минеральных удобрений и фермерской продукции, крытых

стоянок для авто- и сельскохозяйственных машин, бензозаправочных и станций технического обслуживания автомобилей, морских стационарных глубоководных платформ и др.

В данной работе рассматриваются конструктивные трубчатые элементы из непластифицированного поливинилхлорида (ПВХ), одного из дешевых термопластичных материалов, отличающегося высокой стойкостью к различным химически агрессивным средам.

Действующая в настоящее время нормативно-техническая документация определяет долговечность как способность строительного объекта сохранять прочностные, физические и другие свойства, устанавливаемые при проектировании и обеспечивающие его нормальную эксплуатацию в течение расчетного срока службы (п. 2.1.3 ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения»). За расчетный срок службы принимается установленный в строительных нормах или в задании на проектирование период использования строительного объекта по назначению до капитального ремонта и (или) реконструкции с предусмотренным техническим обслуживанием. Расчетный срок службы отсчитывается от начала эксплуатации объекта или возобновления его эксплуатации после капитального ремонта или реконструкции (п. 2.1.12). Там же в табл. 1 рекомендован срок службы зданий жилищно-гражданского и производственного строительства не менее 50 лет, например 60 лет и более, а уникальных зданий и сооружений – 100 лет и более.

Для обеспечения требуемой долговечности строительного объекта при его проектировании необходимо учитывать (п. 4.1): условия эксплуатации по назначению; расчетное влияние окружающей среды; свойства применяемых материалов, возможные средства их защиты от негативных воздействий среды, а также возможность деградации их свойств.

Надежность строительного объекта (п. 2.1.5) определена как способность строительного объекта выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации.

Надежность строительных конструкций и оснований следует обеспечивать на стадии разработки общей концепции сооружения при его проектировании, изготовлении его конструктивных элементов, строительстве и эксплуатации (п. 3.4).

При особых воздействиях надежность строительных конструкций дополнительно следует обеспечивать за счет проведения одного или нескольких специальных мероприятий (п. 3.5), включающих в себя: выбор материалов и конструктивных решений, которые при аварийном выходе из строя или локальном повреждении отдельных несущих элементов конструкций не приводят к прогрессирующему обрушению сооружения; предотвращение или снижение возможности реализации подобных воздействий на

несущие конструкции; использование комплекса специальных организационных мероприятий, обеспечивающих ограничение и контроль доступа посторонних лиц к основным несущим конструкциям сооружения.

Специалисты установили, что обычные пластики разлагаются в течение 450 лет после окончания срока эксплуатации, в то время как биоразлагаемые – в течение нескольких недель после их внесения в почву, затем они превращаются в удобрения [2].

Таким образом, для обычных термопластичных и терморезистивных полимерных материалов значительный срок эксплуатации даже в агрессивных средах обеспечивает требуемую надежность и долговечность [3–9].

Одним из главных элементов ПСПК является узловое соединение, включающее девять стержней: шесть расположены в горизонтальной плоскости и три – наклонно через 120° в плане. Для обеспечения требуемой прочности и жесткости в соответствии с указаниями (ГОСТ 27751–2014) внутри соединительного элемента предусмотрен композиционный полимерный материал на основе эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 и пластификатора перхлорвинилового смолы – всего из пяти ингредиентов. Достоинством смолы ЭД-20 считается возможность отверждения при объемном заполнении даже при температуре 20°C без термической обработки, а недостатком – повышенная хрупкость, которая зависит от добавления указанного пластификатора.

Важно отметить, что пониженная и повышенная температура существенно влияет на изменения механических характеристик конструкционных пластмасс: прочность при растяжении-сжатии, изгибе, потеря устойчивости [10], что в конечном итоге снижает эксплуатационную надежность и долговечность ПСПК.

Поэтому в расчетах напряженно-деформированного состояния следует учитывать нестационарный теплоперенос в несущих пространственных стержневых системах. Представляется актуальной разработка математического аппарата процессов теплопереноса в элементах пространственных большепролетных стержневых систем из термопластичных полимерных материалов на основе теории академика А.В. Лыкова [11]. По данным различных исследователей [11, 12], температурные воздействия существенно влияют на полимерные материалы, снижая их технические характеристики.

Вывод дифференциальных уравнений теплопереноса основан на применении закона сохранения энергии к бесконечно малому элементу окружающей среды с учетом потоков тепла через поверхность этого элемента, а также выделения или поглощения тепловой энергии в объеме этого элемента [13].

Поскольку элементы ПСПК представляют собой короткие и длинные стержни трубчатой формы, то общая постановка задачи теплопереноса в системе «цилиндр – цилиндр» может быть записана в нелинейной постановке в форме [12]:

$$c(t)\rho(t)\frac{\partial t(r,l,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r}\left[\lambda(t)\frac{\partial t(r,l,\tau)}{\partial r}\right] + \frac{\partial}{\partial l}\left[\lambda(t)\frac{\partial t(r,l,\tau)}{\partial l}\right] + \frac{1}{r}\left[\lambda(t)\frac{\partial t(r,l,\tau)}{\partial r}\right];$$

$$\tau > 0; R_n < r < R_{вн}; 0 < l < L_k; \quad (1)$$

$$t_0(r,l,\tau) = t(r,l,\tau)|_{\tau=0}; \quad (2)$$

$$-\lambda(t)\frac{\partial t(r,l,\tau)}{\partial r}\Big|_{r=R_n} = q_c(\tau), \quad (3)$$

где $c(t)$ – теплоемкость материала; $\rho(t)$ – плотность; $\lambda(t)$ – коэффициент теплопроводности, существенно зависящий от температуры; R_n – наружный радиус цилиндра; $R_{вн}$ – внутренний радиус цилиндра; $q_c(\tau)$ – плотность теплового потока от окружающей среды к наружной поверхности цилиндра.

Граничное условие на внутренней границе имеет вид:

$$-\lambda(t)\frac{\partial t(r,l,\tau)}{\partial r}\Big|_{r=R_{вн}} = q_{вн}(\tau), \quad (4)$$

где $q_{вн}(\tau)$ – внутренний тепловой поток.

Решение краевой задачи для трубчатого цилиндрического стержня будет иметь вид [14]:

$$T(\bar{x}, Fo) = \frac{t(x,\tau) - t_0}{t_c - t_0} = (1 - \bar{x}) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(\pi n \bar{x}) \exp(-\pi^2 n^2 Fo) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\pi n \bar{x}) \exp(-\pi^2 n^2 Fo) \int_0^1 T_0(\xi) \sin(\pi n \bar{x}) d\xi. \quad (5)$$

В дальнейшем будет построен график распределения безразмерных температур вдоль трубчатого стержня.

По мнению авторов, учет влияния технологической температуры на ПВХ трубчатые элементы во времени внутри помещений при эксплуатации ПСПК позволит повысить надежность и долговечность для прогнозирования их технического состояния, например путем принудительного изменения температурного режима с помощью специальных устройств.

Список литературы

1. Малбиев С.А. Конструкции из дерева и пластмасс. Перекрестно-стержневые пространственные конструкции покрытий зданий. М.: АСВ, 2017. 336 с.
2. Малбиев С.А., Горшков В.К., Разговоров П.Б. Полимеры в строительстве. М.: Высшая школа, 2008. 456 с.
3. Заиков Г.Е. Горение, деструкция и стабилизация полимеров. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 422 с.
4. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / Под ред. А.А. Берлина. 4-е изд., испр. и доп. СПб.: ЦОП «Профессия», 2014. 592 с.
5. Крыжановский В.К. Технические свойства полимерных материалов / Под общ. ред. В.К. Крыжановского. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: ЦОП «Профессия», 2005. 248 с.
6. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд., СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 822 с.
7. Кербер М.Л., Горбаткина Ю.А., Куперман А.М. и др. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии. 2-е изд. СПб.: ЦОП «Профессия», 2008. 560 с.
8. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.К. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология. М.: Интеллект, 2010, 347 с.
9. Бобович Б.Б. Полимерные конструкционные материалы (структура, свойства, применение). М.: ФОРУМ: Инфра-М, 2017. 400 с.
10. Федосов С.В., Малбиев С.А. Структурные конструкции из полимерных материалов для покрытий зданий и сооружений с химически агрессивной средой. Ч. 1. Прочность и деформативность в стационарном тепловом поле // *Вестник гражданских инженеров*. 2018. № 3. С. 54–61.
11. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
12. Федосов С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии: Монография. Иваново: ИПК «ПресСто», 2010. 364 с.
13. Федосов С.В., Малбиев С.А. Структурные конструкции из полимерных материалов для покрытий зданий и сооружений с химически агрессивной средой. Ч. 2. Нестационарный теплоперенос // *Вестник гражданских инженеров*. 2018. № 6. С. 25–29.
14. Федосов С.В., Алоян Р.М., Ибрагимов А.М., Гнедина Л.Ю., Аксаковская Л.Н. Промерзание влажных грунтов, оснований и фундаментов. М.: АСВ, 2005. 277 с.

References

1. Malbiev S.A. Konstruktsii iz dereva i plastmass. Perekrestno-sterzhnevyye prostranstvennyye konstruktsii pokrytiy zdaniy [Wood and plastic constructions. Cross-bar spatial structures of buildings' roofs]. Moscow: ASV. 2017. 336 p.
2. Malbiev S.A., Gorshkov V.K., Talking P.B. Polimery v stroitel'stve [Polymers in construction]. Moscow: Vysshaya shkola. 2008. 456 p.
3. Zaikov G.E. Goreniye, destruktziya i stabilizatsiya polimerov [Combustion, destruction and stabilization of polymers]. Saint Petersburg: Nauchnyye osnovy i tekhnologii. 2008. 422 p.
4. Polimernyye kompozitsionnyye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya [Polymer composite materials: structure, properties, technology / Ed. A.A. Berlin]. Saint Petersburg: "Professiya". 2014. 592 p.
5. Kryzhanovsky V.K. Tekhnicheskiye svoystva polimernykh materialov [Technical properties of polymeric materials / Under total. ed. Kryzhanovsky V.C. 2nd ed.] Saint Petersburg: "Professiya". 2005. 248 p.
6. Mikhailin Yu.A. Konstruktsionnyye polimernyye kompozitsionnyye materialy [Structural polymer composite materials. 2nd ed.] Saint Petersburg: Nauchnyye osnovy i tekhnologii. 2010. 822 p.
7. Kerber M.L., Gorbatkina Yu.A., Kuperman A.M. Polimernyye kompozitsionnyye materialy. Struktura. Svoystva. Tekhnologii. [Polymer composite materials. Structure. Properties. Technologies. 2nd ed.] Saint Petersburg: "Professiya". 2008. 560 p.
8. Bazhenov S.L., Berlin A.A., Kulkov A.A., Oshmyan V.K. Polimernyye kompozitsionnyye materialy. Prochnost' i tekhnologiya [Polymer composite materials. Strength and technology]. Moscow: Intellekt. 2010, 347 p.
9. Bobovich B.B. Polimernyye konstruktsionnyye materialy (struktura, svoystva, primeneniye) [Polymeric construction materials (structure, properties, application)]. Moscow: FORUM: Infra-M. 2017. 400 p.
10. Fedosov S.V., Malbiev S.A. Structural structures made of polymeric materials for coating buildings and structures with a chemically aggressive environment. Part 1. Strength and deformability in a stationary thermal field. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2018. No. 3, pp. 54–61. (In Russian).
11. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti [Heat conduction theory]. Moscow: Vysshaya shkola. 1967. 600 p.
12. Fedosov S.V. Teplomassopereenos v tekhnologicheskikh protsessakh stroitel'noy industrii: monografiya [Heat and mass transfer in technological processes of the construction industry: monograph]. Ivanovo: IPK "PressSto". 2010. 364 p.
13. Fedosov S.V., Malbiev S.A. Structural structures made of polymeric materials for coating buildings and structures with a chemically aggressive environment. Part 2. Non-stationary heat transfer. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2018. No. 6, pp. 25–29. (In Russian).
14. Fedosov S.V., Aloyan R.M., Ibragimov A.M., Gnedina L. Yu., Aksakovskaya L.N. Promerzaniye vlazhnykh gruntov, osnovaniy i fundamentov [Freezing of wet soils, bases and foundations]. Moscow: ASV. 2005. 277 p.

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ СУХИХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

24-26 августа
2021

BALTIMIX

ЕКАТЕРИНБУРГ 2021

21 год
РАСЦВЕТАЕМ ВМЕСТЕ

Организаторы



При поддержке



При участии



baltimix.ru

100+

**TECHNO
BUILD**

forum-100.ru

VIII Международный
строительный форум
и выставка

ДИАЛОГ РЕГИОНОВ

5-7 октября 2021
Екатеринбург