

ISSN: 2686-7818

ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

2020, №3 (6) Научно-практический журнал

***Expert:
theory and practice***

12+

АНО «ИССТЭ»
Тольятти/Tolyatti



Учредитель
Автономная некоммерческая организация
“Институт судебной строительно-технической экспертизы”
(АНО “ИССТЭ”)

Издаётся с 2019 г. Выходит 6 раз в год

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации **ПИ № ФС 77-76688** от 02.09.2019 г.

Редакционный совет:

Петров Владилен Васильевич –
председатель редакционного совета,
Заслуженный деятель науки РФ, доктор
технических наук, профессор, академик
РААСН, Саратовский государственный
технический университет им. Ю.А. Гагарина
Бильчак Василий Степанович - доктор
экономических наук, профессор,
кафедра микроэкономики, Варминьско-
Мазурский Университет, Польша,
Ольштына
Гаджиев Мухлис Ахмед оглы - доктор
технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Строительные конструкции»,
Азербайджанский университет
архитектуры и строительства,
Азербайджан, Баку
Ерофеев Владимир Трофимович - доктор
технических наук, профессор, академик
РААСН, заведующий кафедрой
строительных материалов и технологий,
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва
Исакулов Байзак Разакович - доктор
технических наук, профессор, заведующий

кафедрой «Дизайн и строительства»,
«Баишев Университет», Казахстан, Актобе
Римшин Владимир Иванович -
Заслуженный строитель РФ, доктор
технических наук, профессор, член-
корреспондент РААСН, руководитель
Института развития города Университета
Минстроя (НИИСФ РААСН), Москва
Селяев Владимир Павлович - Заслуженный
деятель науки РФ, доктор технических
наук, профессор, академик РААСН,
заведующий кафедрой строительных
конструкций, Мордовский
государственный университет
им. Н.П. Огарёва
Сорочайкин Андрей Никонович –
заместитель главного редактора, кандидат
экономических наук, доктор философских
наук, АНО «ИССТЭ», Тольятти
Чернышов Евгений Михайлович - доктор
технических наук, профессор, академик
РААСН, Воронежский государственный
технический университет
Юрасов Алексей Владимирович - доктор
экономических наук, профессор,
Вильнюсский технический университет
имени Гедиминаса, Литва

Адрес редакции: 445047, Самарская область, г. Тольятти,
Южное шоссе, дом 35А, офис 401, e-mail: expert763@mail.ru

Founder
Independent Noncommercial Organization
“Institution of Forensic Construction and Technological Expertise”
INO “IFCTE”

Published since 2019. Published 6 times a year.

The certificate of mass media registration **PI № FS 77-76688**
issued by Federal Service of Supervision of Communications,
Information Technology and Mass Communications

Editorial Board:

Vladilen V. Petrov - Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof., Academician of RAABS, Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, (Saratov, Russia)

Vasily S. Bilchak – Dr. of Economics, Prof., Department of Microeconomics, University of Warmia and Mazury (Olsztyn, Poland)

Mukhlis Ahmed oglu Hajiye – Dr. of Technical, Prof., Head of the Department “Building Structures”, Azerbaijan University of Architecture and Construction (Baku, Azerbaijan)

Vladimir T. Erofeev - Dr. of Technical, Prof., Academician of RAABS, Head of the Department of Building Materials and Technologies, Mordovian State University named after N. P. Ogarev (Saransk, Russia)

Bayzak R. Isakulov – Dr. of Technical, Prof., Head of the Department of Design and Construction, Baishev University (Aktobe, Kazakhstan)

Vladimir I. Rimshin - Honored Builder of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof., Corresponding Member of RAABS, Head of the Institute of City Development of the University of Minstroy (Moscow, Russia)

Vladimir P. Selyaev - Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof., Academician of RAABS, Head of the Department of Building Structures, Mordovian State University named after N. P. Ogarev (Saransk, Russia)

Evgeniy M. Chernyshov - Dr. of Technical, Prof., Academician of RAABS, Voronezh state technical University (Voronezh, Russia)

Aleksei V. Iurasov - Prof., PhD, Verslo technologijų ir verslininkystės katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas (Vilnius, Lithuania)

Andrey N. Sorochaikin - Candidate of Economic, Dr. of Philosophy, Honorary Builder; INO “IFCTE” (Tolyatti, Russia)

Editorial office: 445047, office 401, the house 35A, Southern Highway,
Tolyatti, Samara region, e-mail: expert763@mail.ru

Редакционная коллегия:

Мурашкин Василий Геннадьевич – главный редактор, кандидат технических наук, АНО “ИССТЭ”, Тольятти

Анпилов Сергей Михайлович - заместитель главного редактора, Заслуженный изобретатель РФ, доктор технических наук, советник РААСН, эксперт АНО “ИССТЭ”, Тольятти

Сорочайкин Андрей Никонович - заместитель главного редактора, кандидат экономических наук, доктор философских наук, директор АНО “ИССТЭ”, Тольятти

Гарибов Рафаил Баширович - доктор технических наук, профессор, советник РААСН, Балаковский ИТИ - филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Ерышев Валерий Алексеевич - доктор технических наук, советник РААСН, профессор кафедры “Промышленное и гражданское строительство”, Тольяттинский государственный университет

Жаданов Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций, Оренбургский государственный университет

Иваненко Лариса Викторовна – кандидат технических наук, доктор экономических наук, профессор, кафедра управления человеческими ресурсами, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва

Измайлов Айрат Маратович - кандидат экономических наук, доцент кафедры прикладного менеджмента, Самарский государственный экономический университет

Котлов Виталий Геннадьевич – кандидат технических наук, профессор, директор института строительства и архитектуры, Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола

Куприянов Валерий Николаевич - доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Курлов Алексей Борисович - доктор социологических наук, профессор, кафедра социологии и социальных технологий, Уфимский государственный авиационный технический университет

Мурашкин Геннадий Васильевич - Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, кафедра «Строительные конструкции», Самарский государственный технический университет

Низина Татьяна Анатольевна - доктор технических наук, советник РААСН, профессор кафедры строительных конструкций, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

Панаедова Галина Ивановна - доктор экономических наук, профессор, кафедра налоговой политики и таможенного дела, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

Соколов Борис Сергеевич - доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, Заслуженный деятель науки и техники РТ, лауреат госпремии РТ, научный консультант АО “Казанский Гипронииавиапром”

Стрельцова Елена Дмитриевна - доктор экономических наук, профессор кафедры, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия

Тюкавкин Николай Михайлович - доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой экономики инноваций, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва

Хозин Вадим Григорьевич - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой “Технология строительных материалов, изделий и конструкций”, Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Шестаков Александр Алексеевич - доктор философских наук, профессор, заведующий кафедрой “Философия”, Самарский государственный технический университет

Editorial Staff:

Vasily G. Murashkin - Editor-in-Chief, Candidate of Technical, INO "IFCTE" (Tolyatti, Russia)

Sergey M. Anpilov - Deputy Editor-in-Chief, Expert of INO "IFCTE", Honored Inventor of the Russian Federation, Dr. of Technical, Advisor to RAABS (Tolyatti, Russia)

Andrey N. Sorochaikin - Deputy Editor-in-Chief, Director INO "IFCTE", Candidate of Economic, Dr. of Philosophy, Honorary Builder (Tolyatti, Russia)

Rafail B. Garibov – Dr. of Technical, Prof., Advisor to RAASN, Balakovsky ITI - a branch of the National Research Nuclear University MEPhI (Balakovo, Russia)

Valery A. Eryshev - Dr. of Technical, Advisor to RAABS, Professor of the Department of Industrial and Civil Construction, Togliatti State University (Tolyatti, Russia)

Victor I. Zhadanov - Dr. of Technical, Prof., Head of the Department of Building Structures, Orenburg state University (Orenburg, Russia)

Larisa V. Ivanenko - Candidate of Technical, Dr. of Economics, Prof., Department of Human Resources Management, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev (Samara, Russia)

Ayrat M. Izmailov - Candidate of Economic, Associate Prof. of Applied Management Department, Samara State University of Economics (Samara, Russia)

Vitaly G. Kotlov - Candidate of Technical, Prof., Director of the Institute of Construction and Architecture, Volga State Technological University (Yoshkar-Ola, Russia)

Valery N. Kupriyanov - Dr. of Technical, Prof., Corresponding Member of RAABS, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (Kazan, Russia)

Alexey B. Kurlov - Dr. of sociology, Prof., Department of Sociology and Social Technologies, Ufa State Aviation Technical University, (Ufa, Russia)

Gennady V. Murashkin - Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof., Corresponding Member of RAABS, Department of Building Structures, Samara State Technical University (Samara, Russia)

Tatyana A. Nizina - Dr. of Technical, Advisor to RAABS, Professor of the Department of Building Structures, Mordovian State University named after N. P. Ogarev (Saransk, Russia)

Galina I. Panaedova – Dr. of Economics, Prof., Department of Tax Policy and Customs, North Caucasus Federal University (Stavropol, Russia)

Boris S. Sokolov - Dr. of Technical, Prof., Corresponding Member of RAABS, Kazan, Russia

Elena D. Streltsova – Dr. of Economics, Professor of the Department, M.I. South Russian State Polytechnic University named after Platova (Novocherkassk, Russia)

Nikolay M. Tyukavkin - Dr. of Economics, Prof., Head of the Department of Innovation Economics, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev (Samara, Russia)

Vadim G. Khozin - Dr. of Technical, Prof., Head of the Department "Technology of Building Materials, Products and Structures", Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (Kazan, Russia)

Alexander A. Shestakov - Dr. of Philosophy, Prof., Head of the Department of Philosophy, Samara State Technical University (Samara, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Анпилов С.М., Ерышев В.А., Петров В.В., Селяев В.П., Сорочайкин А.Н., Травуш В.И., Шестаков А.А.</i>	
Геннадий Васильевич Мурашкин (1936-2020). Некролог	9

АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

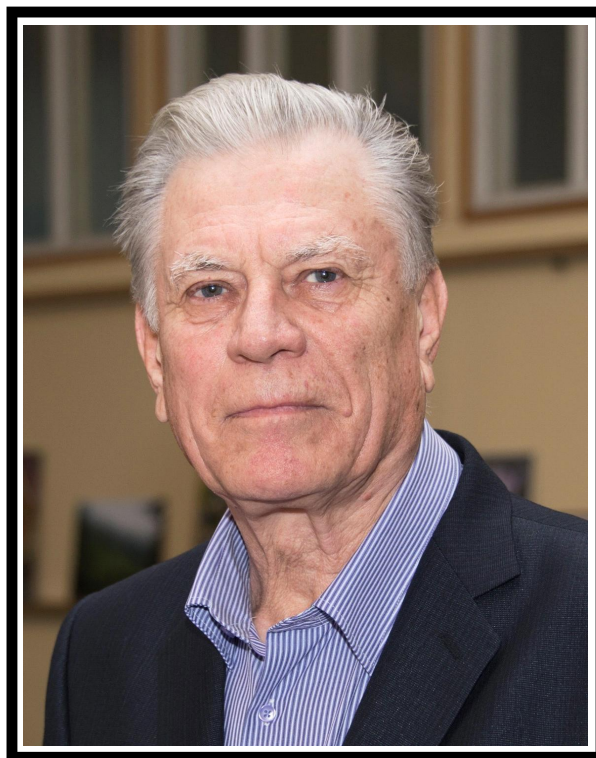
<i>Бакушев С.В.</i>	
Некоторые теории прочности в геометрически нелинейной механике	12
<i>Безрукова Е.С., Горенков А.О., Селяев В.П.</i>	
Верификация методов определения коэффициентов диффузии	25
<i>Куприянов В.Н., Иванцов А.И.</i>	
Тепловое старение полимерсодержащих теплоизоляционных материалов в наружных стенах	31
<i>Куприяшкина Л.И., Карандашов Д.Л., Муханов М.А., Родькина Д.А.</i>	
Климатическая стойкость вакуумных теплоизоляционных панелей	37
<i>Низина Т.А., Низин Д.Р., Канаева Н.С., Климентьева Д.А.</i>	
Фрактальный анализ процесса деформирования эпоксидных полимеров под действием растягивающих напряжений	42
<i>Пухаренко Ю.В., Морозов В.И., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И.</i>	
Диаграммы разрушения цементных композитов, армированных аморфнометаллической фиброй	50
<i>Соколова Ю.А., Акулова М.В., Исакулов Б.Р.</i>	
Исследование механических свойств серосодержащих арболитовых блоков	56
<i>Трещев А.А., Завьялова Ю.А., Лапшина М.А.</i>	
Вариант модели деформирования ортотропных композитных материалов	62
<i>Уткина В.Н., Безрукова Е.С.</i>	
Исследование устойчивости конструктивной системы высотного общественного здания в программных комплексах ЛИРА-САПР и STARKES	69
<i>Фомина Н.Н., Исмагилов А.Р.</i>	
Исследование дисперсности пигментов и наполнителей лакокрасочных материалов	74

CONTENT

<i>Anpilov S.M., Eryshev V.A., Petrov V.V., Selyaev V.P., Sorochaykin A.N., Travush V.I., Shestakov A.A.</i> Gennady Vasilyevich Murashkin (1936-2020). Obituary	9
---	---

ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

<i>Bakushev S.V.</i> Some theories of failure in geometrically nonlinear mechanics	12
<i>Bezrukova E.S., Gorenkov A.O., V.P. Selyaev</i> Verification of methods for determining diffusion coefficient	25
<i>Kupriyanov V.N., Ivantsov A.I.</i> Thermal aging of polymer-containing thermal insulation materials in exterior walls	31
<i>Kupryashkina L.I., Karandashov D.I., Mukhanov M.A., Rodkina D.A.</i> Climate resistance of vacuum insulation panels	37
<i>Nizina T.A., Nizin D.R., Kanaeva N.S., Klimenteva D.A.</i> Fractal analysis of the deformation process of epoxy polymers under tensile stress	42
<i>Pukhareenko Yu.V., Morozov V.I., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I.</i> Diagrams of destruction of cement composite materials reinforced with amorphous metal fibers	50
<i>Sokolova Yu.A., Akulova M.V., Isakulov B.R.</i> Study of the mechanical properties of sulphur-containing arbolite blocks	56
<i>Treschev A.A., Zavyalova Yu.A., Lapshina M.A.</i> Variant of the orthotropic deformation model composite material	62
<i>Utkina V.N., Bezrukova E.S.</i> Investigation of the stability of the structural system of a high-rise public building in the software complexes LIRA-CAD and STARKES	69
<i>Fomina N.N., Ismagilov A.R.</i> Study of the dispersion of pigments, paint and varnish materials fillers	74



*Мурашкин Геннадий Васильевич
(24 марта 1936 - 19 мая 2020)*

19 мая 2020 года на 85-м году ушел из жизни известный ученый, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, Почетный строитель России, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, профессор, доктор технических наук **Геннадий Васильевич Мурашкин**.

Похоронили его в городе Самара, именно здесь он жил, учился и работал...

Геннадий Васильевич прожил честную и достойную жизнь. Талант его универсален и исключителен.

После окончания инженерно-строительного института в г. Куйбышев Г.В. Мурашкин начал трудовую деятельность с 1 сентября 1958 года прошел путь от мастера завода железобетонных конструкций строительно-монтажного треста «Орджоникидзетрансстрой» на ст. Беслан до заведующего кафедрой железобетонных и каменных конструкций Самарского государственного архитектурно-строительного университета (КуИСИ-СГАСА-СГАСУ).

Основными направлениями научной деятельности Геннадия Васильевича были со-

здание и исследование конструкций из бетона, твердеющего под давлением. Обработка конструкций давлением в процессе их изготовления, позволяет на обычных цементах и заполнителях получать бетоны высокой прочности и исключительной морозостойкости.

С 1 октября 1960 года Мурашкин Г.В. по 23 марта 2013 года работал в КуИСИ-СГАСА-СГАСУ, из них 31 год - с 11 мая 1982 года по 23 марта 2013 года - занимал пост заведующего кафедрой Железобетонные и каменные конструкции. Не занимая каких-либо других административных должностей, он был ориентирован на институциональное оформление самарского сообщества ученых-строителей, защитив 13 марта 1987 года докторскую диссертацию, он стал первым студентом из числа выпускников КуИСИ, который получил ученую степень доктора наук.

Геннадий Васильевич организовал и был председателем первого в КуИСИ-СГАСА-СГАСУ диссертационного совета до 13 марта 2013 года.

С 1987 года он обучил, подготовил несколько поколений пытливых умов, студен-



тов, кандидатов и докторов наук по специальности: Строительные конструкции, здания и сооружения, которые в последствии продолжили изучение великой науки и заняли весомое место в жизни.

С 2015 года Г.В. Мурашкин работал профессором кафедры «Теория сооружений и строительные конструкции» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А, затем с 1 сентября 2018 года до самой смерти профессором кафедры «Строительные конструкции» Самарского государственного технического университета.

За большой вклад в развитие строительной науки он был избран член-корреспондентом РААСН, возглавил Самарское региональное отделение этой академической организации, максимально способствовал становлению и развитию мировой науки, строительной отрасли СССР, России.

Результаты исследований Г.В. Мурашкина нашли отражение в его многочисленных научных и учебно-методических трудах, включая монографии, учебные пособия, отраслевые технические условия, руководящие документы, авторские свидетельства и патенты на изобретения. Монографии и учебные пособия, изданные с авторским участием Геннадия Васильевича, используются в российских и зарубежных вузах.

Г.В. Мурашкин принимал участие во многих международных конференциях, читал лекции в Кардиффском королевском университете (Великобритания) и Дармштадском университете (Германия). Геннадий Васильевич всегда успешно сочетал научную деятельность с преподавательской работой и

оказанием технической помощи (пуск ВАЗа, реконструкция Куйбышевской ГЭС, нефтепровод «Дружба», металлургический завод (г. Куйбышев) и ряд других крупных промышленных предприятий Самарской (Куйбышевской) области).

Одной из наиболее интересных работ последних лет было участие в реконструкции крупнейшего в Европе трекового стадиона в Тольятти. Конструкция опалубки, разработанная Г.В. Мурашкиным, оказалась более рациональной и позволила сократить сроки бетонирования колонн с трех лет до одного года, что существенно снизило затраты на строительство. Выполненные под руководством Геннадия Васильевича научные работы по реконструкции стадиона отмечены дипломом РААСН.

Учитывая научную и практическую деятельность, издание Hubers Who is Who включило Геннадия Васильевича Мурашкина в «Библиографическую энциклопедию успешных людей России», изданную в Швейцарии в 2009 году.

С 2012 года Г.В. Мурашкин член редакционного совета научного журнала «Основы экономики, управления и права», с 2019 года - член редакционной коллегии научно-практического журнала «Эксперт: теория и практика».

Выражаем глубочайшие соболезнования Наталье Владимировне, Василию Геннадьевичу, родным и близким в связи с постигшей семью утратой. Скорбим вместе с Вами и разделяем Вашу боль.

Светлая память о выдающемся ученом, учителе, друге, замечательном человеке - Геннадии Васильевиче Мурашкине - навсегда сохранится в наших сердцах.

*Анпилов С.М., Ерышев В.А.,
Петров В.В., Селяев В.П., Сорочайкин А.Н.,
Травуш В.И., Шестаков А.А.*



GENNADY VASILYEVICH MURASHKIN (1936-2020). OBITUARY

Murashkin Gennady Vasilyevich, Honored Scientist of Russian Federation, Honored Builder of Russia, corresponding member of the Russian Academy of architecture and building sciences, professor, doctor of technical science died on 19 May 2020 at the 85th year of life.

He was buried in the city of Samara, where he lived and worked...

Gennady Vasilyevich has lived an honest and dignified life. His talent is universal and exclusive.

We express our deepest condolences to Natalia Vladimirovna, Vasily Gennadyevich, relatives and friends. We mourn along with you and share your pain.

The memory of a distinguished scientist, teacher, friend, a wonderful man - Gennady Vasilyevich Murashkin - will always be in our hearts.

*Anpilov S.M., Eryshev V.A., Petrov V.V., Selyaev V.P.,
Sorochoykin A.N., Travush V.I., Shestakov A.A.*

НЕКОТОРЫЕ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ В ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ МЕХАНИКЕ*

© 2020 С.В. Бакушев**

Для массивных тел, механическое поведение которых описывается уравнениями геометрически и физически нелинейной теории упругости В.В. Новожилова, рассматривается построение критериев прочности теории наибольших нормальных напряжений, теории прочности наибольших удлинений, теории прочности наибольших касательных напряжений и теории прочности Мора. Рассматриваемые критерии прочности записываются в терминах напряжений, действующих по граням элементарного параллелепипеда, выделенного в точке деформированного тела, то есть в состоянии после деформации. Приводятся формулы перехода от напряжений, действующих по граням элементарного параллелепипеда, выделенного в точке деформированного тела, то есть в состоянии после деформации, к обобщённым напряжениям, действующим по граням косоугольного параллелепипеда, рёбра которого до деформации были параллельны осям декартовой системы координат. Тем самым, записывая критерии прочности в терминах обобщённых напряжений, осуществляется переход к системе координат точек тела до деформации. Показано, что для оценки прочности в точке тела, механическое поведение которого описывается уравнениями геометрически и физически нелинейной теории упругости В.В. Новожилова, необходимо в этой точке знать и напряжённое и деформированное состояние, то есть решить задачу нелинейной теории упругости полностью. Сформулирован расчётный алгоритм для оценки прочности в точке нелинейно деформируемого тела. Отмечено, что предложенные в статье критерии прочности для деформируемых тел, механическое поведение которых описывается математическими моделями с учётом и физической и геометрической нелинейности, требуют всестороннего экспериментального обоснования.

Ключевые слова: нелинейная теория упругости, напряжения, деформации, обобщённые напряжения, прочность, критерии прочности.

1. Введение.

Расчёт конструкций и массивных тел с использованием уравнений нелинейной теории упругости В.В. Новожилова [1, 2, 3] связан со значительными математическими трудностями. Однако, отказ от принципа затвердевания, переход к записи уравнений равновесия в системе координат точек тела до деформации, что предопределяет рассмотрение напряжённого и деформированного состояний упругого тела в одной системе координат, учёт квадратичных слагаемых

в геометрических соотношениях и так далее, позволяют выявить новые качественные эффекты в деформируемых телах. На это обстоятельство указывал ещё А.И. Лурье [4].

Вместе с тем, расчёт конструкций не заканчивается на стадии определения напряжений, деформаций и перемещений в каждой точке тела. Целью расчёта является оценка прочности конструкции.

Прочность деформируемого твёрдого тела, находящегося в условиях сложного напряжённого и деформированного состояния,

* Работа представлена в качестве доклада на XI Академических чтениях РААСН - Международной научно-технической конференции «Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций», посвященной памяти первого Председателя Научного совета РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» Почетного члена РААСН, д.т.н., профессора Зайцева Юрия Владимировича (Саранск, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», 2020 год).

** Бакушев Сергей Васильевич (bakuchsv@mail.ru) - доктор технических наук, профессор, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Россия, Пенза.



оценивается в соответствии с *критерием* или *теорией прочности*. Критерий или теория прочности устанавливает некоторую взаимосвязь между главными напряжениями так, что бы в состоянии предельного равновесия эта взаимосвязь, обозначаемая как *эквивалентное напряжение*, численно не превосходила *опасное* напряжение, определяемое из опытов на осевое растяжение. В настоящее время известно достаточно много теорий прочности, разработанных для тех или иных материалов. Не все из них используются в практике проектирования, поскольку ещё не прошли всестороннюю экспериментальную проверку. Достаточно назвать такие, ставшие уже классическими, теории прочности, как первая теория прочности, восходящая своими корнями к работам Г. Галилея; вторая теория прочности, основы которой были заложены Э. Мариоттом (окончательно она была оформлена А. Сен-Венаном); третья теория прочности (теория прочности наибольших касательных напряжений), предложенная Ш. Кулоном и экспериментально обоснованная А. Треска; первая энергетическая теория прочности, разработанная Э. Бельтрами на основе идей, высказанных Д. Максвеллом; вторая энергетическая теория прочности, предложенная М. Губером. Все вышеперечисленные теории прочности предназначены для оценки прочности материалов одинаково сопротивляющихся растяжению и сжатию.

Значительный вклад в развитие теорий прочности материалов, по-разному сопротивляющихся растяжению и сжатию, внесли такие учёные-механики, как О. Мор, К. Шлейхер, Ю.И. Ягн, П.П. Баландин, И.Н. Миролубов, Я.Б. Фридман, Г.А.Гениев, В.В. Новожилов, И.И. Гольденблат, В.А.Копнов, М.М. Филоненко-Бородич, Н.И. Карпенко и многие другие.

Самым первым шагом в направлении построения критериев прочности материалов при сложном нагружении является предложение В.В. Новожилова и О.Г. Рыбакиной [5], обобщившими критерий Коффина [6] на случай нециклического нагружения. Особен-

ностью критерия В.В. Новожилова О.Г. Рыбакиной является то, что в него входят и инвариант напряжений, и инвариант деформаций, в отличие от классических критериев.

Достаточно подробное описание предельного состояния материала в локальной области дано в монографии А.П. Филина [7].

В работе Смирнова А.Ф. «Сопротивление материалов» [8] отмечается, что одним из существенных недостатков имеющихся теорий прочности является отсутствие необходимого объёма экспериментальных данных, позволяющих надёжно оценивать достоверность той или иной теории в общем случае объёмного напряжённого состояния. Этот недостаток связан в основном с техническими трудностями постановки соответствующих опытов.

Второй, также существенный недостаток имеющихся теорий заключается в том, что при их построении материал рассматривается как сплошная однородная среда без учёта его микроструктуры. Вместе с тем, выполненные в последнее время экспериментальные и теоретические исследования показали, что микроструктура реальных твёрдых тел оказывает большое влияние на их деформацию и разрушение.

К недостаткам имеющихся теорий прочности следует отнести и то, что соответствующими критериями наступления предельного напряжённого состояния материала не учитывается влияние таких факторов, как температура, время, а также масштабный фактор.

Указанные выше недостатки имеющихся теорий ограничивают область их применения и во всех случаях делают необходимым учёт приближённости получаемых с их помощью результатов, а также наличия экспериментальных данных, в достаточной степени подтверждающих ту или иную теорию.

В работах [9, 10] отмечается, что основой анализа характеристик прочности, ресурса живучести и безопасности элементов машин и конструкций в штатных и аварийных ситуациях являются уравнения и критерии линейной и нелинейной механики деформи-



рования и разрушения. Решение задачи оценки прочности включает в себя создание обобщённых математических и физических моделей сложных технологических, рабочих и аварийных процессов в технических системах. В статье [11] на основе идеи проф. Н. Н. Давиденкова и проф. Я. Б. Фридмана, путём сопряжения линейного паспорта прочности для разрывов (пинч-эффект) и нелинейного паспорта аналитической теории прочности при разрушении сдвигом развита единая теория прочности; впервые предложено описание прочности нового класса материалов, обладающих биупругостью. В статье [12] рассматривается задача о прочности пластины из хрупкого материала, имеющей сквозные трещины нормального отрыва. В отличие от подхода, основанного на сингулярном решении классической теории упругости для плоскости с трещиной и аппарате линейной механики разрушения, предлагается использовать несингулярные решения, полученные на основе обобщённой теории упругости, и, в результате, реализовать метод, традиционный для оценки прочности тел с концентрацией напряжений, основанный на критерии максимальных напряжений. В работе [13] при разработке подхода к оценке прочности мёрзлого торфяного грунта показана справедливость гипотезы о том, что нарушение прочности материала определяется максимальным положительным упругим удлинением материала. В статье [14] рассматривается вариант энергетической теории прочности, в которой помимо энергии формоизменения, затрачиваемой на вязкую (пластическую) деформацию, учитывается вклад в энергию разрушения только одной составляющей шарового тензора (среднего напряжения), нормальной к образовавшейся магистральной трещине. Разработанная теория позволила получить ряд прикладных результатов, а также объяснить некоторые особенности достижения предельного состояния при двухосном нагружении конструкционных материалов, и может быть использована при оценке механических свойств конструкционных материалов.

В работах [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22] рассматриваются современные теории прочности бетонных и железобетонных конструкций. Проблемы прочности наноструктурных и композитных материалов освещаются в работах [23, 24, 25, 26, 27, 28]. Вопросы построения критериев прочности на основе теории и идей В.В. Новожилова рассмотрены в работах [29, 30, 31, 32, 33, 34].

В данной работе рассматривается построение феноменологических критериев прочности теории наибольших нормальных напряжений, теории прочности наибольших удлинений, теории прочности наибольших касательных напряжений и теории прочности Мора для деформируемых тел, механическое поведение которых описывается уравнениями геометрически и физически нелинейной теории упругости В.В. Новожилова.

2. Напряжения и деформации в нелинейной теории упругости В.В. Новожилова.

В нелинейной теории упругости В.В. Новожилова компоненты тензора деформации в декартовой прямоугольной системе координат XOY , заданной в теле до приложения нагрузки (до деформации)

$$\mathbf{T}_\varepsilon^* = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}^* & \frac{1}{2}\varepsilon_{xy}^* & \frac{1}{2}\varepsilon_{xz}^* \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{yx}^* & \varepsilon_{yy}^* & \frac{1}{2}\varepsilon_{yz}^* \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{zx}^* & \frac{1}{2}\varepsilon_{zy}^* & \varepsilon_{zz}^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

определяются с учётом квадратичных слагаемых:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx}^* &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right]; \\ \varepsilon_{yy}^* &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]; \\ \varepsilon_{zz}^* &= \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right]; \end{aligned} \quad (2)$$



$$\varepsilon_{xy}^* = \varepsilon_{yx}^* = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y};$$

$$\varepsilon_{yz}^* = \varepsilon_{zy}^* = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y};$$

$$\varepsilon_{zx}^* = \varepsilon_{xz}^* = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z}.$$

Тензор напряжений в декартовой прямоугольной системе координат $O'X'Y'Z'$, заданной в деформированном теле (после деформации) имеет вид:

$$\mathbf{T}_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{\xi\xi} & \sigma_{\xi\eta} & \sigma_{\xi\zeta} \\ \sigma_{\eta\xi} & \sigma_{\eta\eta} & \sigma_{\eta\zeta} \\ \sigma_{\zeta\xi} & \sigma_{\zeta\eta} & \sigma_{\zeta\zeta} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Здесь $\sigma_{\xi\xi}, \sigma_{\xi\eta} = \sigma_{\eta\xi}, \sigma_{\xi\zeta} = \sigma_{\zeta\xi}, \sigma_{\eta\eta},$

$\sigma_{\eta\zeta} = \sigma_{\zeta\eta}, \sigma_{\zeta\zeta}$ – проекции напряжений, действующих по граням элементарного параллелепипеда с рёбрами, параллельными

осям X', Y' и Z' , выделенного в точке M^* деформированного тела, на оси декартовой системы координат $O'X'Y'Z'$ (рис. 1)¹; ξ, η и ζ – декартовы координаты точек тела после его деформации.

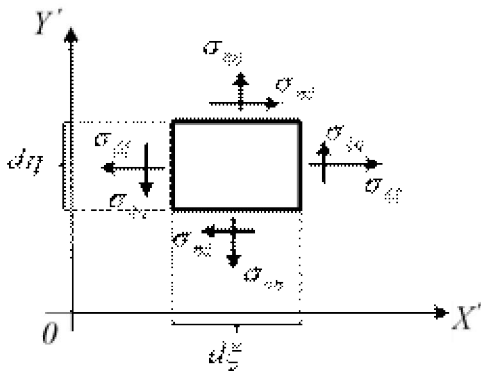


Рис. 1. Напряжения на гранях элементарного параллелепипеда в теле после деформации в проекции на плоскость $OX'Y'$

Главные напряжения $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ в системе координат точек тела после деформации определяются по формулам [1]:

¹ На рис. 1, для наглядности, показан тонкий элементарный параллелепипед с единичной толщиной в направлении оси Z' .

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} \sin\left(\psi + \frac{2}{3}\pi\right) + \frac{1}{3}\sigma; \\ \sigma_2 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} \sin(\psi) + \frac{1}{3}\sigma; \\ \sigma_3 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} \sin\left(\psi + \frac{4}{3}\pi\right) + \frac{1}{3}\sigma. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $\sigma, \bar{\sigma}, \psi$ – вспомогательные инварианты тензора напряжений (3):

$$\sigma = \sigma_{\xi\xi} + \sigma_{\eta\eta} + \sigma_{\zeta\zeta};$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{\xi\xi} - \sigma_{\eta\eta})^2 + (\sigma_{\eta\eta} - \sigma_{\zeta\zeta})^2 + (\sigma_{\zeta\zeta} - \sigma_{\xi\xi})^2 + 6(\sigma_{\xi\eta}^2 + \sigma_{\eta\zeta}^2 + \sigma_{\zeta\xi}^2)};$$

$$\psi = \frac{1}{3} \arcsin\left(\frac{\sigma_3 \sqrt{3}}{2\bar{\sigma}^3}\right) = \arctg\left[\frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sqrt{3}(\sigma_1 - \sigma_3)}\right];$$

$$-\frac{\pi}{6} \leq \psi \leq \frac{\pi}{6}, \quad (5)$$

причём

$$\sigma_3 = -3 \begin{vmatrix} \sigma_{\xi\xi} - \frac{1}{3}\sigma & \sigma_{\xi\eta} & \sigma_{\xi\zeta} \\ \sigma_{\eta\xi} & \sigma_{\eta\eta} - \frac{1}{3}\sigma & \sigma_{\eta\zeta} \\ \sigma_{\zeta\xi} & \sigma_{\zeta\eta} & \sigma_{\zeta\zeta} - \frac{1}{3}\sigma \end{vmatrix}.$$

Отмечается [1], что хотя матрицы $\mathbf{T}_\varepsilon^*$ и $\mathbf{T}_\sigma$ определяют симметричные тензоры второго ранга, однако эти два тензора заданы в двух, по существу различных системах координат. Тензор $\mathbf{T}_\varepsilon^*$ определяется в декартовой системе координат точек тела до деформации $OXYZ$. Тензор $\mathbf{T}_\sigma$ определяется в декартовой системе координат точек тела после деформации $O'X'Y'Z'$. Для установления связи между тензорами $\mathbf{T}_\varepsilon^*$ и $\mathbf{T}_\sigma$ их необходимо преобразовать к одной системе координат. При этом, если определить

тензор деформации в декартовой системе координат точек тела после деформации, то это было бы равносильно отказу от “материальных” координат и переходу к “пространственным” координатам, что признано нерациональным, так как в теории упругости конечной целью обычно является определение перемещений точек сплошной среды, для которой задаются первоначальная форма, условия закрепления и нагрузка. Тензор напряжения, определённый в декартовой системе координат точек тела до деформации $OXYZ$ имеет вид:

$$\mathbf{T}_\sigma^* = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}^* & \sigma_{xy}^* & \sigma_{xz}^* \\ \sigma_{yx}^* & \sigma_{yy}^* & \sigma_{yz}^* \\ \sigma_{zx}^* & \sigma_{zy}^* & \sigma_{zz}^* \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Здесь x, y, z – криволинейные координаты, являющиеся декартовыми координатами для тела в его исходном положении;

$$\sigma_{xx}^*, \sigma_{yy}^*, \sigma_{zz}^*, \sigma_{xy}^* = \sigma_{yx}^*, \sigma_{yz}^* = \sigma_{zy}^*,$$

$\sigma_{zx}^* = \sigma_{xz}^*$ – так называемые обобщённые напряжения, связанные с истинными напряжениями $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy} \neq \sigma_{yx}, \sigma_{yz} \neq \sigma_{zy},$

$\sigma_{zx} \neq \sigma_{xz}$, действующими по граням косоугольного параллелепипеда в направлении единичных ортов $\bar{i}_x, \bar{i}_y$ и $\bar{i}_z$, задающих ориентацию граней косоугольного параллелепипеда (рис. 2)², рёбра которого до деформации были параллельны осям декартовой системы координат $OXYZ$, соотношениями:

$$\sigma_{xx}^* = \frac{A_x^*}{A_x} \cdot \frac{\sigma_{xx}}{1 + E_x}; \quad \sigma_{xy}^* = \frac{A_x^*}{A_x} \cdot \frac{\sigma_{xy}}{1 + E_y};$$

$$\sigma_{xz}^* = \frac{A_x^*}{A_x} \cdot \frac{\sigma_{xz}}{1 + E_z};$$

$$\sigma_{yx}^* = \frac{A_y^*}{A_y} \cdot \frac{\sigma_{yx}}{1 + E_x}; \quad \sigma_{yy}^* = \frac{A_y^*}{A_y} \cdot \frac{\sigma_{yy}}{1 + E_y};$$

² На рис. 2, для наглядности, показан тонкий элементарный параллелепипед с единичной толщиной в направлении оси Z' .

$$\sigma_{yz}^* = \frac{A_y^*}{A_y} \cdot \frac{\sigma_{yz}}{1 + E_z};$$

$$\sigma_{zx}^* = \frac{A_z^*}{A_z} \cdot \frac{\sigma_{zx}}{1 + E_x}; \quad \sigma_{zy}^* = \frac{A_z^*}{A_z} \cdot \frac{\sigma_{zy}}{1 + E_y};$$

$$\sigma_{zz}^* = \frac{A_z^*}{A_z} \cdot \frac{\sigma_{zz}}{1 + E_z}. \quad (7)$$

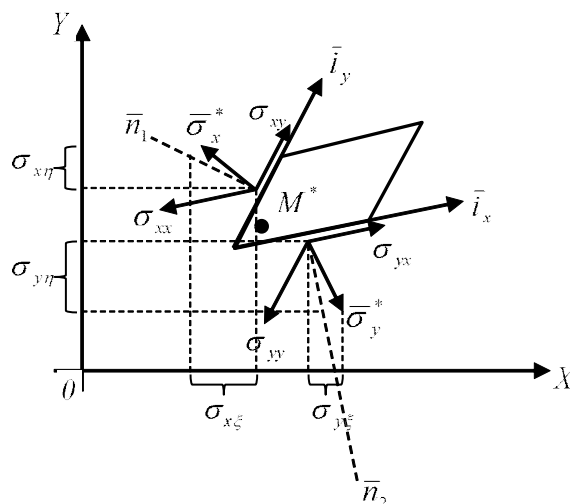


Рис. 2. Напряжения на гранях косоугольного параллелепипеда в теле после деформации в проекции на плоскость OXY

В формулах (6) E_x, E_y, E_z – относительное удлинение волокон сплошной среды, параллельных до деформации осям декартовой системы координат:

$$E_x = \sqrt{1 + 2\varepsilon_{xx}^*} - 1; \quad E_y = \sqrt{1 + 2\varepsilon_{yy}^*} - 1;$$

$$E_z = \sqrt{1 + 2\varepsilon_{zz}^*} - 1.$$

$\frac{A_x^*}{A_x}, \frac{A_y^*}{A_y}, \frac{A_z^*}{A_z}$ – отношение площадей элементарных площадок, выделенных в сплошной среде после деформации, к их площадям до деформации, которые до деформации были перпендикулярны осям декартовой системы координат $OXYZ$:

$$A_x^* = A_x \sqrt{(1 + 2\varepsilon_{yy}^*)(1 + 2\varepsilon_{zz}^*) - \varepsilon_{yz}^{*2}},$$

$$A_y^* = A_y \sqrt{(1 + 2\varepsilon_{xx}^*)(1 + 2\varepsilon_{zz}^*) - \varepsilon_{zx}^{*2}},$$



$$A_z^* = A_z \sqrt{(1 + 2\varepsilon_{xx}^*)(1 + 2\varepsilon_{yy}^*) - \varepsilon_{xy}^{*2}}.$$

Главные обобщённые напряжения $\sigma_1^* \geq \sigma_2^* \geq \sigma_3^*$ в системе координат точек тела до деформации определяются по формулам [1]:

$$\begin{aligned} \sigma_1^* &= \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}^* \sin\left(\psi^* + \frac{2}{3}\pi\right) + \frac{1}{3} \sigma^*; \\ \sigma_2^* &= \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}^* \sin(\psi^*) + \frac{1}{3} \sigma^*; \\ \sigma_3^* &= \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}^* \sin\left(\psi^* + \frac{4}{3}\pi\right) + \frac{1}{3} \sigma^*. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь σ^* , $\bar{\sigma}^*$, ψ^* – вспомогательные инварианты тензора обобщённых напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma^* &= \sigma_{xx}^* + \sigma_{yy}^* + \sigma_{zz}^*; \\ \bar{\sigma}^* &= \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{xx}^* - \sigma_{yy}^*)^2 + (\sigma_{yy}^* - \sigma_{zz}^*)^2 + (\sigma_{zz}^* - \sigma_{xx}^*)^2 + 6(\sigma_{xy}^{*2} + \sigma_{yz}^{*2} + \sigma_{zx}^{*2})}; \\ \psi^* &= \frac{1}{3} \arcsin\left(\frac{\sigma_3^* \sqrt{3}}{2\bar{\sigma}^*}\right) = \arctg\left[\frac{2\sigma_2^* - \sigma_1^* - \sigma_3^*}{\sqrt{3}(\sigma_1^* - \sigma_3^*)}\right]; \\ -\frac{\pi}{6} &\leq \psi^* \leq \frac{\pi}{6}, \end{aligned} \quad (9)$$

причём

$$\sigma_3^* = -3 \begin{vmatrix} \sigma_{xx}^* - \frac{1}{3}\sigma^* & \sigma_{xy}^* & \sigma_{xz}^* \\ \sigma_{yx}^* & \sigma_{yy}^* - \frac{1}{3}\sigma^* & \sigma_{yz}^* \\ \sigma_{zx}^* & \sigma_{zy}^* & \sigma_{zz}^* - \frac{1}{3}\sigma^* \end{vmatrix}.$$

Выражение напряжений, действующих по граням элементарного параллелепипеда, выделенного в деформированном теле, с рёбрами параллельными осям декартовой системы координат $O'X'Y'Z'$, через обобщённые напряжения, имеет вид [35]:

$$\sigma_{\xi\xi} = \frac{1}{\Delta} [(\alpha_{22}\alpha_{33} - \alpha_{23}\alpha_{32})\sigma_{x\xi}^* + (\alpha_{13}\alpha_{32} -$$

$$- \alpha_{12}\alpha_{33})\sigma_{y\xi}^* + (\alpha_{12}\alpha_{23} - \alpha_{13}\alpha_{22})\sigma_{z\xi}^*]$$

$$\sigma_{\xi\eta} = \frac{1}{\Delta} [(\alpha_{22}\alpha_{33} - \alpha_{23}\alpha_{32})\sigma_{x\eta}^* + (\alpha_{13}\alpha_{32} -$$

$$- \alpha_{12}\alpha_{33})\sigma_{y\eta}^* + (\alpha_{12}\alpha_{23} - \alpha_{13}\alpha_{22})\sigma_{z\eta}^*]$$

$$\sigma_{\xi\zeta} = \frac{1}{\Delta} [(\alpha_{22}\alpha_{33} - \alpha_{23}\alpha_{32})\sigma_{x\zeta}^* + (\alpha_{13}\alpha_{32} -$$

$$- \alpha_{12}\alpha_{33})\sigma_{y\zeta}^* + (\alpha_{12}\alpha_{23} - \alpha_{13}\alpha_{22})\sigma_{z\zeta}^*]$$

$$\sigma_{\eta\xi} = \frac{1}{\Delta} [(\alpha_{23}\alpha_{31} - \alpha_{21}\alpha_{33})\sigma_{x\xi}^* + (\alpha_{11}\alpha_{33} -$$

$$- \alpha_{13}\alpha_{31})\sigma_{y\xi}^* + (\alpha_{13}\alpha_{21} - \alpha_{11}\alpha_{23})\sigma_{z\xi}^*]$$

$$\sigma_{\eta\eta} = \frac{1}{\Delta} [(\alpha_{23}\alpha_{31} - \alpha_{21}\alpha_{33})\sigma_{x\eta}^* + (\alpha_{11}\alpha_{33} -$$

$$- \alpha_{13}\alpha_{31})\sigma_{y\eta}^* + (\alpha_{13}\alpha_{21} - \alpha_{11}\alpha_{23})\sigma_{z\eta}^*]$$

$$\sigma_{\eta\zeta} = \frac{1}{\Delta} [(\alpha_{23}\alpha_{31} - \alpha_{21}\alpha_{33})\sigma_{x\zeta}^* + (\alpha_{11}\alpha_{33} -$$

$$- \alpha_{13}\alpha_{31})\sigma_{y\zeta}^* + (\alpha_{13}\alpha_{21} - \alpha_{11}\alpha_{23})\sigma_{z\zeta}^*]$$

$$\sigma_{\zeta\xi} = \frac{1}{\Delta} [(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})\sigma_{x\xi}^* + (\alpha_{12}\alpha_{31} -$$

$$- \alpha_{11}\alpha_{32})\sigma_{y\xi}^* + (\alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}\alpha_{21})\sigma_{z\xi}^*]$$

$$\sigma_{\zeta\eta} = \frac{1}{\Delta} [(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})\sigma_{x\eta}^* + (\alpha_{12}\alpha_{31} -$$

$$- \alpha_{11}\alpha_{32})\sigma_{y\eta}^* + (\alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}\alpha_{21})\sigma_{z\eta}^*]$$

$$\sigma_{\zeta\zeta} = \frac{1}{\Delta} [(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})\sigma_{x\zeta}^* + (\alpha_{12}\alpha_{31} -$$

$$- \alpha_{11}\alpha_{32})\sigma_{y\zeta}^* + (\alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}\alpha_{21})\sigma_{z\zeta}^*] \quad (10)$$

Здесь



$$\alpha_{11} = \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \left(1 + \frac{\partial w}{\partial z}\right) - \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y};$$

$$\alpha_{12} = \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} - \left(1 + \frac{\partial w}{\partial z}\right) \frac{\partial u}{\partial y};$$

$$\alpha_{13} = \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} - \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \frac{\partial u}{\partial z};$$

$$\alpha_{21} = \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} - \left(1 + \frac{\partial w}{\partial z}\right) \frac{\partial v}{\partial x};$$

$$\alpha_{22} = \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) \left(1 + \frac{\partial w}{\partial z}\right) - \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x};$$

$$\alpha_{23} = \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial x} - \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) \frac{\partial v}{\partial z};$$

$$\alpha_{31} = \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} - \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \frac{\partial w}{\partial x};$$

$$\alpha_{32} = \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x} - \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) \frac{\partial w}{\partial y};$$

$$\alpha_{33} = \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x}.$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix} \neq 0.$$

Напряжения $\sigma_{x\xi}^*, \sigma_{y\xi}^*, \sigma_{z\xi}^*, \sigma_{x\eta}^*, \sigma_{y\eta}^*, \sigma_{z\eta}^*, \sigma_{x\zeta}^*, \sigma_{y\zeta}^*, \sigma_{z\zeta}^*$, определяющие проекции обобщённых напряжений $\bar{\sigma}_x^*, \bar{\sigma}_y^*$ и $\bar{\sigma}_z^*$, действующих на площадках, которые до деформации имели нормали, совпадающие по направлению с осями декартовой системы координат $OXYZ$, на эти оси, выражаются через обобщённые напряжения $\sigma_{xx}^*, \sigma_{yx}^*, \sigma_{zx}^*, \sigma_{xy}^*, \sigma_{yy}^*, \sigma_{zy}^*, \sigma_{xz}^*, \sigma_{yz}^*, \sigma_{zz}^*$ по формулам [1]:

$$\sigma_{x\xi}^* = \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) \sigma_{xx}^* + \frac{\partial u}{\partial y} \sigma_{xy}^* + \frac{\partial u}{\partial z} \sigma_{xz}^*;$$

$$\sigma_{x\eta}^* = \frac{\partial v}{\partial x} \sigma_{xx}^* + \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \sigma_{xy}^* + \frac{\partial v}{\partial z} \sigma_{xz}^*;$$

$$\sigma_{y\xi}^* = \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) \sigma_{yx}^* + \frac{\partial u}{\partial y} \sigma_{yy}^* + \frac{\partial u}{\partial z} \sigma_{yz}^*;$$

$$\sigma_{y\eta}^* = \frac{\partial v}{\partial x} \sigma_{yx}^* + \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \sigma_{yy}^* + \frac{\partial v}{\partial z} \sigma_{yz}^*;$$

$$\sigma_{z\xi}^* = \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) \sigma_{zx}^* + \frac{\partial u}{\partial y} \sigma_{zy}^* + \frac{\partial u}{\partial z} \sigma_{zz}^*;$$

$$\sigma_{z\eta}^* = \frac{\partial v}{\partial x} \sigma_{zx}^* + \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \sigma_{zy}^* + \frac{\partial v}{\partial z} \sigma_{zz}^*;$$

$$\sigma_{x\zeta}^* = \frac{\partial w}{\partial x} \sigma_{xx}^* + \frac{\partial w}{\partial y} \sigma_{xy}^* + \left(1 + \frac{\partial w}{\partial z}\right) \sigma_{xz}^*;$$

$$\sigma_{y\zeta}^* = \frac{\partial w}{\partial x} \sigma_{yx}^* + \frac{\partial w}{\partial y} \sigma_{yy}^* + \left(1 + \frac{\partial w}{\partial z}\right) \sigma_{yz}^*;$$

$$\sigma_{z\zeta}^* = \frac{\partial w}{\partial x} \sigma_{zx}^* + \frac{\partial w}{\partial y} \sigma_{zy}^* + \left(1 + \frac{\partial w}{\partial z}\right) \sigma_{zz}^*.$$

(11)

Физические уравнения в нелинейной теории упругости В.В. Новожилова устанавливают связь между обобщёнными напряжениями и нелинейными деформациями. Для случая подобия девиаторов обобщённых напряжений и нелинейных деформаций, то есть когда фаза подобия девиаторов равна нулю, физические уравнения имеют вид [1]:

$$\sigma_{ij}^* - \frac{1}{3} \sigma^* \delta_{ij} = 2G^* \left(\gamma_{ij} - \frac{1}{3} e^* \delta_{ij} \right);$$

$$i, j = x, y, z. \quad (12)$$

Здесь δ_{ij} – символ Кронекера;

$$K^* = \frac{\sigma^*}{3e^*}; \quad G^* = \frac{\bar{\sigma}^*}{2\bar{e}^*}.$$

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} \varepsilon_{ij}^*, & \text{если } i = j; \\ \frac{1}{2} \varepsilon_{ij}^*, & \text{если } i \neq j, \end{cases}$$

$$e^* = \varepsilon_{xx}^* + \varepsilon_{yy}^* + \varepsilon_{zz}^*; \quad \bar{e}^* = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*)^2 +$$



$$+ (\varepsilon_{yy}^* - \varepsilon_{zz}^*)^2 + (\varepsilon_{zz}^* - \varepsilon_{xx}^*)^2 + \frac{3}{2} (\varepsilon_{xy}^{*2} + \varepsilon_{yz}^{*2} + \varepsilon_{zx}^{*2}), -$$

вспомогательные инварианты тензора деформаций (1).

$$\sigma^* = \sigma_{xx}^* + \sigma_{yy}^* + \sigma_{zz}^*; \quad \bar{\sigma}^* = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{xx}^* - \sigma_{yy}^*)^2 +$$

$$+ (\sigma_{yy}^* - \sigma_{zz}^*)^2 + (\sigma_{zz}^* - \sigma_{xx}^*)^2 + 6(\sigma_{xy}^{*2} + \sigma_{yz}^{*2} +$$

$$+ \sigma_{zx}^{*2}), - \text{вспомогательные инварианты тен-}$$

зора обобщённых напряжений (6).

Смешанные инварианты K^* и G^* можно рассматривать либо как функции инвариантов тензора нелинейных деформаций деформации: $K^* = K^*(e^*, \bar{e}^*)$, $G^* = G^*(e^*, \bar{e}^*)$, либо как функции инвариантов тензора обобщённых напряжений:

$K^* = K^*(\sigma^*, \bar{\sigma}^*)$, $G^* = G^*(\sigma^*, \bar{\sigma}^*)$. Коэффициенты K^* и G^* замыкающие уравнения определяют математическую модель рассматриваемой сплошной среды.

Уравнения равновесия в нелинейной теории упругости В.В.Новожилова устанавливают функциональные зависимости между нелинейными деформациями (2) и обобщёнными напряжениями (7) [1, 2]. При этом дифференциальные уравнения равновесия, выражающие условия равенства нулю главного вектора всех сил, действующих на объёмный элемент деформированного тела, путём проектирования этих сил на оси декартовой системы координат, направления которых не изменяются при деформации, имеют вид [1,2]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \sigma_{xx}^* + \frac{\partial u}{\partial y} \sigma_{xy}^* + \frac{\partial u}{\partial z} \sigma_{xz}^* \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \sigma_{yx}^* + \frac{\partial u}{\partial y} \sigma_{yy}^* + \right. \\ & \left. + \frac{\partial u}{\partial z} \sigma_{yz}^* \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \sigma_{zx}^* + \frac{\partial u}{\partial y} \sigma_{zy}^* + \right. \end{aligned}$$

$$\left. + \frac{\partial u}{\partial z} \sigma_{zz}^* \right] + DF_{\xi} = 0;$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial v}{\partial x} \sigma_{xx}^* + \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \sigma_{xy}^* + \frac{\partial v}{\partial z} \sigma_{xz}^* \right] +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial v}{\partial x} \sigma_{yx}^* + \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \sigma_{yy}^* + \right.$$

$$\left. + \frac{\partial v}{\partial z} \sigma_{yz}^* \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial v}{\partial x} \sigma_{zx}^* + \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \sigma_{zy}^* + \right.$$

$$\left. + \frac{\partial v}{\partial z} \sigma_{zz}^* \right] + DF_{\eta} = 0;$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial w}{\partial x} \sigma_{xx}^* + \frac{\partial w}{\partial y} \sigma_{xy}^* + \left(1 + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \sigma_{xz}^* \right] +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial w}{\partial x} \sigma_{yx}^* + \frac{\partial w}{\partial y} \sigma_{yy}^* + \right.$$

$$\left. + \left(1 + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \sigma_{yz}^* \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial w}{\partial x} \sigma_{zx}^* + \frac{\partial w}{\partial y} \sigma_{zy}^* + \right.$$

$$\left. + \left(1 + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \sigma_{zz}^* \right] + DF_{\zeta} = 0. \quad (13)$$

Здесь F_{ξ} , F_{η} , F_{ζ} - проекции объёмной силы на оси декартовой системы координат X, Y, Z в точке M^* деформированного тела; D - отношение объёма элемента тела после деформации к его объёму до деформации.

$$D = \begin{vmatrix} 1 + \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & 1 + \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & 1 + \frac{\partial w}{\partial z} \end{vmatrix}.$$

В дифференциальных уравнениях (13) положения точек деформированного тела определяются не декартовыми координатами ξ, η и ζ , а криволинейными координатами



тами x , y и z (которые являются декартовыми координатами для тела в его исходном положении).

К системе дифференциальных уравнений (13) необходимо добавить ещё условия на поверхности тела, на чём мы останавливаться не будем, так как условия на поверхности тела определяются формой тела и действующими внешними нагрузками.

Перейдём к формулировке некоторых теорий прочности в нелинейной теории упругости В.В. Новожилова.

3. Теории прочности в нелинейной теории упругости В.В. Новожилова.

Прочность материала, механическое поведение которого описывается уравнениями нелинейной теории упругости В.В. Новожилова, будем определять в точке *деформированного тела*. При этом, как и в линейной теории упругости, будем считать, что при сложном напряжённом состоянии прочность в точке деформированного тела будет обеспечена, если некоторая функция главных напряжений в этой точке не превосходит опасного напряжения, определяемого из опытов на простое растяжение:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \leq \sigma_{on}. \quad (14)$$

I. Теория прочности наибольших нормальных напряжений.

Теория прочности наибольших нормальных напряжений вводит критерий наибольших нормальных напряжений, в соответствии с которым напряжённое состояние в точке деформированного тела при сложном напряжённом состоянии становится предельным, когда наибольшее нормальное напряжение в этой точке достигает величины опасного напряжения:

$$\sigma^{\max} = \sigma_1 \leq \sigma_{on}. \quad (15)$$

II. Теория прочности наибольших удлинений.

Теория прочности наибольших удлинений вводит критерий наибольших удлинений, в соответствии с которым напряжённое состояние в точке деформированного тела при сложном напряжённом состоянии ста-

новится предельным, когда наибольшее удлинение в точке достигает опасного значения:

$$\max \varepsilon^* = \varepsilon_1^* \leq \varepsilon_{on}. \quad (16)$$

Принимая во внимание физические соотношения (12), величина наибольшего удлинения в точке деформированного тела после перехода к главным деформациям получает вид:

$$\varepsilon_1^* = \frac{1}{2G^*} \left(\sigma_1^* - \frac{1}{3} \sigma^* \right) + \frac{1}{9} \frac{\sigma^*}{K^*}. \quad (17)$$

При осевом растяжении

$$\varepsilon_1^* = \varepsilon_{on} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{G^*} + \frac{1}{3K^*} \right) \sigma_{on}. \quad (18)$$

Подставляя (18) и (17) в условие (16), получаем критерий прочности наибольших удлинений:

$$\left[\frac{1}{2G^*} \left(\sigma_1^* - \frac{1}{3} \sigma^* \right) + \frac{1}{9} \frac{\sigma^*}{K^*} \right] \frac{27K^* \cdot G^*}{9K^* + 3G^*} \leq \sigma_{on}. \quad (19)$$

III. Теория прочности наибольших касательных напряжений.

Теория прочности наибольших касательных напряжений вводит критерий наибольших касательных напряжений в соответствии с которым напряжённое состояние в точке деформированного тела при сложном напряжённом состоянии становится предельным, когда наибольшие касательные напряжения в этой точке достигают величины опасного значения:

$$\tau^{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \leq \tau_{on} = \frac{\sigma_{on}}{2}.$$

Таким образом, критерий прочности по теории наибольших касательных напряжений имеет вид:

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_{on}. \quad (20)$$

IV. Теория прочности Мора.

Теория прочности Мора оценивает прочность материалов по разному сопротивляющихся растяжению сжатию. В основе теории прочности Мора лежит предположение, что среднее главное напряжение оказывает малое влияние на наступление предельного



состояния и может не учитываться. Опыты показывают, что ошибка от не учёта среднего главного напряжения в линейной теории упругости не превышает 10-15%.

Аналитическое выражение критерия прочности по теории прочности Мора имеет вид:

$$\sigma_1 - \frac{\sigma_{on}^{(+)} \sigma_{on}^{(-)}}{\sigma_{on}^{(-)}} \sigma_3 \leq \sigma_{on}^{(+)} . \quad (21)$$

Здесь $\sigma_{on}^{(+)}$ – опасное напряжение при осевом растяжении; $\sigma_{on}^{(-)}$ – опасное напряжение при осевом сжатии.

Вычисление главных напряжений в формулах (15), (19), (20) и (21) следует выполнять в соответствии с выражениями (4), (5) и (10).

Сформулируем алгоритм оценки прочности в нелинейной теории упругости для критериев (15), (20) и (21).

1. Для данной математической модели сплошной среды определяем перемещения в каждой точке деформируемого тела, решая краевую задачу для дифференциальных уравнений равновесия (13). Поскольку в нелинейной теории упругости В.В. Новожилова дифференциальные уравнения равновесия включают в явном виде как обобщённые напряжения, так и производные по пространственным координатам от перемещений, то решение краевой задачи следует выполнять в перемещениях.

2. Зная перемещения, вычисляем нелинейные деформации по формулам (2).

3. Используя физические уравнения (12), вычисляем обобщённые напряжения.

4. Вычисляем коэффициенты $\alpha_{i,j}; i, j = 1, 2, 3$.

5. Вычисляем напряжения, действующие на гранях элементарного параллелепипеда, выделенного в точке M^* деформированного тела, по формулам (10).

6. Вычисляем вспомогательные инварианты тензора напряжений (3) по формулам (5) и определяем главные напряжения по формулам (4).

7. В наиболее опасных точках проверяем выполнение условий прочности, используя неравенства (15), или (20), или (21).

Если для оценки прочности используется условие прочности наибольших удлинений (19), то алгоритм оценки прочности следует сформулировать в следующей редакции.

1. Для данной математической модели сплошной среды определяем перемещения в каждой точке деформируемого тела, решая краевую задачу для дифференциальных уравнений равновесия (13). Поскольку в нелинейной теории упругости В.В. Новожилова дифференциальные уравнения равновесия включают в явном виде как обобщённые напряжения, так и производные по пространственным координатам от перемещений, то решение краевой задачи следует выполнять в перемещениях.

2. Зная перемещения, вычисляем нелинейные деформации по формулам (2).

3. Используя физические уравнения (12), вычисляем обобщённые напряжения.

4. Вычисляем вспомогательные инварианты и главные обобщённые напряжения (8) тензора обобщённых напряжений (6).

5. В наиболее опасных точках проверяем выполнение условия прочности (19).

4. Заключение.

Сформулированы феноменологические критерии прочности теории наибольших нормальных напряжений, теории прочности наибольших удлинений, теории прочности наибольших касательных напряжений и теории прочности Мора для деформируемых тел, механическое поведение которых описывается уравнениями геометрически и физически нелинейной теории упругости В.В. Новожилова.

Для оценки прочности в точке тела, механическое поведение которого описывается уравнениями геометрически и физически нелинейной теории упругости В.В. Новожилова, необходимо в этой точке знать и напряжённое и деформированное состояние, то есть решить задачу нелинейной теории упругости полностью.



Предложенные в статье феноменологические критерии прочности для деформируемых тел, механическое поведение которых описывается математическими моделями с учётом и физической и геометрической нелинейности требуют всестороннего экспериментального обоснования.

Библиографический список

1. Новожилов В.В. Теория упругости. Судпромгиз, 1958, - 370 с.
2. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. Изд. 2-е, стереотипное. - М.: ЕдиториалУРСС, 2003. 208 с.
3. Бакушев С.В. Геометрически и физически нелинейная механика сплошной среды: Плоская задача. Изд. стереотип. М.: Книжный дом «Либроком», 2020. 312 с.
4. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука. 1980. - 512 с.
5. Новожилов В.В., Рыбакина О.Г. Перспективы построения критерия прочности при сложном нагружении. МТТ., 1966, №5.
6. Коффин Д.Ф. Циклические деформации и усталость металлов. Сборник "Усталость и выносливость металлов", ИЛ, 1963.
7. Филин А.П. Прикладная механика твёрдого деформируемого тела, т.1. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва "Наука" 1975. 832 с.
8. Сопротивление материалов. Под ред. А.Ф.Смирнова. Учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. М., "Выш. школа", 1975. - 480 с.
9. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Резников Д.О., Неганов Д.А. Анализ напряжённо-деформированных и предельных состояний в экстремально нагруженных зонах машин и конструкции. Чебышевский сборник. 2017. Т. 18. № 3 (63). С. 394-416. DOI: 10.22405/2226-8383-2017-18-3-394-416.
10. Махутов Н.А. Обобщённые закономерности процессов деформирования и разрушения. Вестник Российской академии наук. 2017. Т. 87. № 5. С. 407-428. DOI: 10.7868/S0869587317050012.
11. Литвинский Г.Г. Развитие единой теории прочности и закономерности разрушения. Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. 2019. № 13 (56). С. 5-18.
12. Васильев В.В., Лурье С.А., Салов В.А. Исследование прочности пластин с трещинами на основе критерия максимальных напряжений в масштабно-зависимой обобщенной теории упругости. Физическая мезомеханика. 2018. Т. 21. № 4. С. 5-12.
13. Фадеев В.В., Зюзин Б.Ф. Принципы построения теории прочности мерзлого торфяного грунта на основе октаэдрической модели. Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2019. № 2 (2). С. 43-49.
14. Фролков А.И., Акользин С.В., Горшков В.А., Кулешов А.А., Камзолов С.К. Энергетический вариант механической теории прочности конструкционных материалов. Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 28. С. 18-30.
15. Харланов В.Л., Харланова С.В. Сравнение различных теорий прочности бетона в методе конечных элементов на примере изгибаемой балки. Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. № 4 (77). С. 41-47.
16. Михайлова Н.А., Стефаненко И.В. Множественные регрессионные модели прочности бетона на сжатие. Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. № 49 (68). С. 30-42.
17. Ключева Н.В., Чернов К.М., Колчунов В.И., Яковенко И.А. Прочность железобетонных составных конструкций и новые критерии разрушения в зоне наклонных трещин. Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 11. С. 36-40.
18. Галяутдинов З.Р. Динамический критерий прочности бетона при плоском напряженном состоянии. Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 4. С. 138-145. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-4-138-145.
19. Корсун В.И., Недорезов А.В., Макаренко С.Ю. Сопоставительный анализ критериев прочности для бетонов. Современное промышленное и гражданское строительство. 2014. Т. 10. № 1. С. 65-78.
20. Карпенко Н.И., Карпенко С.И. К определению прочности бетона при трехосном сжатии. Технологии бетонов. 2014. № 10 (99). С. 40-41.
21. Guangchun Zhou, Jun Shi, Maohong Yu, Yu Zhang, Xiaochun Li, Yan Zhao. Strength without Size Effect and Formula of Strength for Concrete and



Natural Marble. Materials. 2019;12(17):2685 DOI 10.3390/ma12172685.

22. Hongyan Ding, Lei Zhang, Puyang Zhang. Experimental Study to Determine the Failure Criteria of Concrete at Its Early-Age. Advances in Materials Science and Engineering. 2015;2015 DOI 10.1155/2015/423065.

23. Панин В.Е. Проблемы пластичности, прочности, усталостной долговечности и механизмы разрушения наноструктурных материалов. В книге: Наноструктурные материалы: Беларусь-Россия-Украина (НАНО - 2014) Сборник пленарных докладов IV Международной научной конференции. Главный редактор П.А. Витязь. 2015. С. 81-92.

24. Соколкин Ю.В., Макарова Е.Ю. Нелинейные многоуровневые связанные краевые задачи механики деформирования и разрушения композитов. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4-5. С. 2502-2504.

25. Божанов П.В., Трещев А.А. Определение прочностных критериев при возникновении пластических деформаций в поликарбонате. Инновации и инвестиции. 2018. № 12. С. 323-326.

26. Соколов А.К., Свистков А.Л. Новый деформационный критерий разрушения эластомерного материала. Математическое моделирование в естественных науках. 2016. Т. 1. С. 353-356.

27. Anders Winkler, SPE, Gertjan Kloosterman. A critical review of fracture mechanics as a tool for multiaxial fatigue life prediction of plastics1. Frattura ed Integrità Strutturale. 2015;9(33):262-288 DOI 10.3221/IGF-ESIS.33.32.

28. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Гриневич Д.В., Шершак П.В. Обзор критериев прочности мате-

риалов. Труды ВИАМ. 2019. № 9 (81). С. 108-126. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-108-126.

29. Комков К.Ф. О тензорной нелинейности сред, проявляющих существенное различие в сопротивлении растяжению и сжатию. Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 10. С. 451-482.

30. Кадашевич Ю.И., Помыткин С.П. Формулировка критерия прочности материалов для эндохронной теории неупругости, учитывающей микроразрушения при больших деформациях. Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2010. № 1 (20). С. 53-59.

31. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. Развитие идей В.В. Новожилова в современной теории прочности. Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. № 53-1 (337-1). С. 11-16

32. Бакушев С.В. К вопросу о критериях прочности геометрически-нелинейной среды. // Известия ВУЗов. Строительство. 1994. №5-6. С.19-25.

33. Бакушев С.В. Некоторые вопросы центрально и осе симметричного деформирования геометрически нелинейной сплошной среды. // Известия ВУЗов. Строительство. 1996. №8. С.25-31.

34. Бакушев С.В. Геометрически нелинейный вариант деформационной теории пластичности бетона. // Бетон и железобетон. 2004. - №2. С.19-23.

35. Бакушев С.В. О напряжениях в нелинейной теории упругости В.В. Новожилова. // Современная наука: теория, методология, практика. Материалы I-ой Всероссийской (национальной) НТК, - Тамбов, 26-27 ноября 2019 г. - С.166-171.

Поступила в редакцию 28.04.2020 г.



SOME THEORIES OF FAILURE IN GEOMETRICALLY NONLINEAR MECHANICS

© 2020 S.V. Bakushev*

For massive bodies, mechanical behavior of which is described by the equations of the geometrically and physically nonlinear V.V. Novozhilovs elasticity theory, the construction of strength criteria for the theory of the greatest normal stresses, the theory of failure of the greatest elongations, the theory of failure of the greatest tangential stresses and Mohrs theory of failure is considered. The analyzed strength criteria are written in terms of stresses acting along the faces of the elementary parallelepiped selected at the point of the deformed body, that is, in the state after deformation. The transition formulas are given from stresses acting along the faces of an elementary parallelepiped selected at a point of a deformed body, that is, in the state after deformation, to generalized stresses acting along the faces of an oblique parallelepiped, which edges were parallel to the axes of the Cartesian coordinate system before deformation. Thus, writing down the strength criteria in terms of generalized stresses, the transition is made to the coordinate system of the points of the body before deformation. It is shown that to assess the strength at a point in a body which mechanical behavior is described by equations of the geometrically and physically nonlinear V.V. Novozhilovs theory of elasticity, it is necessary to know at this point both stress and strain state, that is, to solve the problem of nonlinear theory of elasticity completely. A calculation algorithm is formulated to assess the strength at the point of a nonlinearly deformable body. It is noted that the strength criteria proposed in the article for deformable bodies, the mechanical behavior of which is described by mathematical models taking into account both physical and geometric nonlinearity, require comprehensive experimental justification.

Keywords: nonlinear theory of elasticity, stresses, strains, generalized stresses, failure, strength criteria.

Received for publication on 28.04.2020

* Bakushev Sergey Vasilevich Doktor of Sciences, Professor, Penza State University of Architecture and Construction (Russia, Penza).



ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФфуЗИИ*

© 2020 Е.С. Безрукова, А.О. Горенков,
В.П. Селяев**

В статье рассматриваются методы определения коэффициентов диффузии, характеризующих скорость сорбции жидкой агрессивной среды композиционными материалами, в том числе наиболее распространенные из них: метод равновесной сорбции, динамический сорбционный метод, а также производный от него, метод И. Лангмюра и С. Б. Ратнера, учитывающий временную характеристику кинетики сорбции, и индикаторный метод. Производится апробация каждого метода для 7 различных составов композиционных материалов и выбор наиболее оптимального варианта на основе анализа полученных результатов. Приведен график изменения коэффициента диффузии для составов 17 во времени.

Ключевые слова: композиционные материалы, химическое сопротивление, коэффициент диффузии, сорбция, агрессивная среда.

Бетонные и железобетонные конструкции в период эксплуатации зачастую подвергаются действию технологических и природных сред, которые являются причиной возникновения коррозии материала конструкций. Чем агрессивнее внешняя среда, тем быстрее и глубже протекает коррозия, что обуславливает актуальность разработки составов полимерных бетонов, отличающихся высоким химическим сопротивлением и долговечностью.

Исследование химического сопротивления полимерных бетонов в жидких агрессивных средах предполагает определение скорости процесса сорбции, для характеристики которой используется коэффициент диффузии D .

Целью данной работы является выбор наиболее оптимального метода для определения коэффициентов диффузии на основе

анализа результатов, полученных при апробации каждого из них.

Наибольшее распространение при определении диффузионных характеристик полимерных бетонов получили метод равновесной сорбции, динамический сорбционный и индикаторный методы [14].

1. Сущность метода равновесной сорбции заключается в том, что если выдерживать полимербетонный образец в агрессивной среде при постоянном давлении и температуре, то через некоторое время установится равновесие, при котором агрессивная жидкость равномерно распределится по объему образца.

Математически процесс сорбции принято описывать на основе феноменологической модели массопереноса уравнением Фика, согласно которому скорость массопе-

* Работа представлена в качестве доклада на XI Академических чтениях РААСН - Международной научно-технической конференции «Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций», посвященной памяти первого Председателя Научного совета РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» Почетного члена РААСН, д.т.н., профессора Зайцева Юрия Владимировича (Саранск, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», 2020 год).

** Безрукова Евгения Сергеевна (ntorm80@mail.ru) аспирант; Горенков Александр Олегович (ntorm80@mail.ru) аспирант; Селяев Владимир Павлович (ntorm80@mail.ru) - академик РААСН, доктор технических наук, профессор; все - Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева (РФ, Саранск).



реноса пропорциональна градиенту концентрации и имеет вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где ω - концентрация среды;

t - длительность воздействия;

D - коэффициент диффузии.

При двустороннем насыщении образца можно записать:

$$\omega(t) = \omega_{\max} \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} F_0\right) \right], \quad (2)$$

где $\omega_{\max}$ - предельная сорбционная емкость композита (максимальное количество жидкости, которое может содержаться в образце при полном насыщении);

F_0 - критерий Фурье.

$$F_0 = \frac{D}{h^2} t, \quad (3)$$

где D - коэффициент диффузии;

h - высота бетонного образца.

Преобразуем выражение (2) с учетом (3):

$$1 - \frac{\omega(t)}{\omega_{\max}} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} \frac{Dt}{h^2}\right), \quad (4)$$

$$\ln \left[1 - \frac{\omega(t)}{\omega_{\max}} \right] = \frac{\ln 8}{\pi^2} - \frac{\pi^2}{4} \frac{Dt}{h^2}. \quad (5)$$

Выразив из (5) D , получим

$$D = \left\{ \frac{\ln 8}{\pi^2} - \ln \left[1 - \frac{\omega(t)}{\omega_{\max}} \right] \right\} \frac{4h^2}{\pi^2 t}. \quad (6)$$

Выполнив необходимые вычисления в выражении (6), получим выражение для определения коэффициента диффузии

$$D = \left\{ -0,085 - 0,4 \ln \left[1 - \frac{\omega(t)}{\omega_{\max}} \right] \right\} \frac{h^2}{t}. \quad (7)$$

2. Определение диффузионных характеристик можно ускорить, применив динамический сорбционный метод.

Используя в качестве исходных формулы (2) и (3), определим $\omega(t)$ в моменты времени t_1 и t_2 :

$$\omega(t_1) = \omega_{\max} \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt_1}{4h^2}\right) \right], \quad (8)$$

$$\omega(t_2) = \omega_{\max} \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt_2}{4h^2}\right) \right]. \quad (9)$$

Разделив (9) на (8), получим

$$\frac{\omega(t_2)}{\omega(t_1)} = \frac{1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt_2}{4h^2}\right)}{1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt_1}{4h^2}\right)}. \quad (10)$$

Приняв $t_2 = 2t_1$ и выполнив необходимые преобразования, найдем

$$\begin{aligned} \omega(t_2) - \omega(t_1) &= \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt_1}{4h^2}\right) = \\ &= \omega(t_1) - \omega(t_1) \exp\left(-\frac{\pi^2 2Dt_1}{4h^2}\right), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \omega(t_2) - \omega(t_1) &= \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt_1}{4h^2}\right) = \\ &= \omega(t_2) - \omega(t_1) \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt_1}{4h^2}\right). \end{aligned} \quad (12)$$

Обозначим

$$y = \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt_1}{4h^2}\right), \quad (13)$$

тогда

$$\begin{aligned} \omega(t_2) - \omega(t_1) - \omega(t_2) \frac{8}{\pi^2} y + \\ + \omega(t_1) \frac{8}{\pi^2} y^2 = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Преобразуем полученное квадратное уравнение (14)

$$y^2 - \frac{\omega(t_2)}{\omega(t_1)} y + \frac{\omega(t_2) - \omega(t_1)}{\omega(t_1)} \frac{8}{\pi^2} = 0. \quad (15)$$

Решая уравнение (15), получим

$$y = \frac{\omega(t_2)}{2\omega(t_1)} + \sqrt{\left[\frac{\omega(t_2)}{2\omega(t_1)} \right]^2 - \frac{\pi^2}{8} \frac{\omega(t_2) - \omega(t_1)}{\omega(t_1)}}. \quad (16)$$



Исходя из (13),

$$\ln y = -\frac{\pi^2}{4} \frac{Dt_1}{h^2}, \quad (17)$$

тогда коэффициент диффузии

$$D = -\frac{4h^2}{\pi^2 t_1} \ln y = -0,41 \frac{h^2}{t_1} \ln y. \quad (18)$$

Данная формула обладает пределом применимости. Условие применимости:

$$\omega(t_1) \geq 0,59472\omega(t_2).$$

3. Коэффициент диффузии можно определить, приняв $t_2 = 2t_1$, $t_3 = 3t_1$. Для этого, преобразовав (8) с учетом (13), получим, что предельная сорбционная емкость равна

$$\omega_{\max} = \frac{\omega(t_1)}{1 - \frac{8}{\pi^2} y}. \quad (19)$$

Преобразовав выражение (19), получим

$$\omega(t_1) = \omega_{\max} - \omega_{\max} \frac{8}{\pi^2} y. \quad (20)$$

Если положить, что $t_2 = 2t_1$, $t_3 = 3t_1$, то можно записать

$$q = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_3 - Q_2} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_3 - \omega_2}, \quad (21)$$

где Q_1 , Q_2 , Q_3 - количество жидкости в образце в соответствующие моменты времени. Обозначим

$$\omega(t_i) = \omega_{\max} - \omega_{\max} \frac{8}{\pi^2} x_i, \quad (22)$$

где $x_i = -\frac{\pi^2}{4} \frac{Dt_i}{h^2}$.

Тогда

$$\omega_1 = \omega_{\max} - \omega_{\max} \frac{8}{\pi^2} x_1, \quad (23)$$

$$\omega_2 = \omega_{\max} - \omega_{\max} \frac{8}{\pi^2} x_1^2, \quad (24)$$

$$\omega_3 = \omega_{\max} - \omega_{\max} \frac{8}{\pi^2} x_1^3, \quad (25)$$

Вычтем (23) из (24), а также (24) из (25):

$$\begin{aligned} \omega_2 - \omega_1 &= -\omega_{\max} \frac{8}{\pi^2} x_1^2 + \omega_{\max} \frac{8}{\pi^2} x_1 = \\ &= \omega_{\max} \frac{8}{\pi^2} x_1 (1 - x_1), \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \omega_3 - \omega_2 &= -\omega_{\max} \frac{8}{\pi^2} x_1^3 + \omega_{\max} \frac{8}{\pi^2} x_1^2 = \\ &= \omega_{\max} \frac{8}{\pi^2} x_1^2 (1 - x_1), \end{aligned} \quad (27)$$

Поделив (27) на (26), получим

$$\begin{aligned} q &= \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_3 - \omega_2} = \frac{1}{x_1} = \frac{1}{\exp\left(\frac{\pi^2}{4} \frac{Dt_1}{h^2}\right)} = \\ &= \exp\left(\frac{\pi^2}{4} \frac{Dt_1}{h^2}\right). \end{aligned} \quad (28)$$

Прологарифмировав левую и правую части выражения (28), выразим из него коэффициент диффузии D :

$$D = \left[\frac{\ln(\omega_2 - \omega_1)}{\omega_3 - \omega_2} \right] \frac{4h^2}{\pi^2 t_1}. \quad (29)$$

4. Результаты исследований процессов адсорбции И. Лангмюром и сорбции С.Б. Ратнером показали, что кинетику насыщения композитов жидкостью с достаточной точностью можно описать дробно-линейной функцией вида

$$\omega(t) = \frac{\omega_{\max} t}{t_{0,5} + t}, \quad (30)$$

где $t_{0,5}$ - временная характеристика кинетики сорбции.

Выразим из (30) t :

$$t = \frac{t_{0,5}}{\frac{\omega_{\max}}{\omega(t)} - 1}. \quad (31)$$

Тогда, подставив (31) в выражение (6), получим

$$D = \left\{ \frac{\ln 8}{\pi^2} - \ln \left[1 - \frac{\omega(t)}{\omega_{\max}} \right] \right\} \left(\frac{\omega_{\max}}{\omega(t)} - 1 \right) \frac{4h^2}{\pi^2 t_{0,5}}. \quad (32)$$



5. Также для определения D можно применить индикаторный метод нахождения диффузионных характеристик, основанный на определении расстояния от поверхности пластины до границы, где концентрация агрессивной жидкости равна C_n начальное значение концентрации.

Тогда коэффициент диффузии

$$D = \frac{a^2}{k(\xi)^2 t}, \quad (33)$$

где $k(\xi) = 1 - \frac{\omega(t)}{\omega_{\max}}$;

a - граница фронта жидкости.

Для определения коэффициента диффузии используем экспериментальные данные об изменении массы композиционных материалов составов 17 в воде при температуре $T = 20^\circ C$, приведенные в работе [5]. Исходные данные, полученные из графических зависимостей, представлены в табл. 1. Длительность воздействия жидкой агрессивной среды на композиционные материалы указана в сутках.

Результаты определения коэффициента диффузии D приведены в табл. 2. Данные для составов 14 не соответствуют условиям применимости при определении методом 2. Экспериментальные данные, позволяющие определить границу фронта жидкости для вычисления коэффициента диффузии индикаторным методом, для составов 3, 6 и 7 отсутствуют.

Анализ полученных данных показывает, что первый и четвертый методы определения коэффициента диффузии D дают сопоставимые результаты. Они также хорошо подтверждаются индикаторным методом для составов 45. Значительная разница коэффициентов диффузии для составов 12 объясняется тем, что граница фронта жидкости была получена для длительности выдержки состава в воде, равной 370 суток, данные для периода 525 суток отсутствуют.

Наиболее адекватно описывает изменение скорости процесса сорбции во времени метод И. Лангмюра. На рисунке изображен график изменения коэффициента диффузии для составов 17 во времени. Подробно зна-

Таблица 1. Значения концентрации $\omega(t_i)$ и $\omega_{\max}$ среды в зависимости от времени для составов 17

№ п/п	$\omega_{\max}$	$\omega(t_1 = 5)$	$\omega(t_2 = 10)$	$\omega(t_3 = 15)$	$\omega(t_4 = 20)$	$\omega(t_5 = 25)$
1	1,575	0,65	1,1	1,4	1,55	1,57
2	1,525	0,6	1,025	1,3	1,45	1,5
3	1,05	0,5	0,85	1	1,025	1,04
4	1,75	0,89	1,5	1,7	1,725	1,74
5	2,475	1,2	1,8	2,25	2,4	2,47
6	3	1,95	2,55	2,85	2,95	2,955
7	5,85	4,05	5,25	5,65	5,8	5,825

Таблица 2. Коэффициент диффузии D , см²/сут

Номер состава	Коэффициент, см ² /сут, определенный методом				
	1	2	3	4	5
1	0,12009		0,09337	0,11778	0,64800
2	0,09199		0,14129	0,10736	0,54361
3	0,13892		0,27500	0,15572	
4	0,18248		0,32832	0,17376	0,13965
5	0,14425	0,00603	0,09337	0,13013	0,13935
6	0,26794	0,04432	0,22497	0,20946	
7	0,30917	0,04099	0,35656	0,19941	

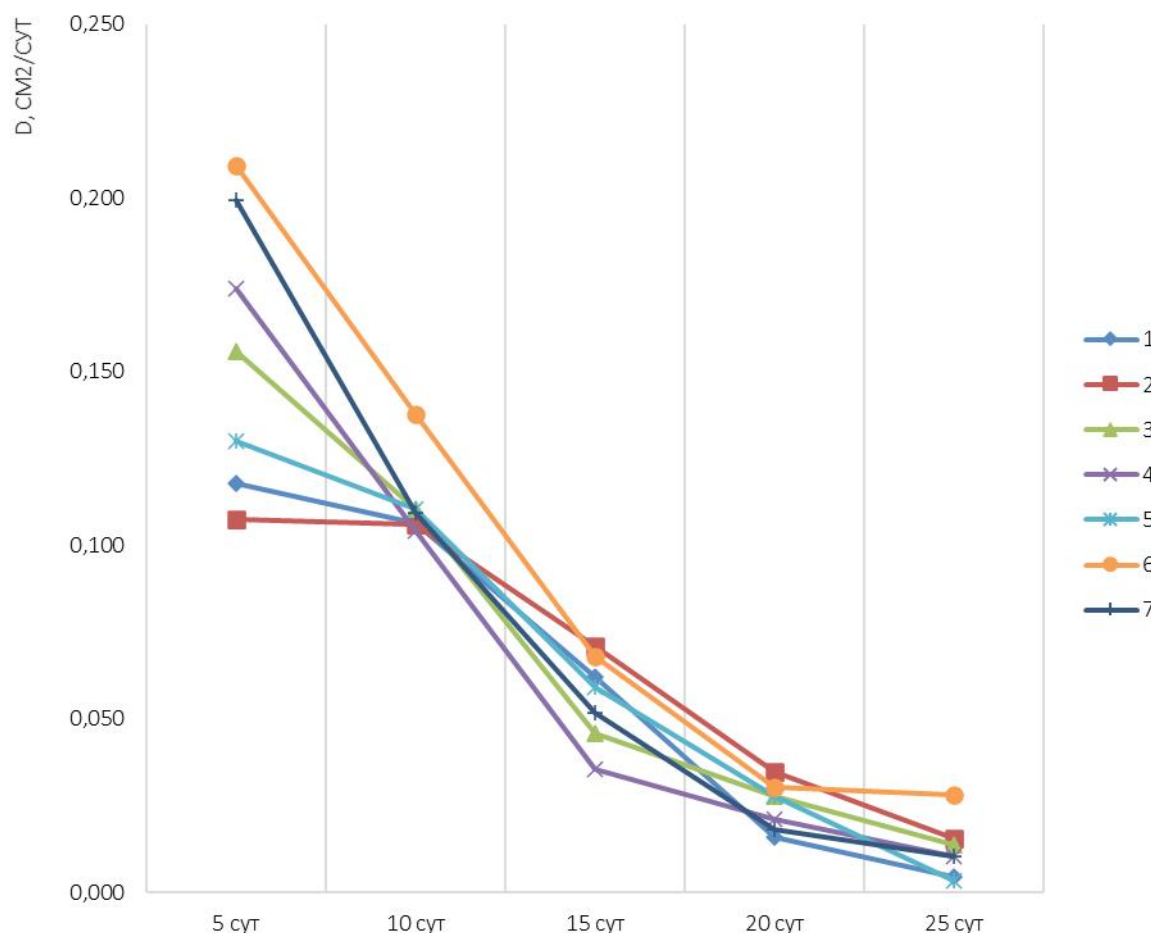


Рис. Изменение коэффициента диффузии D для композиционных материалов составов 17 во времени, $\text{см}^2/\text{сут}$ (метод 4)

Таблица 3. Значение коэффициентов диффузии D для композиционных материалов составов 17, определенных четвертым методом, $\text{см}^2/\text{сут}$

Номер состава	Коэффициент D , $\text{см}^2/\text{сут}$				
	5 сут	10 сут	15 сут	20 сут	25 сут
1	0,11778	0,10648	0,06195	0,01582	0,00440
2	0,10736	0,10604	0,07082	0,03481	0,01561
3	0,15572	0,11048	0,04595	0,02790	0,01385
4	0,17376	0,10423	0,03545	0,02109	0,01026
5	0,13013	0,11037	0,05911	0,02775	0,00328
6	0,20946	0,13790	0,06791	0,03049	0,02814
7	0,19941	0,10943	0,05191	0,01818	0,01043

чения коэффициентов диффузии представлены в табл. 3.

Таким образом, наиболее оптимальными методами для определения коэффициента диффузии, характеризующего скорость процесса сорбции жидкой агрессивной среды композиционным материалами, являются метод равновесной сорбции и метод И. Лангмюра, использующий временную характеристику ки-

нетики сорбции. При этом метод И. Лангмюра дает более адекватную картину изменения скорости процесса сорбции во времени.

Библиографический список

1. Селяев В.П. Физико-химические основы механики разрушения цементных композитов : монография / В.П. Селяев, П.В. Селяев. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. 220 с.



2. Ратнер С.Б. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? / С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев. М.: Химия, 1992. 320 с.
3. Соломатов В.И. Армополимербетоны в транспортном строительстве / В.И. Соломатов [и др.]. М.: Транспорт, 1979. 328 с.
4. Шмелев Г.Д. Диффузия углекислого газа в бетон строительных конструкций и оценка коэффициента диффузии интервальным методом / Г.Д. Шмелев, С.А. Варгошкин // Вопросы современной науки. 2012. № 3 (47). С. 315320.
5. Селяев В.П. Химическое сопротивление наполненных цементных композитов / В.П. Селяев, В.И. Соломатов, Л.М. Ошкина. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. 150 с.

Поступила в редакцию 28.04.2020 г.

VERIFICATION OF METHODS FOR DETERMINING DIFFUSION COEFFICIENT

© 2020 E.S. Bezrukova, A.O. Gorenkov,
V.P. Selyaev*

The article is devoted to the methods for determining the diffusion coefficients characterizing the rate of sorption of a liquid aggressive medium by composite materials, including the most common of them: the equilibrium sorption method, the dynamic sorption method, as well as its derivative, the method of I. Langmuir and S. B. Ratner, taking into account the temporal characteristic of the kinetics of sorption, and the indicator method. Each method is tested for 7 different compositions of composite materials and the most optimal option is selected based on an analysis of the results. A graph of how the diffusion coefficient for compositions 1-7 changes in time is given.

Keywords: composite materials, chemical resistance, diffusion coefficient, sorption, aggressive environments.

Received for publication on 28.04.2020

* Bezrukova Evgenia Sergeevna Postgraduate; Gorenkov Alexandr Olegovich Postgraduate; Selyaev Vladimir Pavlovich - Academician of the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences, Doctor of Sciences, Professor; Mordovian State University named after N. P. Ogarev (Saransk, Russia).



ТЕПЛОВОЕ СТАРЕНИЕ ПОЛИМЕРСОДЕРЖАЩИХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В НАРУЖНЫХ СТЕНАХ*

© 2020 В.Н. Куприянов, А.И. Иванцов**

Долговечность стеновых материалов оценивается, как правило, по циклам морозостойкости используемых материалов (кирпич, бетон и т.п.). В наружных слоях современных ограждающих конструкций, располагаются, как правило, упругие полимерсодержащие теплоизоляционные материалы, для которых попеременное замораживание и оттаивание влаги не приводит к их механическому разрушению. В связи с этим, морозостойкость подобных материалов не является определяющим фактором при оценке долговечности наружных стен.

Вместе с тем известно, что полимерные материалы подвержены тепловому старению, в результате которого может происходить снижение их теплозащиты. Таким образом, определяющим фактором при оценке долговечности наружных стен с полимерсодержащими теплоизоляционными материалами должно стать их тепловое старение.

В статье приведены результаты исследования температурного режима эксплуатации пенополистирола и минеральной ваты на полимерном связующем. Показано, что наружные слои теплоизоляционных материалов значительную часть года находятся при повышенных температурах. Моделирование установленного теплового воздействия в лабораторных условиях позволило получить закономерности увеличения коэффициентов теплопроводности исследованных материалов и разработать метод оценки срока службы наружных стен по потере требуемой теплозащиты.

Ключевые слова: долговечность, ограждающие конструкции, полимерные материалы, тепловое старение, режим эксплуатации.

Актуальность. Традиционно, долговечность ограждающих конструкций оценивается по морозостойкости материалов, из которых они выполнены. Для каменных конструкций, у которых в зоне промерзания находятся пористые материалы с твердым скелетом, данное обстоятельство вполне закономерно, так как для таких материалов попеременное замораживание и оттаивание во влажном состоянии в эксплуатационных условиях является определяющим воздействием, приводящим к их разрушению [1-5].

В современных многослойных ограждающих конструкциях в зоне промерзания располагаются, как правило, легкие упругие высокопористые или волокнистые теплоизоляционные материалы. Для таких материалов морозостойкость не может являться определяющим параметром, поскольку они не подвержены разрушению при попеременном замораживании и оттаивании при эксплуатационных воздействиях. Наибольшее распространение в качестве теплоизоляционных материалов получили материалы на по-

* Работа представлена в качестве доклада на XI Академических чтениях РААСН - Международной научно-технической конференции «Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций», посвященной памяти первого Председателя Научного совета РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» Почетного члена РААСН, д.т.н., профессора Зайцева Юрия Владимировича (Саранск, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», 2020 год).

** Куприянов Валерий Николаевич (kuprivan@kgasu.ru) - Заслуженный работник высшей школы РФ, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор; Иванцов Алексей Игоревич (ivantsov.arch@mail.ru) кандидат технических наук; оба - Казанский государственный архитектурно-строительный университет (РФ, Казань).



лимерной основе: пенопласты различного вида, материалы из минеральных волокон на синтетических связующих и пр. Известно, что полимерные материалы весьма чувствительны к повышенным температурам, то есть подвержены тепловому старению, в результате которого может происходить разрушение их структуры и как следствие снижение теплозащитных качеств теплоизоляционных материалов [6-10]. Таким образом, определяющим фактором при оценке долговечности наружных стен с полимерсодержащими теплоизоляционными материалами должно стать их тепловое старение.

Субъективной оценкой срока службы каменных ограждающих конструкций по критерию морозостойкости является количество переходов через 0 °С в течение года, т.е. осенней-весенний период эксплуатации.

Для оценки срока службы полимерсодержащего материала большее значение приобретает летний режим эксплуатации конструкции при высоких температурах и воздействие солнечной радиации на протяжении года: степень поглощения облицовочным материалом солнечной радиации, ориентации поверхности ограждающей конструкции по отношению к солнечным лучам и пр.

В этой связи, оценка температурного режима теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях является весьма актуальной задачей для прогнозирования срока их эксплуатации.

Результаты натурного исследования. Для оценки годового температурного режима теплоизоляционного материала в составе многослойной ограждающей конструкции был проведен натурный эксперимент на разработанном стенде на протяжении двух лет эксплуатации в условиях г. Казани.

Натурный испытательный стенд представляет собой кирпичный простенок существующего здания, утепленный по системе «мокрый фасад» с использованием двух видов полимерсодержащих утеплителей: пенополистирола и каменной минеральной ваты. Система «мокрого фасада» с тонким слоем облицовочной штукатурки (6 мм) выбрана с

целью наиболее точной оценки температурного режима теплоизоляционного слоя без значительного влияния облицовочного слоя. В качестве основных показателей эксплуатационного воздействия на материальные слои многослойного ограждения на данном испытательном стенде непрерывно в течение двух лет регистрируются распределения температуры и относительной влажности воздуха в порах материалов по сечению стены, а также внешнее воздействие климата в виде колебаний температуры и относительной влажности наружного воздуха, суммарной солнечной радиации, поступающей на поверхность ограждающей конструкции, облачность.

Некоторые результаты исследования представлены ниже в виде графиков на рис. 1-3.

На рисунке 1 представлены графики распределения максимальной суточной температуры по сечению натурного стенда для пенополистирола и минеральной ваты и средняя суточная температура наружного воздуха на протяжении года. Как можно видеть, в зависимости от расположения сечения теплоизоляционного материала по отношению к наружной поверхности максимальная суточная температура изменяется в широком диапазоне. На поверхности ограждающей конструкции вне зависимости от типа теплоизоляционного материала максимальные температуры достигают 60-70 °С с февраля по октябрь. Причем, стоит отметить, что пониженные максимальные температуры в ноябре-январе в данном случае связаны с особенностями расположения натурного стенда и в частности не возможности его облучения солнечной радиацией в этот период в должной степени из-за затенения противостоящими зданиями. Величина максимальной температуры на поверхности стенда точно коррелирует с временем солнечного сияния и интенсивностью солнечного облучения.

За счет значительного сопротивления теплопередаче теплоизоляционного слоя (до 3,75 м²·°С/Вт при 15 см толщины) величина максимальной температуры по его тол-



щине падает, достигая минимума на границе утеплителя и конструкционного слоя (15 см от поверхности). При этом, как видно из графика в этом сечении максимальные температуры практически не изменяются на протяжении всего года, оставаясь на уровне 20 °С.

В целом, важно отметить, что максимальные суточные температуры практически на протяжении года эксплуатации для всех сечений теплоизоляционного слоя превышают 0 °С.

На рисунке 2 представлено распределение температур по сечениям теплоизоляционных слоев в характерный день года (в данном случае 28 февраля). Можно видеть, что в полдень температура поверхности ограждающей конструкции поднимается до 50 °С за счет облучения солнечной радиацией, что ведет к повышению температур по всей толщине теплоизоляционного слоя. Стоит отметить, что такое повышение температур в материале наблюдается при температуре наружного воздуха около 0 °С. В летнее время, данные температуры могут носить большее значение - 60-70 °С (рис. 1).

На рисунке 3 представлены графики распределения средней суточной температуры по сечению натурного стенда для пенополистирола и минеральной ваты и средняя суточная температура наружного воздуха на протяжении года. Распределение средних суточных температур по сечениям теплоизоляционных материалов натурного стенда в большей степени коррелирует со среднесуточными температурами наружного воздуха. Незначительное влияние на средние температуры от воздействия солнечной радиации в данном случае снова отражается в конструкции натурного стенда. Поверхность стенда была ориентирована четко на юг, что вызывает значительное повышение температуры поверхности стенда под воздействием солнечной радиации (рис. 1), однако в связи с плотной застройкой продолжительность облучения не была максимально возможной. Однако данное обстоятельство, в том числе можно считать приближающим натурные испытания к реальным условиям городской застройки. Тем не менее, даже в условиях плотной городской застройки,

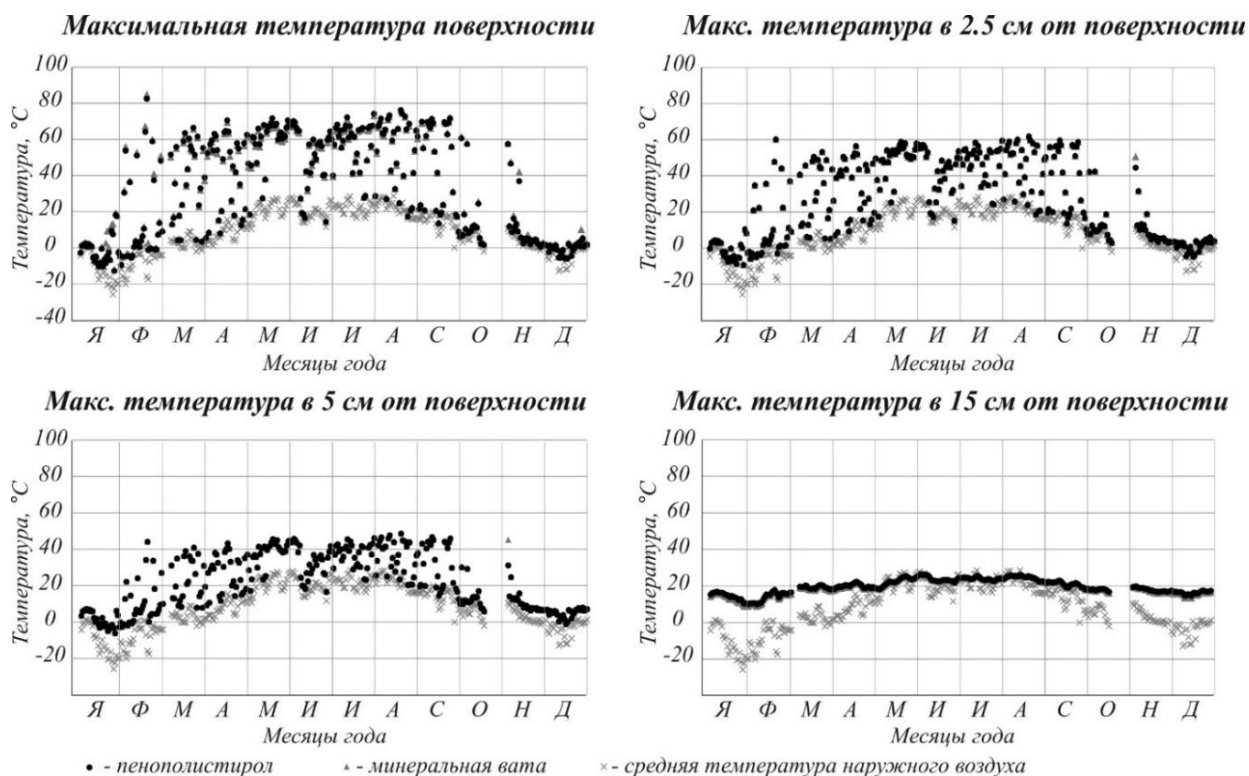


Рис. 1. Максимальная температура в сечениях теплоизоляционных материалов натурного стенда

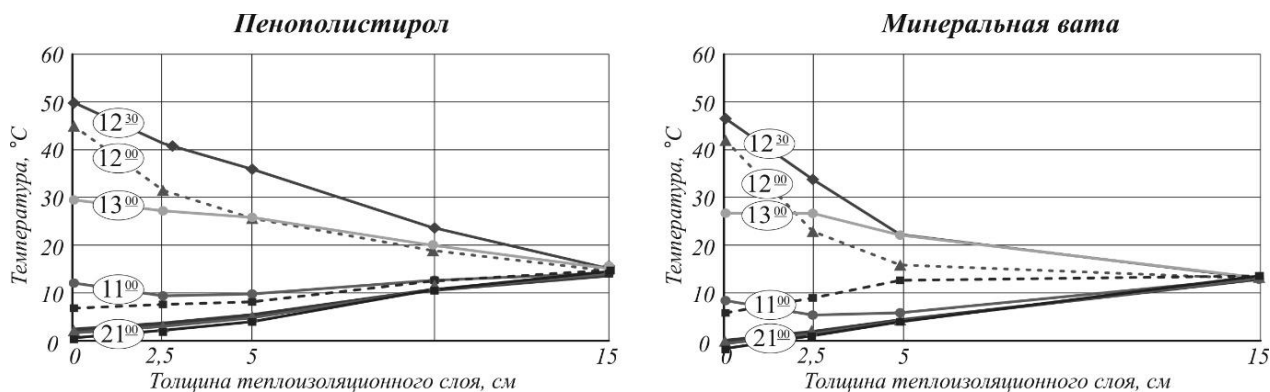


Рис. 2. Максимальная температура в сечениях теплоизоляционных материалов натурального стенда

средняя температура поверхности ограждающей конструкции на протяжении года на 5-10 °С выше среднесуточной температуры наружного воздуха.

Влияние воздействия солнечной радиации на средние температуры по сечениям теплоизоляционных материалов уменьшается пропорционально толщине этого слоя, достигая минимума к границе теплоизоляционного и конструкционного слоя (15 см от поверхности для представленного натурального стенда). В данном сечении средние температуры на протяжении года эксплуатации

изменяются в пределах 10-25 °С. Для промежуточных сечений (2,5 и 5,0 см) средние температуры превышают температуры наружного воздуха на 5-10 °С в зависимости от времени года. Важно отметить, что средние температуры эксплуатации по всем сечениям теплоизоляционных материалов находятся продолжительное время выше 0 °С.

Данное обстоятельство, позволяет подтвердить высказанное предположение о необходимости учета теплового старения полимерсодержащих материалов при оценке их долговечности.

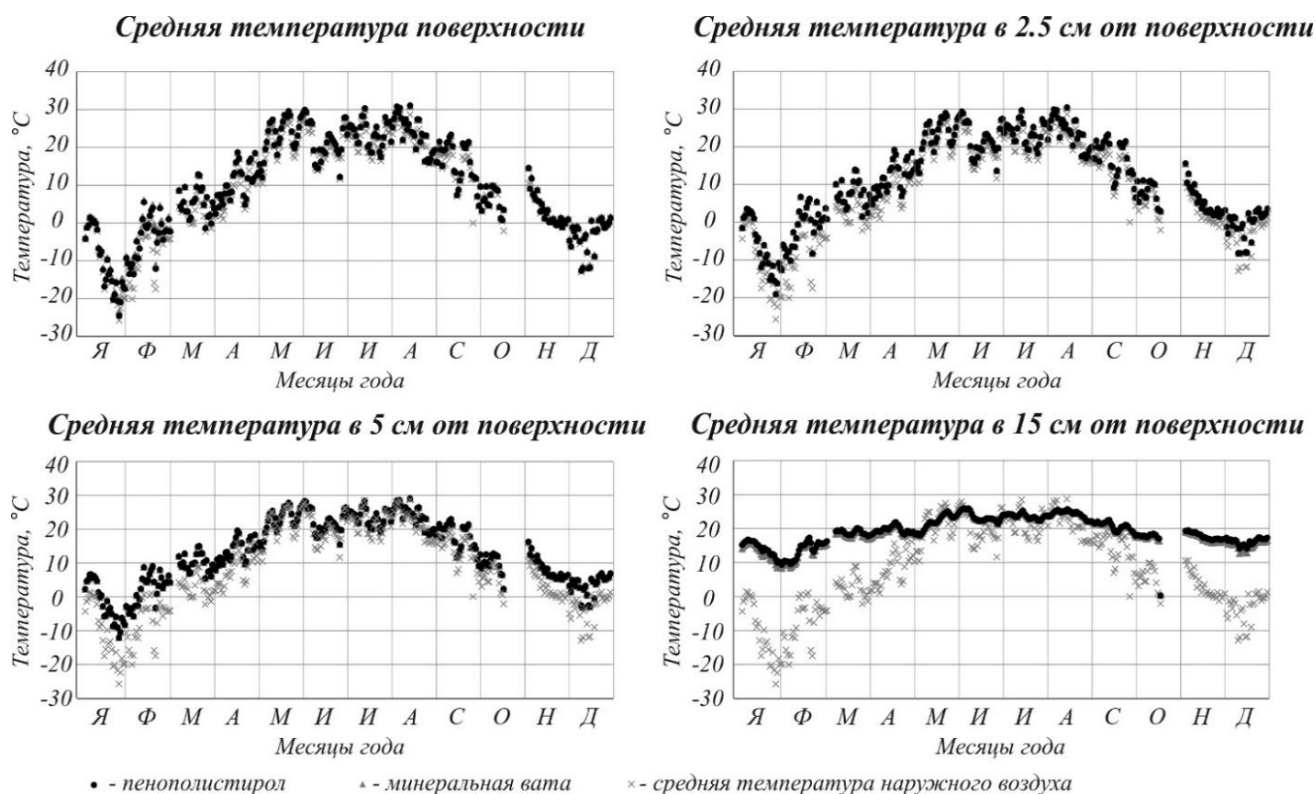


Рис. 3. Средняя температура в сечениях теплоизоляционных материалов натурального стенда

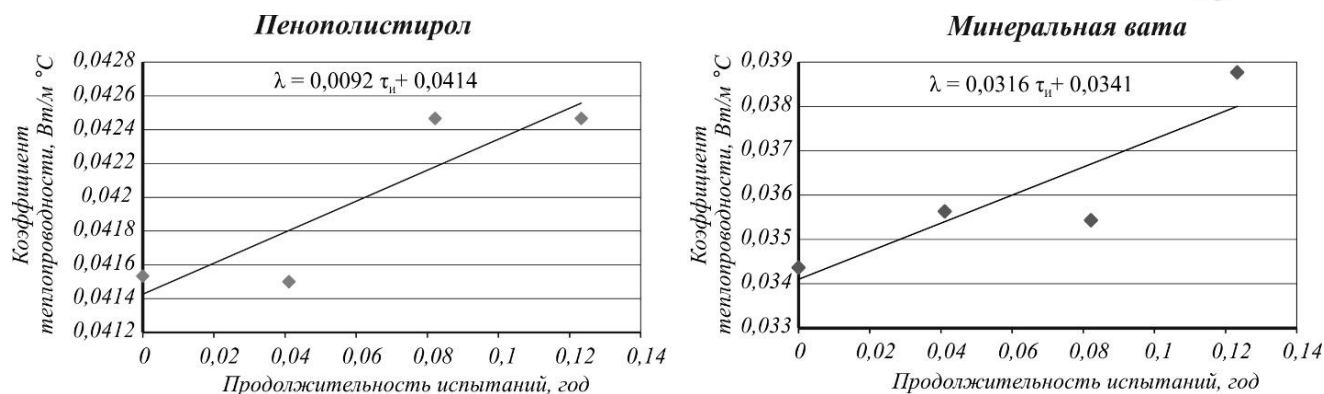


Рис. 4. Увеличение коэффициентов теплопроводности материалов в процессе теплового старения (при температуре 50 °С (323,15 К))

Результаты лабораторного исследования. Для оценки снижения теплозащитных свойств применяемых в натурном стенде утеплителей были проведены лабораторные испытания данных материалов в изотермических условиях (50 °С). Испытания проводились с использованием сушильного шкафа Spol 58/350, способного поддерживать постоянную (± 2 °С) температуру по всему объему в интервале 50-300 °С. Для проведения испытаний было отобрано по три образца каждого материала размерами 150x150x20 (25) мм. Размеры образцов были определены возможностью измерения коэффициента теплопроводности на имеющемся оборудовании. Теплопроводность образцов измерялась каждые 15 суток с использованием прибора ИТС-1.

Полученные значения коэффициентов теплопроводности, усредненные по трем образцам, нанесены на графики в зависимости от продолжительности испытаний (рис. 4). Продолжительность испытаний представлена на графиках в размерности года, для определения показателя долговечности материалов в соответствующих размерностях (Вт/м·°С·год).

Как можно видеть по результатам графиков, при продолжительном экспонировании образцов теплоизоляционных материалов на полимерной основе при повышенных температурах теплопроводность материалов растет, а значит уменьшается общее сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции. Данное обстоятельство приводит

к выводу о необходимости учета теплового старения полимерных материалов в составе современных ограждающих конструкций.

Библиографический список

1. Гуров Н.Г. Пути повышения морозостойкости кирпича полусухого прессования / Н.Г. Гуров, А.А. Наумов, Н.Н. Иванов // Строительные материалы. - 2012. - № 3. - С. 40-42.
2. Захаров Д.Е. Исследование добавок, увеличивающих морозостойкость керамического кирпича / Д.Е. Захаров, А.И. Аксенов, В.В. Николаенко // Наука через призму времени. - 2017. - № 3(3). - С. 13-19.
3. Боровков А.В. Конструктивные решения и анализ работы наружных каменных стен железобетонных зданий в условиях Северо-кавказского региона / А.В. Боровков, М.Ю. Згонникова // В сборнике: Кавказский диалог. Материалы X международной научно-практической конференции. - 2019. - С. 63-69.
4. Ананьев А.И. Долговечность, влажностный режим и теплозащитные свойства наружных стен зданий из пустотелого кирпича // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. - 2018. - № 3. - С. 70-73.
5. Степанова В.Ф. Исследование морозостойкости бетона с целью уточнения методов определения его морозостойкости/морозосолеустойкости / В.Ф. Степанова, Н.К. Розенталь, Г.В. Чехний, И.М. Паршина // Вестник НИЦ Строительство. - 2020. - №1(24). - С. 108-117.
6. Иванцов А.И. Исследование старения теплоизоляционных материалов наружных стен под воздействием повышенных температур // Образование. Архитектура. Строительство: Материалы Всероссийской научно-практической конфе-



ренции по специальности «Проектирование зданий». - 2016. - С. 157-160.

7. Гуюмджян П.П. Исследование долговечности пенополистирола строительного назначения / П.П. Гуюмджян, С.В. Коканин, С.В. Цыбакин // Вестник МГСУ. - 2012. - №1. - С. 88-93.

8. Гуюмджян П.П. Исследование теплофизических свойств пенополистирола при его старении / П.П. Гуюмджян, С.В. Коканин, А.А. Пискунов // Строительство и реконструкция. - 2011. - №2. - С. 69-76.

9. Ярцев В.П. Эксплуатационные свойства и долговечность теплоизоляционных материалов (минеральной ваты и пенополистирола) / В.П. Ярцев, А.А. Мамонтов, С.А. Мамонтов // Кровельные и изоляционные материалы. - 2013. - № 1. - С. 8-11.

10. Иванов Д.В. Определение долговечности экструзионного пенополистирола в конструкциях дорожных одежд / Д.В. Иванов, К.А. Андрианов, В.П. Ярцев // ACADEMIA. Архитектура и строительство. - 2010. - №3. - С. 639-943.

Поступила в редакцию 28.04.2020 г.

THERMAL AGING OF POLYMER-CONTAINING THERMAL INSULATION MATERIALS IN EXTERIOR WALLS

© 2020 V.N. Kupriyanov, A.I. Ivantsov*

The longevity of wall materials is evaluated, as a rule, by the frost resistance cycles of the materials (brick, concrete, etc.). As a rule, resilient polymer-containing heat-insulating materials are located in the outer layers of modern building envelopes. For this materials alternate freezing and thawing of moisture does not lead to their mechanical destruction. In this regard, frost resistance of such materials is not a determining factor in assessing the durability of external walls.

However, it is known that polymeric materials are subject to thermal aging, which may result in a decrease in their thermal protection. Thus, the determining factor in assessing the durability of external walls with polymer-containing heat-insulating materials should be their thermal aging.

The article presents the results of a study of the temperature regime of operation of expanded polystyrene and mineral wool on a polymer binder. It has been shown that the outer layers of thermal insulation materials are located at elevated temperatures for a significant part of the year. Modeling the established thermal effect in laboratory conditions allowed us to obtain patterns of increasing thermal conductivity coefficients of the studied materials and to develop a method for assessing the service life of external walls by the loss of the required thermal protection.

Keywords: longevity, building envelopes, polymeric materials, thermal aging, mode of operation.

Received for publication on 28.04.2020

* Kupriyanov Valeriy Nikolaevich - Honored Worker of Science of the Russian Federation, Corresponding member of the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences, Doctor of Sciences, Professor; Ivantsov Aleksey Igorevich - Candidate of Sciences; Kazan State University of Architecture and Engineering (Kazan, Russia).



КЛИМАТИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ВАКУУМНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПАНЕЛЕЙ*

© 2020 Л.И. Куприяшкина, Д.Л. Карандашов,
М.А. Муханов, Д.А. Родькина**

В статье рассмотрено влияние вида оболочки вакуумных теплоизоляционных панелей на теплотехнические характеристики исследуемых образцов. Показано воздействие климатических условий на эксплуатационные характеристики испытываемых вакуумных панелей.

Ключевые слова: вакуумные панели, теплоизоляция, климатическая стойкость, коэффициент теплопроводности, оболочка.

Теплопроводность – способность материала проводить тепло, является главной технической характеристикой всех видов теплоизоляции. На величину теплопроводности утеплителей влияют габариты, тип, общая плотность материала и расположение пустот [1]. Непосредственное влияние на теплопроводность оказывают влажность и температура материала. Теплоизоляционные материалы должны выдерживать высокие температуры без нарушения структуры, воспламенения и т.д.

Чем ниже характеристика воздухопроницаемости, тем выше термоизолирующие свойства материала [2]. Существуют различные методы определения теплопроводности материалов.

Для определения теплопроводности поверхностным преобразователем применяют измерительный комплекс (рис. 1), состоящий из:

- ❖ первичного преобразователя, предназначенного для преобразования импульса электрической энергии в тепловую и создания электрического сигнала, характе-

ризующего изменение температуры поверхности материала изделия под воздействием теплового импульса;

- ❖ вторичного измерительного прибора для регистрации электрического сигнала;

- ❖ импульсного источника тока с таймером теплового импульса, обеспечивающе-

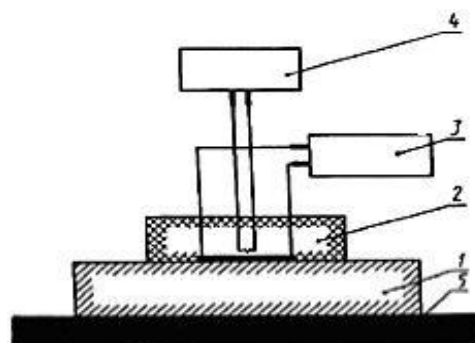


Рис. 1. Блок-схема измерительного комплекса для определения теплопроводности материалов изделий:

1 - исследуемое изделие; 2 - первичный преобразователь; 3 - вторичный измерительный прибор для регистрации электрического сигнала; 4 - импульсный источник тока с таймером теплового импульса; 5 - основание

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №1848130001 «Оптимизационное моделирование свойств теплоизоляционных функционально-градиентных изделий на основе минеральных порошков оксида кремния, синтезированного из природного диатомита». Представлена в качестве доклада на XI Академических чтениях РААСН - Международной научно-технической конференции «Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций», посвященной памяти первого Председателя Научного совета РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» Почетного члена РААСН, д.т.н., профессора Зайцева Юрия Владимировича (Саранск, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», 2020 год).

** Куприяшкина Людмила Ивановна - кандидат технических наук, доцент, Карандашов Денис Леонидович - магистрант, Муханов Михаил Александрович - магистрант, Родькина Дарина Алексеевна - бакалавр, все - ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва», г. Саранск, Россия.

го нагрев пластины первичного преобразователя.

В качестве вторичного измерительного прибора применяют вольтметр чувствительностью не хуже $1 \cdot 10^{-6}$ В с цифровым автономным или встроенным устройством и таймером опроса датчика, задающим интервалы регистрации. Допускается применение других измерительных приборов, удовлетворяющих требованию настоящего стандарта.

Для испытаний отбирают изделия, соответствующие требованиям нормативных документов на эти изделия. Изделия должны иметь плоскую поверхность для размещения первичного преобразователя и обеспечения теплового контакта между ними. Допускается определять теплопроводность на изделиях правильной и неправильной формы. Количество изделий, отбираемых для испытания, устанавливают в нормативных документах на эти изделия, но не менее трех.

Для испытаний сыпучих материалов их засыпают в рамку размером $300 \times 300 \times 50$ мм, выравнивают поверхность исследуемого материала для создания теплового контакта с размещенным на нем первичным преобразователем. Размер гранул испытываемого сыпучего материала должен быть не более 5 мм. Теплопроводность материалов изделий определяют в сухом и влажном состоянии. Испытания проводят при установившемся тепловом равновесии между исследуемым изделием, телом первичного преобразователя и окружающей средой, для чего устанавливают первичный преобразователь на поверхность изделия и выдерживают до появления на табло вторичного измерительного прибора установившихся показаний. При испытании изделия толщиной менее 15 см одна из его поверхностей должна находиться в тепловом контакте с поверхностью массивного основания.

Регистрируют установившийся сигнал, поступающий от первичного преобразователя, и включают цифровую печать. Подают тепловой импульс нажатием соответствующей пусковой кнопки. Через равные промежутки времени, автоматически устанавливаемые вторичным измерительным прибором, регистрируют изменение сигнала, пропорционального избыточной температуре поверхности исследуемого изделия. Регистрацию проводят до появления повторяющихся значений. Измерения проводят не менее, чем на пяти участках поверхности исследуемого изделия, в том числе на участках с неоднородными по теплопроводности включениями.

Для определения теплопроводности исследуемых стеновых панелей использовался метод стационарного теплового потока. Он заключается в создании стационарного теплового потока, проходящего через плоский образец определенной толщины и направленного перпендикулярно к лицевым (наибольшим) граням образца, измерении

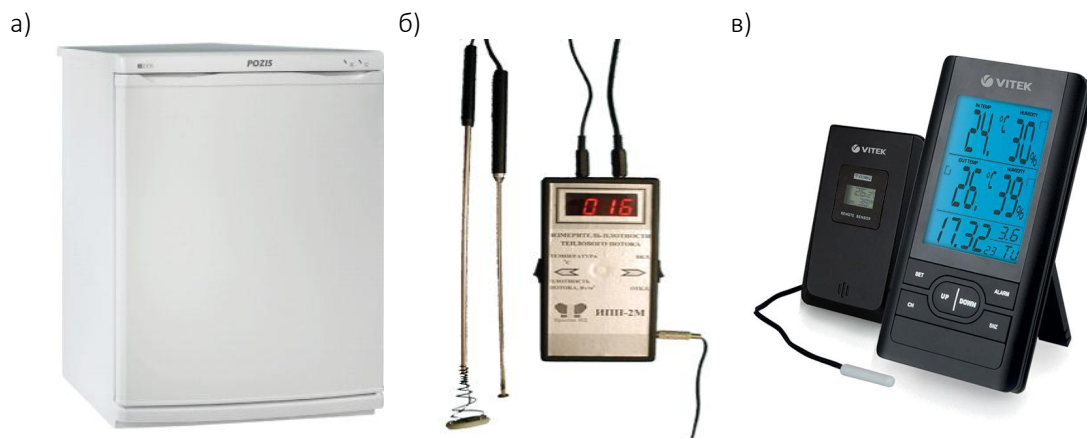


Рис. 2. Оборудование для определения теплопроводности:

а) морозильная камера марки POZIS; б) измеритель плотности тепловых потоков ИПП-2; в) метеостанция VITEKVT-3532 BK



плотности этого теплового потока, с учетом температуры противоположных лицевых граней и толщины образца.

При проведении эксперимента вакуумная панель помещается в рамку из пенополистирола, устанавливаемую в морозильную камеру. На панель с двух сторон устанавливаются метеостанции VITEKVT-3532 ВК, снимающие температуру с поверхностей, а также измеритель плотности теплового потока ИПП-2 (рис. 2).

На основе полученных данных вычисляют коэффициент теплопроводности (λ):

$$\lambda = \frac{Q \cdot \Delta}{|t_1 - t_2|},$$

где Q - интенсивность теплового потока, Вт/м²;

Δ - толщина образца;

t_1 - температура на внешней поверхности панели, °С;

t_2 - температура на внутренней поверхности панели, °С.

Используя метод стационарного теплового потока, была рассчитана теплопроводность исследуемых панелей (рис. 3), числовые значения которых приведены в табл. 1.

Рассмотрено влияние условий внешнего климатического воздействия, т.е. температуры и относительной влажности воздуха, давления и солнечной радиации на долговечность разрабатываемых панелей, которые были установлены с помощью обо-



Рис. 3. Образцы исследуемых вакуумных панелей

Таблица 1. Определение коэффициента теплопроводности (ноябрь 2019 г.)

№	Q	t ₁	t ₂	Δ	m	λ
1.1	28	2,3	-17,2	9,275	28,79	0,013
1.2	54	2,5	-21,5	8,85	34,79	0,019
2.1	22	1	-18,5	10,25	54,97	0,011
2.2	40	1,1	-18,3	9,625	44,27	0,019
3.1	15	8,4	-11,8	8,35	29,59	0,006
3.2	33	-3,6	-21	9,5	32,10	0,018
4.1	25	-1,8	-20,8	10	44,63	0,013
5.1	50	-3,1	-21,8	12,475	73,48	0,033



Рис. 4. Испытательный полигон научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»

рудования научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва». После экспонирования образцов в реальных климатических условиях на натурных стендах испытательной лаборатории (рис. 4) в течение четырех месяцев, были проведены повторные испытания теплопроводности панелей (табл. 2).

Анализ показателей теплопроводности выявил:

- ❖ образец № 1.1 (покрытие - алюминиевая пленка) - показатель теплопроводности практически не увеличился, т.е. образец сохранил свои свойства;
- ❖ образцы № 1.2; 2.1; 2.2 (покрытие - алюминиевая пленка) - незначительное увеличение теплопроводности;
- ❖ образцы № 3.1; 4.1 (покрытие - полиэтиленовая пленка) - сильное снижение теплотехнических характеристик;

Таблица 2. Определение коэффициента теплопроводности (февраль 2020 г.)

№	Q	t ₁	t ₂	Δ	m	λ
1.1	37	5,1	-20,4	9,275	28,79	0,013
1.2	30	-5,8	-20,8	8,85	34,79	0,020
2.1	29	2,8	-21,1	10,25	54,97	0,012
2.2	47	1,3	-19,2	9,625	44,27	0,022
3.1	24	-1	-17,8	8,35	29,59	0,011
3.2	Развакуумирование панели					
4.1	43	2,5	-15,5	10	44,63	0,023
5.1	51	-1	-14,4	12,475	73,48	0,047

Усредненные показатели ряда климатических показателей (температура и влажность воздуха, атмосферное давление и солнечная радиация), оказывающих, предположительно, наибольшее влияние на стойкость теплоизоляционных панелей, представлены в табл. 3.

- ❖ образец № 3.2 (покрытие - полиэтиленовая пленка) - произошло развакуумирование панели.

Из полученных данных следует вывод, что полиэтиленовая пленка обладает более низкой прочностью, вследствие чего про-



Таблица 3. Усредненные климатические показатели

Климатические показатели	Неделя	Ноябрь (2019 г.)	Декабрь (2019 г.)	Январь (2020 г.)	Февраль (2020 г.)
Температура воздуха, °С	1	+2,84	-2,36	-2,00	-3,63
	2	+2,35	-2,93	-6,40	-7,85
	3	-2,83	-1,00	-0,61	-1,10
	4	-9,22	-5,16	0,37	-1,76
Влажность воздуха, %	1	82,40	91,29	99,38	90,27
	2	91,18	94,30	88,22	78,91
	3	92,41	99,17	86,18	94,30
	4	80,08	95,27	94,09	98,16
Атмосферное давление, мм рт. ст.	1	746,23	742,65	745,24	739,25
	2	757,18	751,35	750,75	751,70
	3	770,75	750,91	752,35	749,35
	4	763,72	754,85	738,13	736,00
Солнечная радиация, ватт/м²	1	3,25	2,80	3,20	3,35
	2	3,60	2,70	3,25	1,15
	3	3,15	2,35	2,50	2,10
	4	1,05	2,30	3,35	3,50

изошло развакуумирование образца; использование полиэтилена в образцах приводит к повышению теплопроводности по сравнению с образцами, покрытыми оболочкой из алюминиевой пленки.

Библиографический список

1. Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Киселев Н.Н., Селяев П.В. Оптимизация состава наполнителя вакуумной теплоизоляционной панели на основе пирогенного микрокремнезема // Известия высших учебных заведений. Строительство. - 2017. - № 5. - С. 36-42.

2. Долгов И.П., Киселев Н.Н., Куприяшкина Л.И., Нурлыбаев Р.Е., Селяев В.П. Разработка вакуумных панелей на основе микрокремнезема из наноструктурированного порошка частиц диатомита [Электронный ресурс] // Ogarev-online. - 2018. - №9. URL: <http://journal.mrsu.ru/arts/razrabotka-vakuumnykh-panelej-na-osnove-mikrokremnezema-iz-nanostrukturirovannogo-poroshka-chastich-diatomita> (дата доступа 20.04.2020)

Поступила в редакцию 28.04.2020 г.

CLIMATE RESISTANCE OF VACUUM INSULATION PANELS

© 2020 L.I. Kupryashkina, D.I. Karandashov,
M.A. Mukhanov, D.A. Rodkina*

The article considers the influence of the type of shell of vacuum thermal insulation panels on the thermal characteristics of the studied samples. The influence of climatic conditions on the performance characteristics of the tested vacuum panels is shown.

Keywords: vacuum panels, thermal insulation, climate resistance, thermal conductivity coefficient, shell.

Received for publication on 28.04.2020

* Kupryashkina Lyudmila Ivanovna - Candidate of Technical Science, Associate Professor, Karandashov Denis Leonidovich - master's student, Mukhanov Mikhail Alexandrovich - master's student, Rodkina Darina Alekseevna - student, Mordovian State University named after N. P. Ogarev (Saransk, Russia).



ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ*

© 2020 Т.А. Низина, Д.Р. Низин,
Н.С. Канаева, Д.А. Климентьева**

Проведен анализ механизма деформирования под действием растягивающих напряжений образцов полимерного материала на основе эпоксидной смолы Этал-247 и отвердителя Этал-45М. С помощью метода минимального покрытия определены координаты «критических» точек кривых деформирования эпоксидных полимеров, соответствующие минимальным значениям индекса фрактальности. Проанализирован характер накопления повреждений в структуре полимерных композитов под действием растягивающих напряжений.

Ключевые слова: эпоксидные полимеры, кривые деформирования, фрактальный анализ, временные ряды, метод минимального покрытия.

Известно, что разрушение композиционных строительных материалов представляет собой процесс множественного зарождения, развития и агрегации различного рода дефектов и микротрещин вплоть до появления макротрещин [1, 2]. Повышение требований к прочности, надежности и долговечности строительных материалов и конструкций приводит к необходимости более детального анализа процессов разрушения применяемых композитов. Актуальность задачи количественного анализа механизмов деформирования и разрушения композиционных строительных материалов повышается с каждым годом, в том числе с появлением новых видов композиционных материалов на основе полимерных связующих.

В последние годы в практику научных исследований все чаще внедряется высокоточное оборудование, в том числе для определения прочностных показателей композиционных материалов различного вида и назначения, которое способно фиксировать получаемые данные с высокой частотой снятия показаний. Для анализа формируемых массивов данных и извлечения важной информации о процессе деформирования композитов при сжатии и растяжении авторским коллективом предложена методика определения характеристических точек исследуемых кривых, основанная на фрактальном анализе временных рядов с помощью метода минимального покрытия [3-8]. В научной литературе приводятся различные способы

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-08-01050 А «Исследование влияния интенсивности воздействия климатических факторов на характер разрушения полимерных композитов и прогнозирование их долговечности в условиях натурного воздействия». Представлена в качестве доклада на XI Академических чтениях РААСН - Международной научно-технической конференции «Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций», посвященной памяти первого Председателя Научного совета РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» Почетного члена РААСН, д.т.н., профессора Зайцева Юрия Владимировича (Саранск, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», 2020 год).

** Низина Татьяна Анатольевна (nizinata@yandex.ru) - советник РААСН, доктор технических наук, профессор; Низин Дмитрий Рудольфович (nizindi@yandex.ru) - кандидат технических наук, инженер; Канаева Надежда Сергеевна (aniknadya@yandex.ru) - аспирант; Климентьева Диана Артуровна (klimenteva.diana2016@yandex.ru) - студент; все - ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», Россия, Саранск.



определения фрактальной размерности структуры реальных композиционных материалов [9-17], однако все они, как правило, дают лишь интегральную оценку структуры и свойств исследуемых композитов, не позволяя количественно определять координаты «особых» точек, в которых происходит формирование дефектов структуры, приводящих впоследствии к разрушению композита. Разработанная методика позволяет проводить как интегральную количественную оценку процесса разрушения композиционных материалов при сжатии и растяжении, а также определять положение параметрических точек кривых разрушения, построенных с высокой частотой снятия показаний (0,01 сек.).

Рассмотрим основные положения метода минимального покрытия, используемого для определения фрактальных характеристик временных рядов, основные положения которого изложены в работах [18-20]. Предположим, что существует временной ряд $y(t)$, определенный на некотором участке $[a, b]$. Разобьем данный участок на m частей

$$\omega_m = [a = t_0 < t_1 < \dots < t_m = b]$$

и определим значения функции $y = f(t)$ в классе покрытий, состоящих из прямоугольников

с основанием $\delta = \frac{b-a}{m}$ (рис. 1 [18]). Тогда

высота прямоугольника на отрезке $[t_{i-1}, t_i]$ будет равна разности между максимальным и минимальным значением функции $f(t)$ на

этом отрезке - $K_i(\delta)$. Введя величину амплитудной вариации функции $f(t)$, соответствующей масштабу разбиения δ на отрезке $[a, b]$

$$V_f(\delta) = \sum_{i=1}^m K_i(\delta), \quad (1)$$

получим зависимость для определения полной площади покрытия:

$$S_\mu(\delta) = V_f(\delta) \times \delta. \quad (2)$$

Тогда согласно [18] индекс фрактальности можно определить из линеаризации зависимости

$$V_f(\delta) \sim \delta^{-\mu} \text{ при } \delta \rightarrow 0. \quad (3)$$

При этом фрактальная размерность связана с индексом фрактальности, определяемым методом минимального покрытия, как

$$D_\mu = \mu + 1. \quad (4)$$

В качестве объекта исследования в данной работе был выбран полимер, получаемый на основе модифицированной эпоксидной смолы Этал-247 (ТУ 2257-247-18826195-07), отверждаемой отвердителем Этал-45М (ТУ-2257-045-18826195-01), представляющим собой смесь ароматических и алифатических ди- или полиаминов, модифицированную салициловой кислотой. Данный отвердитель позволяет повысить подвижность и жизнеспособность полимерных смесей на его основе по сравнению с композициями на основе полиэтиленполиамин; является нетоксичным веществом, не вызывает аллергических реакций, не имеет неприятного запаха.

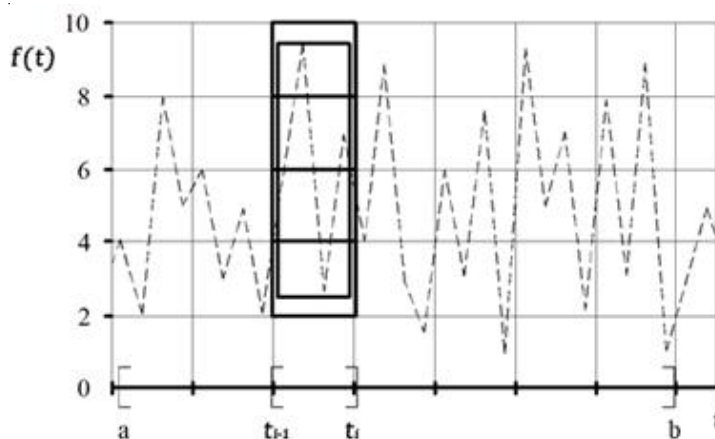


Рис. 1. Фрагмент клеточного (квадраты) и минимального (прямоугольник) покрытий графика фрактальной функции на отрезке $[t_{i-1}, t_i]$



Для проведения механических испытаний составов полимерных композитов на растяжение использовалась разрывная машина серии AGS X с программным обеспечением TRAPEZIUM X. Частота фиксации значений напряжений и деформаций составляла 0,01 сек. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) «Пластмассы. Метод испытания на растяжение» при температуре 23 ± 2 °C и относительной влажности воздуха $50 \pm 5\%$. Скорость перемещения зажимов испытательной разрывной машины составляла 2 мм/мин. Параллельно испытывали не менее 10 образцов, имеющих форму «восьмерок» (тип 2 согласно ГОСТ 11262-2017).

Анализ полученных результатов показал, что кривая деформирования для образцов данного состава характеризуется как восходящей, так и нисходящей ветвями, что позволяет определить прочностные и деформационные характеристики эпоксидного полимера при растяжении и разрыве (рис. 2, а). Предел прочности при растяжении и относительное удлинение при максимальной нагрузке, соответственно, равны 37,3 МПа и 6,96%; предел прочности и относительное удлинение при разрыве (разрушении) - 33,1 МПа и 10,67%.

Детализация кривой деформирования (рис. 2, б), построенной с высокой частотой снятия показаний, свидетельствует, что про-

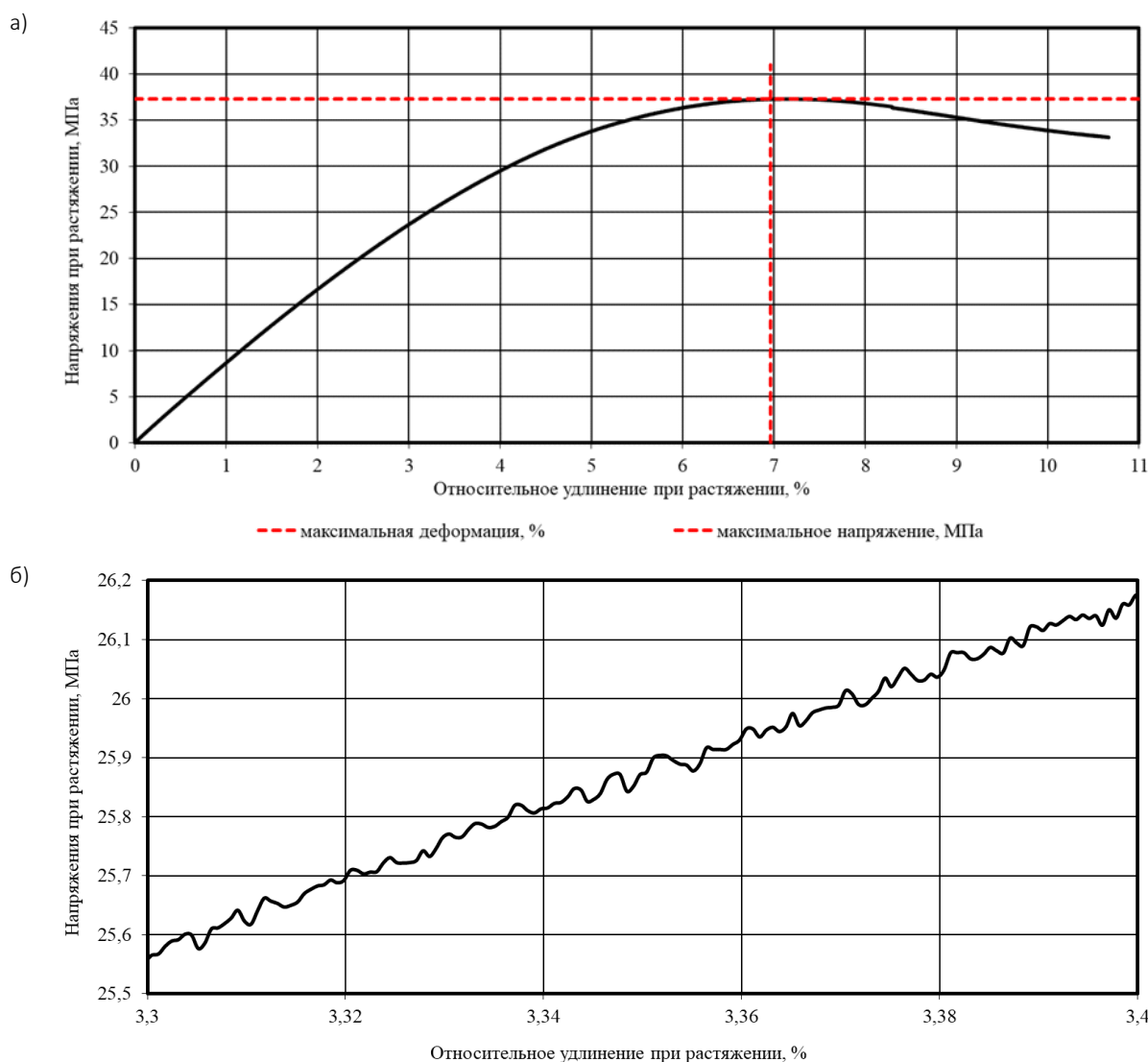


Рис. 2. Общий вид (а), фрагмент (б) кривой деформирования и прирост напряжений (в) в образцах эпоксидных полимеров при растяжении (штриховой линией красного цвета обозначен уровень максимальных напряжений и соответствующих им деформаций) (начало)

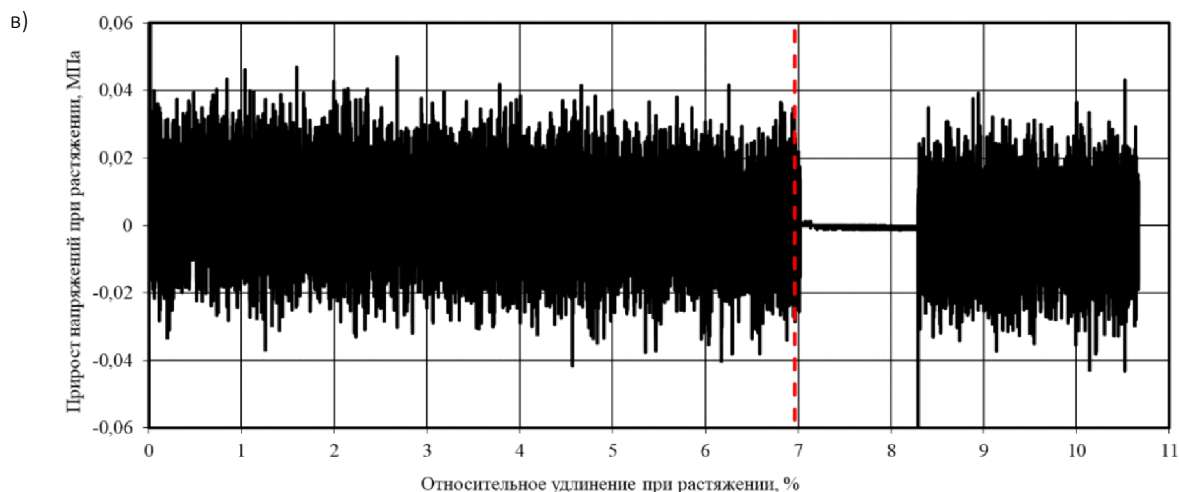


Рис. 2. Общий вид (а), фрагмент (б) кривой деформирования и прирост напряжений (в) в образцах эпоксидных полимеров при растяжении (штриховой линией красного цвета обозначен уровень максимальных напряжений и соответствующих им деформаций) (окончание)

цесс нагружения полимерных материалов сопровождается дискретными актами повышения и падения напряжений. При этом график изменения прироста напряжений при растяжении в образцах в зависимости от уровня относительного удлинения (рис. 2, в), построенный с шагом, эквивалентным 0,01 сек., свидетельствует, что данный процесс представляет собой типичный временной ряд.

Для определения индекса фрактальности μ при анализе кривой деформирования исследуемого полимерного композита использовалась последовательность m вло-

женных разбиений, где $m = 2^n$, где $n = 0, 1, 2, 3, 4$. Каждое разбиение состояло из 2^n интервалов, содержащих 2^{4-n} экспериментальных точек. Для каждого разбиения ω_m вычислялась амплитудная вариация $V_f(\delta)$ по формуле (1), где $K_i(\delta)$ определялась как разница между максимальным и минимальным приростом напряжения при растяжении на временном интервале $[t_{i-1}, t_i]$. По коэффициенту β уравнения регрессии $\log(V_f(\delta)) = \alpha_0 + \beta \times \log(\delta)$, определенному с

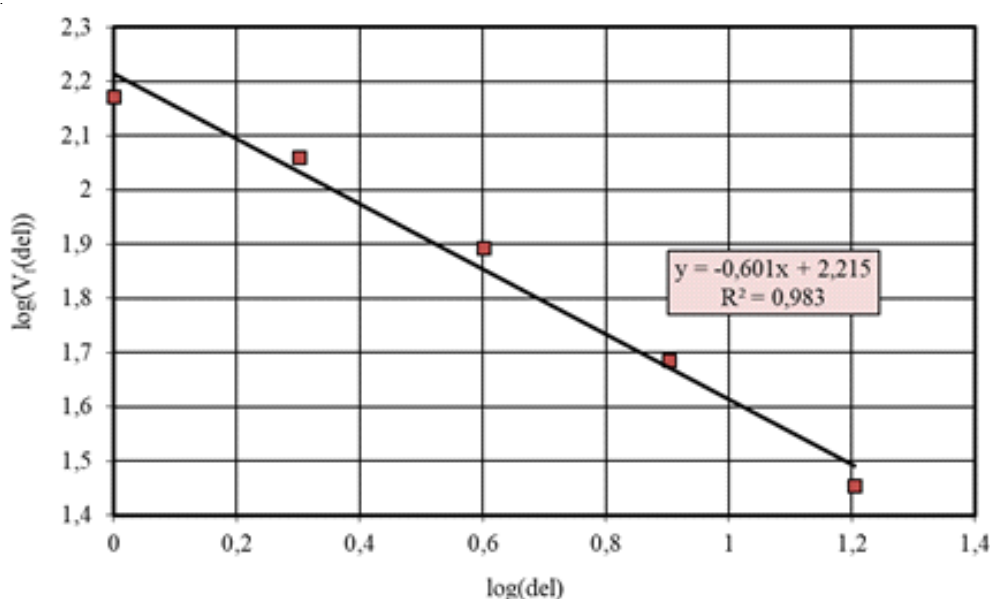


Рис. 3. Изменение $\log(V_f(\delta))$ от $\log(\delta)$

помощью метода наименьших квадратов, определяли индекс фрактальности и размерность минимального покрытия:

$$\mu = -\beta; D_{\mu} = 1 + \mu.$$

Согласно результатам, представленным на рис. 3, индекс фрактальности и фрактальная размерность кривой деформирования эпоксидного композита, полученного на основе эпоксидной смолы Этал-247 и отвердителя Этал-45М (до уровня достижения максимального напряжения), равна соответственно 0,601 и 1,601.

Анализ данных, отражающих изменение индекса фрактальности в зависимости от уровня относительного удлинения при растяжении, определяемого со смещением анализируемого участка с шагом $2^4 = 16$ точек, показал (рис. 4), что в процессе нагружения происходит периодическое резкое снижение данного показателя (см. точки желтого и красного цвета), варьирующееся, в целом, для участка кривой деформирования до уровня максимальных напряжений от 0,284 до 0,781. На наш взгляд, данные резкие снижения значений индекса фрактальности связаны с переходом системы в нестабильное состояние, связанное с формированием в структуре полимерного композита микроразрушений под действием растягивающих

нагрузок. При этом до достижения композитом состояния разрушения работоспособность образца обеспечивается, в основном, за счет передачи нагрузки на зоны без микродефектов, что выражается на графике как повышение значений μ выше уровня 0,5.

Из анализа временных рядов известно [18-20], что чем выше значение μ , тем стабильнее ряд. Если $\mu < 0,5$, то ряд интерпретируют как «тренд» (период резкого движения вверх или вниз, свидетельствующего, как правило, о возникновении «критического» состояния в исследуемой системе); если $\mu > 0,5$, то как «флэт» (период относительного спокойствия). При $\mu \approx 0,5$ говорят о соответствии происходящих изменений броуновскому движению.

Таким образом, из анализа рис. 4 можно выявить «критические» моменты нагружения, для которых индекс фрактальности будет принимать наименьшие значения. В данном случае для анализируемого полимерного образца подобные временные координаты, соответствующие точкам бифуркации, наступали через: 14,51÷14,56; 35,14; 45,92; 47,88; 82,15; 98,32 и 102,78 секунд от начала нагружения (см. первые 15 точек на рис. 4). Наименьшие значения индекса фрак-

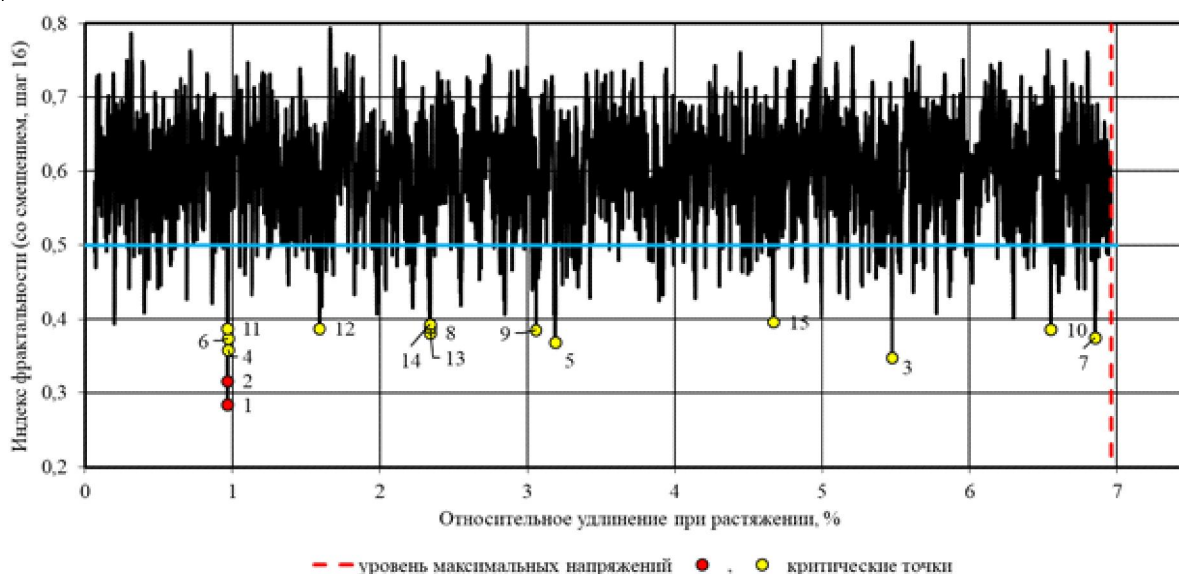


Рис. 4. Изменение индекса фрактальности кривых деформирования эпоксидного полимера при растяжении в зависимости от уровня относительного удлинения при растяжении



**Координаты «критических» точек кривой деформирования
эпоксидного полимера при воздействии растягивающих нагрузок**

Номер «критической» точки	Индекс фрактальности μ	Параметры точек					
		абсолютные величины			относительные величины		
		$t_{\text{крит.}}, \text{сек.}$	$\sigma_{\text{крит.}}, \text{МПа}$	$\epsilon_{\text{крит.}}, \%$	$\frac{t_{\text{крит.}}}{t_{\text{раст.}}}, \%$	$\frac{\sigma_{\text{крит.}}}{\sigma_{\text{раст.}}}, \%$	$\frac{\epsilon_{\text{крит.}}}{\epsilon_{\text{раст.}}}, \%$
1	0,284	14,53	8,408	0,966	13,91	22,54	13,88
2	0,317	14,52	8,398	0,966	13,90	22,51	13,87
3	0,349	82,15	35,219	5,474	78,64	94,41	78,63
4	0,358	14,56	8,418	0,968	13,94	22,56	13,91
5	0,369	47,88	24,895	3,190	45,83	66,73	45,81
6	0,373	14,55	8,419	0,968	13,93	22,57	13,90
7	0,375	102,78	37,262	6,850	98,38	99,89	98,38
8	0,381	35,14	19,161	2,340	33,64	51,36	33,61
9	0,385	45,92	24,057	3,059	43,96	64,49	43,94
10	0,386	98,32	37,054	6,552	94,11	99,33	94,11
11	0,388	14,51	8,387	0,965	13,89	22,48	13,86
12	0,388	23,88	13,503	1,590	22,86	36,20	22,83
13	0,388	35,13	19,158	2,340	33,63	51,36	33,61
14	0,393	35,15	19,168	2,341	33,65	51,38	33,62
15	0,396	70,11	32,585	4,672	67,11	87,35	67,10

тальности (точки 1 и 2), соответствующие μ 0,284 и 0,317, зафиксированы через 14,52÷14,53 сек. (выделено точками красного цвета на рис. 3). Для данного временного участка наблюдается групповое снижение данного показателя, характеризуемое близким группированием «критических» точек 1, 2, 4, 6 и 11. Подобный групповой «проблемный» участок выявлен через 35,13-35,15 сек. от начала деформирования (см. точки, 8, 13 и 14). Подобное последовательное падение μ в серии соседних точек свидетельствует о возникновении все больших «трудностей» при восприятии растягивающих напряжений образцом и начале процесса разуплотнения структуры, зарождении очагов локального разрушения, приводящих впоследствии к его разрушению. Числовые значения уровней напряжений и относительных деформаций в пятнадцати наиболее «критических» точек в абсолютных и относительных величинах (по отношению к точке достижения максимальных напряжений при растяжении) приведены в таблице.

Предложенный подход для исследования механизма деформирования композиционных материалов при растяжении, осуществляемый на основе метода фрактального анализа кривых деформирования, регис-

трируемых с помощью современного испытательного оборудования с высокой частотой, позволяет получить ценную количественную информацию о процессе накопления в его структуре микро- и макродефектов, приводящих к разрушению композитов. На наш взгляд, проведение подобных исследований на образцах полимерных композитов различного состава, а также после старения в условиях воздействия разнообразных агрессивных факторов, в том числе климатических, позволит получить ценную информацию о процессах, протекающих в структуре композиционных материалов при приложении растягивающих нагрузок.

Библиографический список

1. Иванова В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. М.: Наука, 1994. 384 с.
2. Статистическая модель дискретно-непрерывного (квантового) механизма разрушения фрактальной структуры цементных композитов / В.П. Селяев, Е.С. Безрукова, Е.Л. Кечуткина, В.В. Селяев // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всерос. научн.-техн. конф. 2019. С. 308-317.
3. Фрактальный анализ кривых деформирования дисперсно-армированных мелкозернис-



тых бетонов при сжатии / В.П. Селяев, Т.А. Низина, А.С. Балыков, Д.Р. Низин, А.В. Балбалин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. №1. С. 129-146.

4. Fractal analysis of deformation curves of disperse reinforced fine-grained concrete under compression / V.P. Selyayev, T.A. Nizina, A.S. Balykov, D.R. Nizin, A.V. Balbalin // PNRPU mechanics bulletin, 2018, no. 1-2, pp. 84-93.

5. Applying the Fractal Analysis Methods for the Study of the Mechanisms of Deformation and Destruction of Polymeric Material Samples Affected by Tensile Stresses / T.A. Nizina, D.R. Nizin, N.S. Kanaeva, N.M. Kuznetsov, D.A. Artamonov // Key engineering materials. 2019. Vol. 799. P. 217-223.

6. Application of fractal analysis methods in the study of deformation mechanisms and composite building materials fracture / T.A. Nizina, V.P. Selyayev, D.R. Nizin, A.S. Balykov, D.I. Korovkin, N.S. Kanaeva // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. UK. 2018. №456. P. 1-6.

7. Фрактальный анализ кривых деформирования эпоксидных полимеров при растяжении / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, Д.А. Артамонов, Н.С. Канаева // Полимеры в строительстве: научный Интернет-журнал. 2019. №1 (7). С. 48-57.

8. Применение методов фрактального анализа при исследовании механизмов деформирования и разрушения образцов эпоксидных полимеров под действием растягивающих напряжений / Д.Р. Низин, Т.А. Низина, Н.С. Канаева, Д.А. Артамонов, Д.А. Климентьева // [Электронный ресурс] // Огарев-online. 2020. №3. Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/primenenie-metodov-fraktalnogo-analiza-pri-issledovanii-mexanizmov-deformirovaniya-i-razrusheniya-obrazcov-epoksidnyx-polimerov-pod-dejstviem-rastyagivayushhix-napryazhenij>

9. Mandelbrot B. B. The fractal geometry of nature. N.Y. : Freeman, 1983. 480 p.

10. Федер Е. Фракталы: пер. с англ. М.: Мир, 1991. 254 с.

11. Определение фрактальной размерности как структурного параметра при анализе полимерных композитов / В.П. Селяев, Т.А. Низина, Ю.А. Ланкина, В.В. Цыганов // Достижения, проблемы и перспективные направления разви-

тия теории и практики строительного материаловедения: Десятые Академические чтения РААСН. Казань: Изд-во КГАСУ, 2006. С. 73-76.

12. Хахардин А.Н. Фрактальная размерность дисперсных и пористых материалов / А.Н. Хахардин, Е.И. Ходыкин // Строительные материалы. 2007. № 8. С. 62-63.

13. Селяев В.П. Фрактальный анализ структуры наполненных полимерных композитов / В.П. Селяев, Т.А. Низина, Ю.А. Ланкина // Известия ВУЗов. Строительство. 2007. №4. С. 43-48.

14. Хамидулина Д.Д. Применение теории фрактальной геометрии в строительном материаловедении / Д.Д. Хамидулина, И.В. Шишкин // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2015. Т. 2. С. 5-8.

15. Экспериментальное исследование фрактальных закономерностей роста усталостной трещины и диссипации энергии в ее вершине / М.В. Банников, А.Ю. Федорова, А.И. Терехина, О.А. Плехов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2013. №2. С. 21-36.

16. Топологическая оптимизация процессов формирования микроструктуры цементного камня и бетона / В.Т. Перцев, С.П. Козодаев, А.А. Ледедев, А.Н. Бобрышев // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2015. №1. С. 21-28.

17. Фрактальные методы анализа структуры и свойств композиционных строительных материалов / В.П. Селяев, Н.С. Канаева, Т.А. Низина, Ю. А. Ланкина, Е.С. Буюнова // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2018. С. 158-163.

18. Старченко Н.В. Индекс фрактальности и локальный анализ хаотических временных рядов: Дис. ... к-та физ.-мат. наук: 01.01.03. Москва, 2005. 122 с.

19. Dubovikov M.M., Starchenko N.S. Variation index and its applications to analysis of fractal structures // Sci. Almanac Gordon. 2003. №1. Pp. 1-30.

20. Dubovikov M.M., Starchenko N.S., Dubovikov M.S. Dimension of the minimal cover and fractal analysis of time series // Physica A. 2004. №339. Pp. 591-608.

Поступила в редакцию 08.05.2020 г.



FRACTAL ANALYSIS OF THE DEFORMATION PROCESS
OF EPOXY POLYMERS UNDER TENSILE STRESS

© 2020 T.A. Nizina, D.R. Nizin,
N.S. Kanaeva, D.A. Klimenteva*

The analysis of the deformation mechanism under the action of tensile stresses of a polymer material samples based on Etal-247 epoxy resin and Etal-45M hardener is carried out. Using the method of minimum coverage, the coordinates of the “critical” points of epoxy polymers deformation curves are determined, which correspond to the minimum values of the fractality index. The character of damage accumulation in the polymer composites structure under the action of tensile stresses is analyzed.

Keywords: epoxy polymers, deformation curves, fractal analysis, time series, minimal coverage method.

Received for publication on 08.05.2020

* Nizina Tatyana Anatolyevna - Doctor of Sciences, Professor; Nizin Dmitry Rudolfovich - PhD, engineer; Kanaeva Nadeжда Sergeevna - Postgraduate Student; Klimenteva Diana Arturovna - Student; National Research Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia).



ДИАГРАММЫ РАЗРУШЕНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ АМОРФНОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФИБРОЙ*

© 2020 Ю.В. Пухаренко, В.И. Морозов,
Д.А. Пантелеев, М.И. Жаворонков**

Рассматриваются вопросы моделирования процесса деформирования и разрушения фибробетона, армированного новой разновидностью фибры - аморфнометаллической. Приводятся сведения об основных свойствах таких волокон и их влияния на механические характеристики фибробетона. Описываются зависимости, позволяющие теоретически моделировать поведение образцов при их испытании на прочность на растяжение при изгибе, и строить расчетные диаграммы прогибов образцов от прикладываемых к ним нагрузок. Так же в статье представлены результаты испытаний силовых и энергетических характеристик трещиностойкости фибробетона, его прочности на растяжение при изгибе и модуля упругости. Экспериментальные данные были получены в результате использования устройства, специально разработанного для проведения подобных исследований. Показано, что между полученными расчетными и экспериментальными данными наблюдается удовлетворительная сходимость.

Ключевые слова: цементный композит, фибробетон, деформации, вязкость разрушения, трещиностойкость, силовые и энергетические характеристики.

В настоящее время на кафедре технологии строительных материалов и метрологии Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета продолжают исследования свойств фибробетонов, изготавливаемых с применением различных видов волокон.

В современной строительной практике к строительным материалам предъявляются все более высокие требования по физико-механическим и эксплуатационным характеристикам, при этом требуется постоянное снижение материально-экономических затрат на производство и монтаж изготавливаемых изделий и конструкций. Данным условиям может ответить такой перспектив-

ный строительный материал как фибробетон. Свойствами и характеристиками получаемых фибробетонов можно в широких пределах управлять изменением вида и расхода армирующих волокон [1, 2]. При этом, степень влияния вида волокон при различных его расходах, с учетом всего многообразия существующих видов, остается изученной недостаточной. В связи с этим, особую актуальность приобретают теоретическое обоснование и разработка новых эффективных материалов, методов их испытаний, расчета и проектирования конструкций на их основе.

Одним из новых видов волокон, пополняющих существующую в настоящее время

* Работа представлена в качестве доклада на XI Академических чтениях РААСН - Международной научно-технической конференции «Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций», посвященной памяти первого Председателя Научного совета РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» Почетного члена РААСН, д.т.н., профессора Зайцева Юрия Владимировича (Саранск, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», 2020 год).

** Пухаренко Юрий Владимирович (tsik@spbgasu.ru) - доктор технических наук, профессор; Морозов Валерий Иванович (tsik@spbgasu.ru) - доктор технических наук, профессор; Пантелеев Дмитрий Андреевич (tsik@spbgasu.ru) - кандидат технических наук; Жаворонков Михаил Ильич (tsik@spbgasu.ru) - кандидат технических наук; все - Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург, РФ).



номенклатуру, является аморфное металлическое. Особенности такого вида волокон заключаются в технологии их производства, которая состоит в сверхбыстром охлаждении расплава легированной стали. Находясь в жидком состоянии, расплав не имеет упорядоченной кристаллической решетки, и при быстром охлаждении сохраняет структуру жидкости, переходя в аморфное состояние. Аморфная структура металла обуславливает его особые свойства: повышенную, по сравнению с кристаллическим металлом того же состава, прочность, твердость, коррозионную стойкость, а также более высокий коэффициент интенсивности напряжений. Волокна представляют собой отрезки лент длиной 40 мм, толщиной 20-30 мкм и шириной 2-3 мм. Введение таких волокон в состав бетона, так или иначе влияет на свойства получаемого композита и изменяет характер его деформирования и разрушения под нагрузкой.

Одним из наиболее информативных методов исследования фибробетонов, является построение диаграмм зависимостей прогибов от прилагаемых нагрузок, производимое в процессе испытания стандартных образцов - балок на растяжения при изгибе [3 - 5]. Такой метод испытаний регламентирует-

ся ГОСТ 29167. Учитывая особенности фибробетона как композиционного материала, существующая методика была усовершенствована и разработано устройство, позволяющее с высокой точностью строить диаграммы разрушения фиброармированных образцов. Примененные при разработке устройства технические решения позволили при использовании неравновесной схемы проведения испытаний контролировать упругие деформации фибробетонного образца с высокой точностью [6 - 7].

Проведенные исследования позволяют представить общий вид диаграммы деформирования фибробетонного образца под нагрузкой, обеспечивающей его изгиб вплоть до разрушения (рис. 1) [8].

На общем виде диаграммы можно отметить четыре ключевых точки, характеризующие переход материала от одной стадии работы материала под нагрузкой к другой. Точка *O* соответствует началу отсчета, на этом этапе к испытываемому образцу не прикладывается нагрузка. Сразу после точки *O* образец воспринимает действующую на него нагрузку, деформируясь упруго. Точка *T* показывает окончание действия упругих деформаций, правее этой точки диаграмма характеризует процесс микротрещинообразо-

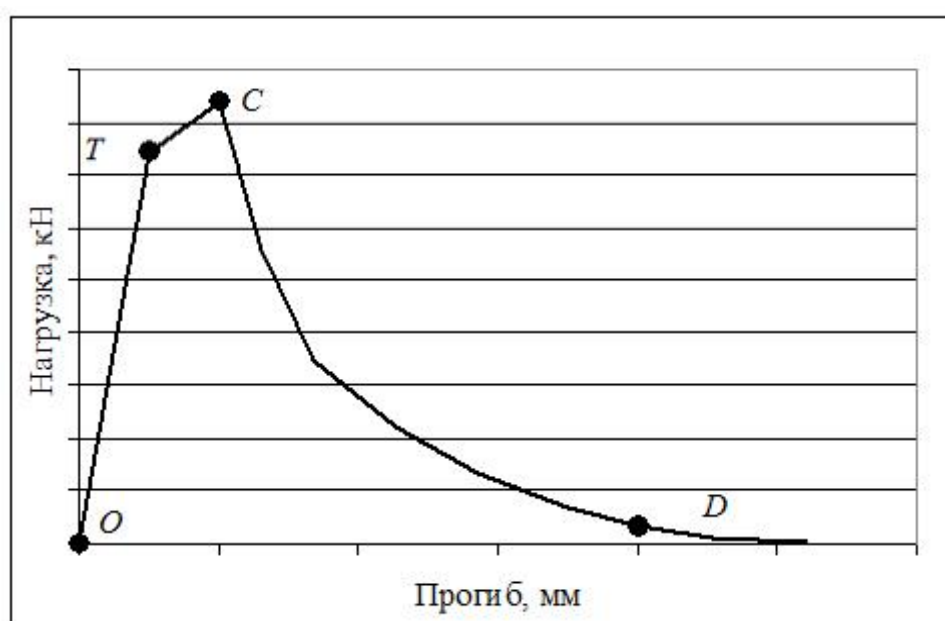


Рис. 1. Общий вид диаграммы деформирования фибробетонного образца



вания. Микротрещины образуются развиваются и сливаются в магистральную трещину, начало ее движения соответствует точке *C*. Правее точки *C* на диаграмме можно увидеть плавно нисходящий участок. Данный участок диаграммы описывает работу материала с трещиной. Точка *D* характеризует окончание испытания.

Представленные диаграммы можно построить экспериментальным путем в процессе испытаний натурных образцов. Однако этот процесс может оказаться достаточно трудоемким, поскольку перед началом испытаний требуется произвести специфическую подготовку образцов, а полученные данные следует обрабатывать по особой методике. Поэтому, представляется разумным произвести предварительное теоретическое прогнозирование поведения фибробетона под нагрузкой, а затем выборочно проверить полученные модели экспериментальным путем.

Совершенно очевидно, что высокомодульные и низкомодульные волокна по-разному влияют на механизмы разрушения фибробетона, при этом волокна могут как обрываться при разрушении фибробетона, так и вытягиваться из матрицы [9 - 11]. И при этом, координаты ключевых точек диаграмм будут зависеть от длины волокон, их диаметра, прочности, модуля упругости, расхода и прочности сцепления с матрицей. Большинство упомянутых характеристик представляют собой справочные данные, другие не сложно определить расчетным или экспериментальным путем по соответствующим методикам.

При проведении теоретического прогнозирования поведения фибробетона под нагрузкой, предлагается определять координаты ключевых точек диаграмм разрушения расчетным путем.

Для этого предполагается, что микротрещинообразование в фибробетоне начинается при одинаковых с неармированным образцом прогибах, которые по имеющейся информации колеблются в интервале 0,03-0,04 мм. В этом случае нагрузку, и соответ-

ственно местоположение точки *T*, можно определить по формуле (1):

$$P_T = \frac{f_T 48 E_{fb} I}{l_o^3}, \quad (1)$$

где P_T - нагрузка, действующая на образец; f_T - прогиб, соответствующий точке *T*; I - момент инерции; l_o - база образца (расстояние между опорами), E_{fb} - модуль упругости фибробетона, который можно рассчитать по правилу смесей (формула 2):

$$E_{fb} = \mu_b E_b + \phi \mu_f E_f, \quad (2)$$

где E_b и E_f - модули упругости бетона и фибры; μ_b и μ_f - объемные доли бетона и фибры; ϕ - экспериментальный комплексный коэффициент [5, 6].

Нагрузку в точке *C* можно найти, выражая из известной формулы прочности бетонного образца на растяжение при изгибе (формула 3):

$$P_c = \frac{2bh^2 R_{fb}}{3l_o}, \quad (3)$$

где R_{fb} - прочность фибробетона; b и h - ширина и высота образца.

Для расчета прочности фибробетона при использовании высокомодульной фибры при разрушения образца в результате разрыва волокон следует применять формулу 4:

$$R_{fb} = R_f \mu_f + 3,5 R_{к.з.} \mu_f + R_b (1 - 4,5 \mu_f) \quad (4)$$

где τ - прочность сцепления волокон с матрицей; l_f - длина фибры; μ_f - объемная доля фибры; d - диаметр фибры; R_b , R_f и $R_{к.з.}$ - прочность бетона, фибры и контактной зоны на границе раздела «волокно-матрица».

Для определения координаты, соответствующей точке *C* по оси прогибов, предлагается формула (5), полученная путем выражения этой величины из уравнения (1) после внесения некоторых изменений, связанных с тем, что в данный момент рассматривается зона пластического деформирования:

$$f_c = \frac{P_c l_o^3}{48 E_{fb}^1 I}, \quad (5)$$

где E_{fb}^1 - модуль деформации фибробетона.



Модуль деформации фибробетона можно найти по формуле 6:

$$E_{fb}^1 = \nu_f E_{fb}, \quad (6)$$

где E_{fb} - модуль упругости фибробетона, ν_f - коэффициент упругопластичности в момент, предшествующий разрушению фибробетона.

При построении линии CD необходимо учитывать, что при достижении максимальной нагрузки в точке С магистральная трещина в образце проходит через все рабочее сечение, и участие матрицы в дальнейшем процессе практически прекращается. Восприятие нагрузок в нисходящей части диаграммы обеспечивается только прочностью сцепления волокон с матрицей в процессе их вытягивания.

Для построения нисходящего участка диаграммы, в зависимости от длины фибры, следует применить формулу (7) которая позволяет определить прогиб в точке D при длине фибры больше критической, когда волокна при разрушении композита в основном разрываются, и вытягивается из матрицы лишь некоторая их часть, имеющая в ней неглубокую заделку

$$f_D = 2 \frac{l_c^4 d \tau b h \mu_f}{P_C} + f_C, \quad (7)$$

где l_c - критическая длина фибры.

Выше указывалось, нагрузка, соответствующая точке D, равна нулю. Соединив точки С и D, получим под линией CD прямоугольный треугольник, площадь которого равна энергетическим затратам на статическое разрушение композита в результате движения магистральной трещины, то есть вязкости разрушения фибробетона (W_{fb}). Следует заметить, что правая ветвь на экспериментальных диаграммах имеет вид плавно нисходящей линии. Для достижения удовлетворительного согласия между расчетными и экспериментальными диаграммами, можно путем последовательного приближения, в результате логарифмической аппроксимации полученного отрезка CD и увеличения прогиба в точке D, добиться равной с треугольником площади.

Примеры диаграмм, полученных расчетным путем с применением предлагаемых теоретических зависимостей, представлены на рис. 2.

Численные значения характеристик трещиностойкости, определенные с помощью расчетных диаграмм, приведены ниже в таблице. По представленным данным видно, что аморфная металлическая фибра значительно увеличивает модуль упругости, критический коэффициент интенсивности напряжений и повышает условные энерго-



Рис. 2. Расчетная и экспериментальная диаграмма разрушения фибробетона



Результаты расчетного и экспериментального определения характеристик трещиностойкости, прочности и модуля упругости

Характеристика трещиностойкости		Объемное содержание фибры, %		
		0 %	1 %	1,5 %
G^*_i - условные удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, Дж/м ²	Эксперимент	12	541	611
	Расчет		319	522
G^*_f - условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, Дж/м ²	Эксперимент	15	706	913
	Расчет		849	1189
K^*_c - условный критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м ^{0,5}	Эксперимент	0,35	0,73	0,94
	Расчет		0,76	0,85
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Эксперимент	4,41	9,37	10,54
	Расчет		9,81	11,01
Модуль упругости, МПа·10 ³	Эксперимент	30,1	38,2	40,1
	Расчет		37,3	39,9

затраты на разрушение на разных этапах работы образца под нагрузкой.

В целом, по представленным данным можно проследить удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных, что подтверждает справедливость выбранных подходов и принятых допущений. В некоторых отдельных случаях, когда разница между расчетными и экспериментальными данными представляется существенной следует отметить то, что при расчете рассматривался идеальный случай, тогда как на практике испытываемые образцы, как правило, имеют некоторые дефекты и отклонения.

Важно подчеркнуть, что значения энергозатрат и коэффициента интенсивности напряжений вычисляются с учетом координат точек Т и С на диаграммах разрушения фибробетонных образцов, точность определения которых стандартными методами вызывает серьезные затруднения.

В представленной работе предложены и апробированы теоретические зависимости, позволяющие строить диаграммы разрушения фибробетонных образцов, изготовленных с использованием аморфной металлической фибры, применение которых может значительно упростить и ускорить проведение предварительных этапов исследований свойств различных видов фибр. Предложенная методика и устройство, разработанные в рамках данного исследования, по-

зволили получить диаграммы разрушения фибробетонных образцов с более высокой, по сравнению со стандартным методом, точностью. Удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о справедливости предложенных подходов и допущений.

Библиографический список

1. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно - армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. - М.: Издательство АСВ, 2004. - 560 с.
2. Рабинович Ф.Н. Бетоны, дисперсно - армированные волокнами: Обзор / Всесоюзный научно-исследовательский институт научной и технической информации и экономики промышленности строительных материалов. - М., 1976 - 73 с.
3. Мэттьюз Ф. Композиционные материалы. Механика и технология. / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс - М.: Техносфера, 2004. - 408 с.
4. Партон В.З. Механика разрушения: От теории к практике. - М.: Наука, 1990. - 240 с.
5. Зерцалов М.Г. Экспериментальное определение характеристик трещиностойкости фибробетона / М.Г. Зерцалов, Е.А. Хотеев // Вестник МГСУ. - 2014. - № 5. - С. 91-99.
6. Жаворонков М.И. Методика определения энергетических и силовых характеристик разрушения фибробетона // Вестник гражданских инженеров. - 2014. - № 6(47). - С. 155-160.
7. Жаворонков М.И. Определение характеристик разрушения и модуля упругости фибробетона // Известия КГАСУ. - 2015. - № 3(33). - С. 114-120.



8. Пухаренко Ю.В. Диаграммы деформирования цементных композитов, армированных стальной проволоочной фиброй / Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, М.И. Жаворонков // Academia. Архитектура и строительство. - 2018. - № 2. - С. 143-147.

9. Пухаренко Ю.В., Голубев В.Ю. О вязкости разрушения фибробетона // Вестник гражданских инженеров. - 2008. - №3. - С. 80-83.

10. Пухаренко Ю.В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов // Строительные материалы. - 2004. - № 10(598). - С. 47-50.

11. Кострикин М.П. Характер и степень взаимодействия синтетической макрофибры с цементным камнем // Вестник гражданских инженеров. - 2018. - № 4(69). - С. 116-120.

Поступила в редакцию 28.04.2020 г.

DIAGRAMS OF DESTRUCTION OF CEMENT COMPOSITE MATERIALS REINFORCED WITH AMORPHOUS METAL FIBERS

© 2020 Yu.V. Pukharensko, V.I. Morozov,
D.A. Panteleev, M.I. Zhavoronkov*

The problems of modeling the process of deformation and fracture of fiber reinforced concrete reinforced with a new type of fiber - amorphous metal are considered. Information is provided on the basic properties of such fibers and their effect on the mechanical characteristics of fiber-reinforced concrete. The dependences are described that make it possible to theoretically simulate the behavior of samples during their testing for tensile strength in bending, and to construct calculated diagrams of deflection of samples from the loads applied to them. The article also presents the results of testing the force and energy characteristics of the crack resistance of fiber-reinforced concrete, its tensile strength under bending and the elastic modulus. The experimental data were obtained as a result of using a device specially designed for such studies. It is shown that satisfactory convergence is observed between the calculated and experimental data.

Keywords: cement composite, fiber-reinforced concrete, deformation, fracture toughness, crack resistance, power and energy characteristics.

Received for publication on 28.04.2020

* Pukharensko Yuri Vladimirovich - Doctor of Sciences, Professor; Morozov Valery Ivanovich - Doctor of Sciences, Professor; Panteleev Dmitry Andreevich - Candidate of Sciences; Zhavoronkov Mikhail Ilyich - Candidate of Sciences; Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Saint-Petersburg, Russia).



ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ АРБОЛИТОВЫХ БЛОКОВ*

© 2020 Ю.А. Соколова, М.В. Акулова,
Б.Р. Исакулов**

Серосодержащие арболитовые блоки при своей небольшой плотности (600-650 кг/м³) имеют достаточно высокую прочность, позволяющую использовать их в качестве теплоизоляционно-конструкционного материала, удовлетворительную морозостойкость и хорошие теплотехнические показатели. В работе проведены исследования механических свойств для определения их поведения при монтаже и эксплуатации. Показаны результаты поведения блоков в крупноблочной кладке при центральном сжатии, возникающие напряжения сжатия, растяжения, изгиба и среза, которые вызывают разрушение блоков в кладке. Выведены формулы для определения начального модуля упругости призм и блоков из арболитобетона. Установлена новая экспериментальная зависимость для вычисления величины несущей способности серосодержащего арболита при внецентренном сжатии.

Ключевые слова: серосодержащие конструкционные материалы, арболит, механические свойства.

Серосодержащие арболитовые блоки при своей небольшой плотности (600-650 кг/м³) имеют достаточно высокую прочность, позволяющую использовать их в качестве теплоизоляционно-конструкционного материала, достаточную морозостойкость и хорошие теплотехнические показатели. Для определения их поведения при монтаже и эксплуатации проведены исследования механических свойств серосодержащих арболитовых блоков.

Исследованию подверглись блоки из серосодержащего арболита плотностью 600-650 кг/м³. Как известно, предел прочности при сжатии легких бетонов зависит от их плотности. Эта зависимость между плотностью и кубиковой прочностью серосодержащих ар-

болитовых блоков может быть выражена формулой:

$$R_{куб}^{сyx} = 120c_{сyx}^2 - 40,5c_{сyx} + 12,5. \quad (1)$$

Коэффициент однородности k будет определяться соотношением:

$$k = R_{min} / R_{norm} = M \cdot (1 - 3\sigma/M) / R_{norm} = M \cdot (1 - 3C_v) / R_{norm}, \quad (2)$$

где C_v - коэффициент вариации, R_{min} - минимальный предел прочности бетона при сжатии, R_{norm} - нормативный предел прочности бетона при сжатии, M - среднее арифметическое по выборке, x - текущее значение прочности, σ - среднее квадратичное отклонение прочности.

Для предварительных подсчетов сопротивлений коэффициент однородности k на заводах, где технология хорошо отработана,

* Работа представлена в качестве доклада на XI Академических чтениях РААСН - Международной научно-технической конференции «Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций», посвященной памяти первого Председателя Научного совета РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» Почетного члена РААСН, д.т.н., профессора Зайцева Юрия Владимировича (Саранск, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», 2020 год).

** Соколова Юлия Андреевна - доктор технических наук, профессор, академик РААСН, Научно-исследовательский университет Московский государственный строительный университет (РФ, Москва); Акулова Марина Владимировна (m_akulova@mail.ru) - доктор технических наук, профессор, советник РААСН, Ивановский государственный политехнический университет (РФ, Иваново); Исакулов Баизак Разакович - доктор технических наук, доцент, «Баишев Университет» (Казахстан, Актобе).



следует принимать равным 0,5. Для заводов, где технология производства недостаточно отработана, $k = 0,25$. Анализ коэффициентов однородности для показателей прочности серосодержащего арболита показал, что их значение ниже, чем у обычных бетонов, вследствие влияния изменчивости показателя плотности.

Исследования изменения прочности с течением времени показали, что предел прочности при сжатии серосодержащего арболита в первые два месяца возрастает на 28%, при дальнейшем хранении в естественных условиях в течение 180 сут. прочность практически остается постоянной. Незначительные изменения прочности с течением времени следует отнести за счет изменения влажности опытных образцов. Наличие свободной влаги серосодержащих арболитов ведет к снижению их предела прочности при сжатии. Влияние свободной влаги на предел прочности при сжатии выражается формулой:

$$\frac{R_{\text{куб}}^{\text{вс}}}{R_{\text{куб}}^{\text{сух}}} = 0,001W^2 - 0,04W + 1, \quad (3)$$

где $R_{\text{куб}}^{\text{вс}}$ и $R_{\text{куб}}^{\text{сух}}$ - соответственно кубиковая прочность серосодержащего арболита в воздушно-сухом и высушенном состоянии, МПа; W - влажность, % по массе.

Серосодержащий арболит является достаточно однородным материалом. Предел прочности при сжатии его, как показали испытания, не зависит от ориентации направления сжимающей силы.

Для исследования прочности серосодержащего арболита были испытаны блоки по четырехрядной и двухрядной разрезке. Размеры блоков достигали 1200x400x400 и 1200x200x400 мм. Предел прочности стеновых серосодержащих блоков при центральном сжатии может быть определен по формулам:

$$R_1 = 0,5R_{\text{куб}}^{\text{сух}} \frac{F_{\text{нт}}}{F_{\text{бр}}} \quad (4)$$

$$R_2 = 0,7R_{\text{куб}}^{\text{вс}} \quad (5)$$

где R_1 , R_2 - прочность серосодержащего арболита в МПа; $F_{\text{нт}}$ и $F_{\text{бр}}$ - соответственно площади сечения блока по нетто и брутто в см^2 .

Формулы (4) и (5) применимы для сплошных серосодержащих арболитовых блоков при проценте пустотности $P_d \leq 5\%$. Блоки при сжатии испытывают сложное напряженное состояние, и прочность их зависит отряда факторов: опорных условий, равномерности передачи нагрузки, однородности блока, относительной длины опорного контура и др. Разрушение крупных блоков носит хрупкий характер, однако, в отличие от призм, появление первых трещин в блоках отмечается при нагрузках, составляющих 0,5-1% от разрушающей нагрузки (а в отдельных случаях и раньше). После появления первых трещин, которые обычно отмечаются на противоположных широких гранях блоков, в них происходит перераспределение давлений, и они выдерживают значительную нагрузку - до 50% и более.

Многочисленные исследования серосодержащего арболита при сжатии, растяжении, изгибе и срезе позволили получить достаточно достоверные значения механических характеристик данного исследуемого материала. В зависимости от плотности и класса прочности серосодержащего арболита могут быть рекомендованы следующие нормативные сопротивления в МПа (табл. 1).

При исследовании прочности кладки стеновых блоков из серосодержащего арболита было произведено испытание более 10 образцов кладки из двух, трех и четырех крупных блоков на растворах с прочностью от 50 до 75 МПа. Кроме того, были испытаны образцы кладки на разных растворах.

Для кладки были использованы стеновые блоки, изготовленные на Актюбинском заводе железобетонных изделий совместно с Актюбинским региональным государственным университетом и Ивановским государственным политехническим университетом [1]. Опыты показали, что в крупноблочной



Таблица 1. Нормативные сопротивления серосодержащего арболита, МПа

Плотность, кг/м³	Класс прочности	Предел прочности, МПа при			
		осевом сжатии	растяжении	растяжения при изгибе	срезе
550	B 1,5	0,75	3	6	5
600	B 2,0	1,0	6	10	8
650	B 2,5	1,25	10	16	14

кладке при центральном сжатии возникают напряжения сжатия, растяжения, изгиба и среза, которые вызывают разрушение блоков в кладке (см. рисунок).

Первые трещины в образцах кладки на растворах низких марок появились при нагрузках 0,53-0,73 от разрушающих, а при кладке на растворах высоких марок - при нагрузках 0,69-0,96 от разрушающих. Опыты показали, что относительная прочность кладки из блоков при изменении марки раствора от 0 до 50 и выше соответственно менялось от 0,64 до 1. Повышенная деформативность и неравномерная плотность слабого раствора в горизонтальных швах, очевидно, явились причиной раннего появления трещин и разрушения образцов кладки на растворе низких марок. Кладка на растворах высоких марок не дала снижения прочности при сжатии. Проведенные испытания позволили установить зависимость прочности кладки от применяемого класса стеновых блоков и марки кладочных растворов.

Для определения нормативного сопротивления кладки из серосодержащих стеновых блоков может быть применена извест-

ная формула профессора Л.И. Онищика [2], предложенная им для каменных работ, с введением в формулу коэффициентов, полученных в результате испытания крупноблочной кладки:

$$R_{\text{кл}} = A R_1 (1 - a/b + \gamma), \quad (6)$$

где $R_{\text{кл}}$, R_1 - пределы прочности при сжатии кладки, камня и раствора в МПа; A - конструктивный коэффициент использования камня в кладке; a/b - коэффициенты, зависящие от вида и размеров камня (определяются опытным путем); γ - коэффициент снижения прочности кладки на растворах низких марок.

Для кладки стеновых блоков из серосодержащего арболита были установлены следующие значения опытных коэффициентов: $A=0,85$; $a=0,1$; $b=0,4$ и $\gamma=0,85-1$ при изменении марок раствора от 0 до 10 МПа.

Таким образом, для кладки стеновых блоков формула (6) принимает следующий вид:

$$R_{\text{кл}} = 0,85 R_1 (1 - 0,1/0,4 + \gamma). \quad (7)$$

Пределы прочности кладки при сжатии, определенные по формуле (7), подтверждаются экспериментальными данными. Откло-

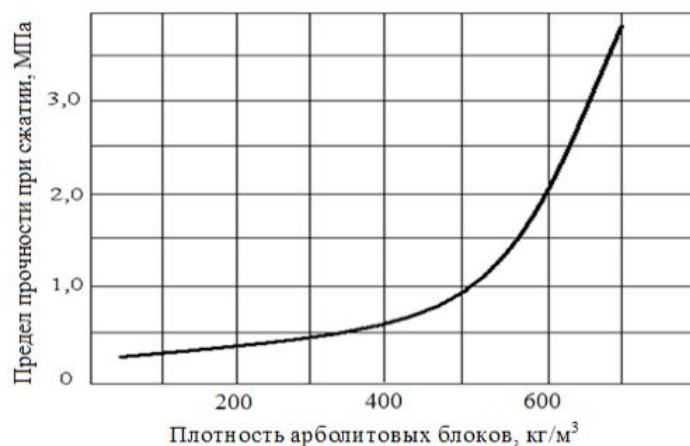


Рис. 1. Зависимость кубиковой прочности $R_{\text{куб}}^{\text{ec}}$ серосодержащих арболитовых блоков от его плотности



нение опытных данных от теоретических составляет в среднем 1,9%.

Формула (7) является справедливой для кладки из крупных стеновых блоков четырехрядной разрезки, выложенных на растворах разных марок. Снижение предела прочности кладки за счет растворных швов следует объяснить тем, что сопротивление крупного блока в кладке срезу и изгибу снижается вследствие трудностей создания горизонтального шва на большой поверхности. Неровности горизонтального шва вызывают в блоках местное перенапряжение, ведущее к преждевременному разрушению блоков в кладке. Исследования показали, что относительная прочность кладки из мелких блоков сравнительна с относительной прочностью кладки из крупных блоков.

На основании полученных результатов рекомендуется для практических целей принимать нормативные сопротивления кладки из блоков (при высоте ряда кладки 500 мм и выше) согласно данным табл. 2.

тика кладки из серосодержащего арболита.

Анализ опытных данных по деформативным свойствам образцов-призм из серосодержащего арболита показал, что зависимость между напряжениями и деформациями дает удовлетворительное совпадение с опытными данными, если принять среднюю величину $R_1=1,75R$, вместо принятого для обычного бетона и кладки $R_1=1,1R$. Оценка упруго-пластических свойств с использованием коэффициентов показывает, что при $\sigma=0,5R$ для образцов призм серосодержащего арболита, испытанных при выдержках на каждой ступени нагрузки в течение 5 и 15 минут, величина коэффициента упругости $\nu=\epsilon_{\sigma}/\epsilon_{\text{полн}}$ менялась в пределах от 0,92 до 0,97. Испытания с повторными нагрузками-разгрузками показали, что при $\sigma=0,45R$, коэффициент $\nu=0,9$, а при $\sigma=0,75R$, $\nu=0,85$. Таким образом, даже при нагрузках, близких к разрушающим, серосодержащий арболит сохраняет свои упругие свойства.

Таблица 2. Нормативные сопротивления кладки из серосодержащего арболита

Плотность, кг/м ³	Предел прочности стенового блока при сжатии, МПа	Предел прочности кладки стен при сжатии в МПа при марке раствора в МПа					
		0	0,2	0,4	1,0	2,5	5,0 и выше
550	1,5	0,85	0,95	0,95	1,1	1,2	1,2
600	2,5	1,35	1,45	1,55	1,75	1,9	1,95
630	3,5	2,45	2,55	2,7	3,05	3,25	3,45
650	5,0	3,8	3,95	4,15	4,7	4,95	5,2

Для исследования деформативных свойств серосодержащего арболита измеряли деформации призм, блоков и кладки.

Значения относительных деформаций ϵ и величины начального модуля упругости E определяли по формулам:

$$\epsilon = \frac{R^1}{E_0} \ln\left(1 - \frac{\sigma}{R^1}\right), \quad (8)$$

$$E = E_0 \left(1 - \frac{\sigma}{R^1}\right), \quad (9)$$

где σ - рассматриваемое напряжение в МПа; R^1 - условный предел прочности при сжатии, МПа; E - действительный модуль упругости, МПа; $E_0=\alpha R$ - начальный модуль упругости, МПа, α - упругая характеристика

Анализ результатов испытаний деформаций призм и блоков из серосодержащего арболита позволил вывести следующие формулы для определения начального модуля упругости этих материалов:

$$E_0 = 6\gamma_{\text{сух}} \sqrt{R_{\text{пр}}}, \quad (10)$$

$$E_0 = 4,7\gamma_{\text{сух}} \sqrt{R_{\text{куб}}^{\text{сух}}}, \quad (11)$$

где $R_{\text{пр}}$ - призмная прочность, МПа.

Значения модулей упругости E_0 , вычисленные по формулам (10) и (11), дают удовлетворительное совпадение с опытными данными.

В зависимости от плотности и класса прочности серосодержащего арболита нормативные значения начального модуля упру-



Таблица 3. Нормативные значения модуля упругости серосодержащих арболитов

Плотность, кг/м³	Кубиковая прочность, МПа	Призменная прочность, МПа	Начальный модуль упругости, МПа
550	2,0	1,9	1400
600	2,5	2,5	2400
650	3,0	3,0	4000

гости E_0 следует принимать согласно данным табл. 3.

Таким образом, модули упругости серосодержащего арболита ниже модулей упругости бетонов в 3 раза при соответственно равных пределах прочности при сжатии. Предельная сжимаемость серосодержащего арболита при напряжении $\sigma=0,8R$ составляла 1,56 мм/м. Сжимаемость серосодержащего арболита при равных кубиковых прочностях в 3 раза выше, чем у тяжелых бетонов. Коэффициент Пуассона серосодержащего арболита μ при $\sigma=0,5 R$ равен 0,2, что соответствует хрупкой природе материала.

Величина сдвига серосодержащего арболита, вычисленная по формуле (12), составила 0,416 E_0 .

$$G = E_0 / (2(1 + 2\mu)). \quad (12)$$

Исследования деформаций образцов кладки из блоков серосодержащего арболита на разных марках растворов показали, что основными факторами, влияющими на величину модуля упругости, являются прочность материала бетонов и марка раствора. Зависимость между напряжениями σ и деформациями ϵ приближается к прямолинейной. Анализ прочности и деформаций блоков из серосодержащего арболита, испытанных отдельно, и блоков, испытанных в кладке, показал, что в кладке прочность блока используется в пределах от 0,5 до 0,71 по сравнению с блоком, испытанным отдельно. Этот процент использования в два с лишним раза выше процента использования кирпича в кладке.

На основании опытных данных была установлена зависимость между величиной упругой характеристики кладки из блоков серосодержащего арболита α и маркой раствора R_1 . Эта зависимость выражается формулой:

$$\alpha = 500(1 + 1/1 + 20/R_1), \quad (13)$$

где $\alpha = \frac{E_0}{R_{кл}}$ - упругая характеристика кладки.

Для использования в практических целях следует принимать значения упругой характеристики кладки α согласно нижеприведенным данным табл. 4.

Исследования предела прочности призм из серосодержащего арболита при сжатии в условиях длительного воздействия нагрузки показали, что при напряжении $\alpha=0,3R$ в течение одного года деформации носили слабозатухающий характер. Установлено, что рост деформаций при длительном нагружении идет за счет деформаций ползучести. Деформации растут интенсивно первые 100 дней, в дальнейшем начинают затухать. Также установлено, что нахождение блоков под нагрузкой $0,15R_{раз}$ в течение одного года не вызывает снижения предела прочности образцов из серосодержащего арболита при сжатии. Анализ опытных данных позволил установить новую экспериментальную зависимость для вычисления величины несущей способности серосодержащего арболита при внецентренном сжатии:

$$P_p^{вн} = R + (1 - \frac{e_1}{y}), \quad (14)$$

Таблица 4. Значение упругой характеристики кладки

Марка раствора, МПа	Упругая характеристика, отн. ед.	Марка раствора, МПа	Упругая характеристика, отн. ед.
0 - 0,5	550	2,1 - 5,0	800
0,6 - 1,0	650	5,0 и более	850
1,1 - 2,0	700	10	1000



где P_p^{BH} - разрушающая нагрузка при внецентренном сжатии в кН; R - предел прочности при центральном сжатии в МПа; e_0 - эксцентриситет в см; y - расстояние от центра тяжести до более напряженной грани в см.

Полученная новая формула дает удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными; в среднем отклонение от опытных данных составляет 12,9 %, что примерно в 2 раза меньше отклонений при вычислении несущей способности по формулам сопротивления материалов. Исследования показали, что серосодержащий арболит яв-

ляется упруго-пластичным материалом и его можно использовать для малоэтажного строительства в виде стеновых материалов.

Библиографический список

1. Исакулов Б.Р. Технология получения высокопрочных арболитобетонов на основе композиционных шлакощелочных и серосодержащих вяжущих / Б.Р. Исакулов, М.В. Акулова, Т.Ж. Толеуов, Б.Б. Кульшаров. - Актобе: АРГУ им. К. Жубанова, 2017. - 200 с.

2. Онищик Л.И. Прочность и устойчивость каменных конструкций. Часть I. Работа элементов каменных конструкций. - М.; Л.: Гос. изд-во строит. лит., 1939. - 398 с.

Поступила в редакцию 28.04.2020 г.

STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF SULPHUR-CONTAINING ARBOLITE BLOCKS

© 2020 Yu.A. Sokolova, M.V. Akulova,
B.R. Isakulov*

Sulphur-containing wood concrete blocks characterized by low density (600-650 kg/m³) have a high enough strength that enables their application as a thermal insulating and structural material, satisfactory frost resistance and good thermal performance. The authors of the paper implemented research of mechanical properties in order to determine their behavior during installation and service life. In the paper, the results of the block's behavior in the large-block masonry exposed to central compression are shown as well as arising compression strength, stretching, bending and cut-off tensions that cause the blocks fracture in masonry. The authors proposed the formulas for estimating the initial elasticity modulus for wood concrete prisms and blocks. A new experimental dependence for calculating the value of wood concrete load-bearing capability for sulfur-containing wood concrete has been established under off-center compression.

Keywords: sulphur-containing structural building materials, wood concrete, mechanical properties.

Received for publication on 28.04.2020

* Sokolova Yulia Andreyevna - Doctor of Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences, Moscow State Construction University Research University, (Russia, Moscow); Akulova Marina Vladimirovna - Doctor of Sciences, Professor, Advisor of the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences, Ivanovo State Polytechnical University (Russia, Ivanovo); Isakulov Baizak Razakovich - Doctor of Sciences, Associate professor, «Baishev University» (Kazakhstan).



ВАРИАНТ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОРТОТРОПНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ*

© 2020 А.А. Трещев, Ю.А. Завьялова,
М.А. Лапшина**

Рассмотрены варианты постулирования уравнений состояния композитных конструкционных материалов, обладающих структурной ортотропией и деформационной анизотропией. Связи тензоров деформаций и напряжений построены на основе общих нелинейных энергетических зависимостей между силовыми и геометрическими параметрами процесса деформирования. Ввиду высокой сложности экспериментального определения констант потенциальных соотношений с высоким уровнем нелинейности для практического применения в расчетах конструкций рекомендованы квазилинейные приближения уравнений состояния. Вычисление констант энергетических зависимостей ограничено проведением простейших экспериментов, на основе которых получены величины этих констант для ряда композитов.

Ключевые слова: потенциал деформаций, квазилинейные уравнения, ортотропный разносопротивляющийся материал.

Введение

С развитием химической промышленности наряду с традиционными строительными материалами такими, как древесина, сталь и железобетон, в двадцатом столетии получили широкое распространение полимеры и композиты. Эти материалы в настоящее время используются как в составе ограждающих, так и несущих конструкций. Их прочность и жесткость зачастую превышают аналогичные характеристики железобетона и даже стали, обладая большей коррозионной стойкостью и одновременно меньшей массой, что создает преимущества при конструировании. Использование композитных и полимерных материалов в строительстве существенно усложняет проектирование конструкций. Это объясняется рядом причин таких, как структурная анизотропия, нелинейность связи напряжений с деформация-

ми, а во многих случаях - зависимость жесткостных и прочностных параметров от вида напряженного состояния. Последнее свойство материалов часто интерпретируется как механическая разносопротивляемость или деформационная анизотропия. Среди структурно анизотропных материалов наибольшее распространение получили композиции, относящиеся к классу ортотропных. Следует заметить, что даже железобетон и весьма «древний» материал - древесина относятся также к классу ортотропных с декартовой и цилиндрической ортотропией, соответственно. Тем более это относится к современным стекло-, боро-, углепластикам и поликарбонату. Не смотря на высокую прочность современных строительных композитов к их исследованию и проектированию из них конструкций необходимо подходить особенно тщательно, т. к. в процессе деформирования

* Работа представлена в качестве доклада на XI Академических чтениях РААСН - Международной научно-технической конференции «Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций», посвященной памяти первого Председателя Научного совета РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» Почетного члена РААСН, д.т.н., профессора Зайцева Юрия Владимировича (Саранск, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», 2020 год).

** Трещев Александр Анатольевич (taa58@yandex.ru) - доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН; Завьялова Юлия Андреевна - магистрант; Лапшина Мария Александровна - магистрант; все - Тульский государственный университет (РФ, г. Тула).



повышается уровень их анизотропии. Это объясняется тем, что абсолютное большинство конструкционных полимеров и композитов реагируют на деформирование проявлением такого свойства как «несовершенная упругость», приводящая к анизотропии двоякого рода в процессе изменения типа сложного напряженно-деформированного состояния. Обладание указанными свойствами совершенно не коррелируется с существующими классическими теориями прочности и строительного материаловедения. Не смотря на широкое распространение ортотропных композитов и высокий уровень развития современных теорий механики, до сих пор не предложены общие, широко апробированные теории деформирования и прочности, которые свободны от грубейших недостатков, а, следовательно, их можно с высокой точностью применять к расчету конструкций их композитных материалов. Представленное исследование представляет вариант математической модели деформирования композитных материалов, проявляющих анизотропию двоякого рода, который вероятно можно использовать многие годы проектировщиками и материалововедами.

Постулирование уравнений состояния

Основным методом исследования в представленном докладе является развитие традиционной классической деформационной теории, тензорных преобразований векторных представлений пространств напряжений, представленных в главных осях анизотропии применительно к композитным и полимерным материалам. Круг исследуемых материалов ограничен графитокомпозитами, стеклопластиковыми и полимерными структурами, использование которых встречается в строительных конструкциях и деталях различных технических устройств.

В исследованиях, представленных в работах [1; 2] проанализированы многочисленные известные экспериментальные сведения по деформированию разных классов анизотропных материалов, проявляющих механическую разносопротивляемость [3 -

7]. На этой основе были сформулированы основные правила постулирования нелинейных энергетических уравнений, связывающих компоненты тензоров деформаций и напряжений применительно к ортотропным материалам:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots, \quad (1)$$

где $W = W(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \tau_{12}\tau_{21}, \tau_{23}\tau_{32}, \tau_{31}\tau_{13}, \tau_{12}\tau_{23}\tau_{31})$, W_n – степенной полином уровня $n+1$ по напряжениям, определенным в главных осях анизотропии.

Элементы разложения (1) определяются в зависимости от физико-механических свойств композитных структур, изменяющихся из-за колебаний сочетаний компонентов напряжений, развивающихся вдоль направлений главных структурных осей. Эти компоненты обычно определяют по данным, получаемым из проводимых квазистатических испытаний стандартных образцов. Для уровня квазилинейных приближений потенциала деформаций полином (1) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} W_1 = & A_1\sigma_{11}^2 + A_2\sigma_{22}^2 + \\ & A_3\sigma_{33}^2 + A_4\sigma_{11}\sigma_{22} + A_5\sigma_{22}\sigma_{33} + \\ & + A_6\sigma_{33}\sigma_{11} + A_7\tau_{12}\tau_{21} \\ & + A_8\tau_{23}\tau_{32} + A_9\tau_{31}\tau_{13}. \end{aligned} \quad (2)$$

С ростом показателя степени n число слагаемых в общей записи (1) существенно увеличивается. Так, если принять $n=2$, то приходим к следующей записи:

$$\begin{aligned} W_2 = & B_1\sigma_{11}^3 + B_2\sigma_{22}^3 + \\ & B_3\sigma_{33}^3 + B_4\sigma_{11}^2\sigma_{22} + B_5\sigma_{11}\sigma_{22}^2 + \\ & B_6\sigma_{22}^2\sigma_{33} + B_7\sigma_{22}\sigma_{33}^2 + \\ & + B_8\sigma_{33}^2\sigma_{11} + B_9\sigma_{33}\sigma_{11}^2 + \\ & B_{10}\sigma_{11}\sigma_{22}\sigma_{33} + B_{11}\sigma_{11}\tau_{12}^2 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 &+ B_{12}\sigma_{11}\tau_{23}^2 + B_{13}\sigma_{11}\tau_{31}^2 + \\
 &+ B_{14}\sigma_{22}\tau_{12}^2 + B_{15}\sigma_{22}\tau_{23}^2 + B_{16}\sigma_{22}\tau_{31}^2 \\
 &+ B_{17}\sigma_{33}\tau_{12}^2 + B_{18}\sigma_{33}\tau_{23}^2 + \\
 &B_{19}\sigma_{33}\tau_{31}^2 + B_{20}\tau_{12}\tau_{13}\tau_{23}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

При $n = 3$ число параметров разложения в полиноме (1) возрастает до 42.

В работах [1; 2] исследовался потенциал (1), ограниченный до степени $n = 2$. В случае зависимости механических характеристик материалов от вида напряженного состояния в разложениях (2) и (3) все параметры

A_k и B_k должны быть представлены функциональными зависимостями от компонентов тензора нормированных напряжений [8 - 10]:

$$\alpha_{ij} = \sigma_{ij} / S; \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (4)$$

$$\text{где } S = \sqrt{\sigma_{ij}\sigma_{ij}} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 + 2\tau_{12}^2 + 2\tau_{23}^2 + 2\tau_{13}^2}.$$

Полная комбинация компонентов тензора нормированных напряжений, определенных в главных материальных осях не может быть произвольной, т. к. на величины этих напряжений накладываются ограничения, проявляющиеся в любых нормированных векторных пространствах [1; 2; 8 - 10]:

$$\begin{aligned}
 \alpha_{ij}\alpha_{ij} &= \alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + \alpha_{33}^2 + 2\alpha_{12}^2 + \\
 &+ 2\alpha_{23}^2 + 2\alpha_{13}^2 = 1. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Как рекомендовано в работах [1; 2; 8 - 10], для любых материалов компоненты A_k и B_k должны быть представлены в виде функций $A_k(\alpha_{ij})$; $B_k(\alpha_{ij})$ с аргументами (4).

Следуя классическим законам механики конституционные уравнения, связывающие тензорные компоненты деформированного и напряженного состояний для абсолютно любого, а не только материала с ортотропии-

ей и меняющимися податливостями, можно определить по сформулированному выражению удельной дополнительной работы (1) - (3), представленному в главных структурных осях ортотропии. Это осуществимо благодаря использованию дифференцирования по правилам Кастильяно:

$$e_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \sigma_{ij}}; \quad (i, j = 1, 2, 3). \quad (6)$$

Не смотря на общую нелинейность введенного потенциала $W = W_1 + W_2$, глубокий его анализ указывает на то, что для вычисления комплекта констант требуется выполнить весьма большой объем механических испытаний и даже таких, которые включают эксперименты с комплексами сложных напряженных состояний. Даже требуется провести различные двухосные, трехосные опыты по растяжению-сжатию, а что особенно сложно - выполнить эксперименты по совместному сдвигу в двух-трех взаимно главных ортогональных плоскостях анизотропии, что на сегодняшний день сложно реализуемо. При этом в настоящее время строительная практика широко использует ортотропные композиты с двоякой (структурной и деформационной) анизотропией [3 - 7]. Поэтому строительные конструкции, элементы деталей и инженерного оборудования, выполненные из рассматриваемых материалов, требуется подвергать деформационным и прочностным расчетам с точностью, которую можно максимально достичь в настоящее время. Такое положение дел допускает в настоящее время принять в разложении (1) квазиквадратичное представление (2), представив в нем функции A_7 , A_8 , A_9 постоянными параметрами [8 - 9]. При таком выборе энергетической зависимости запись потенциала преобразуется к виду:

$$\begin{aligned}
 W_1 &= 0,5(A_{1111} + \tilde{A}_{1111}\alpha_{11})\sigma_{11}^2 + 0,5(A_{2222} + \\
 &+ \tilde{A}_{2222}\alpha_{22})\sigma_{22}^2 + 0,5(A_{3333} + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33})\sigma_{33}^2 + \\
 &+ [A_{1122} + \tilde{A}_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\sigma_{11}\sigma_{22} +
 \end{aligned}$$



$$+ [A_{2233} + \tilde{A}_{2233}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\sigma_{22}\sigma_{33} + \\ + [A_{3311} + \tilde{A}_{3311}(\alpha_{33} + \alpha_{11})]\sigma_{33}\sigma_{11} + \\ + A_{1212}\tau_{12}^2 + A_{2323}\tau_{23}^2 + A_{3131}\tau_{31}^2. \quad (7)$$

Применив дифференцирование к потенциалу (7) по формулам правила Кастильяно (6), представляем искомые уравнения состояния, связывающие два тензора второго ранга для структурно ортотропных материалов, проявляющих деформационную анизотропию:

$$e_{11} = \{ (A_{1111} + \tilde{A}_{1111}\alpha_{11}) + 0,5\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}[\alpha_{22}^2 + \alpha_{33}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)] - \\ - 0,5(\tilde{A}_{2222}\alpha_{22}^3 + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}^3) + (1 - \alpha_{11})[\tilde{A}_{1122}\alpha_{22}(\alpha_{22}^2 + \alpha_{33}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)) + \tilde{A}_{1133}\alpha_{33}] - \\ - \tilde{A}_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22} + \alpha_{33})\}\sigma_{11} + [A_{1122} + \tilde{A}_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\sigma_{22} + \\ + [A_{1133} + \tilde{A}_{1133}(\alpha_{11} + \alpha_{33})]\sigma_{33}; \\ e_{22} = [A_{1122} + \tilde{A}_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\sigma_{11} + \\ + \{ (A_{2222} + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22}) + \\ + 0,5\tilde{A}_{2222}\alpha_{22}[\alpha_{11}^2 + \alpha_{33}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)] - 0,5(\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}^3 + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}^3) + \\ + (1 - \alpha_{22})[\tilde{A}_{2233}\alpha_{33}(\alpha_{11}^2 + \alpha_{33}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)) + \tilde{A}_{1133}\alpha_{33}] - \\ - \tilde{A}_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33})\}\sigma_{22} + \\ + [A_{2233} + \tilde{A}_{2233}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\sigma_{33}; \\ e_{33} = [A_{1133} + \tilde{A}_{1133}(\alpha_{11} + \alpha_{33})]\sigma_{11} + \\ + [A_{2233} + \tilde{A}_{2233}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\sigma_{22} + \\ + \{ (A_{3333} + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}) + \\ + 0,5\tilde{A}_{3333}\alpha_{33}[\alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 +$$

$$+ \alpha_{31}^2)] - 0,5(\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}^3 + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22}^3) + \\ + (1 - \alpha_{33})[\tilde{A}_{1133}\alpha_{11}(\alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)) + \tilde{A}_{2233}\alpha_{22}] - \tilde{A}_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11} + \alpha_{22})\}\sigma_{33} \\ \gamma_{12} = [A_{1212} - (\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}^3 + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22}^3 + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}^3) - 2\tilde{A}_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11} + \alpha_{22}) - \\ - 2\tilde{A}_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22} + \alpha_{33}) - \\ - 2\tilde{A}_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33})]\tau_{12}; \\ \gamma_{23} = [A_{2323} - (\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}^3 + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22}^3 + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}^3) - 2\tilde{A}_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22} + \alpha_{33}) - \\ - 2\tilde{A}_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33}) - \\ - 2\tilde{A}_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\tau_{23}; \\ \gamma_{31} = [A_{1313} - (\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}^3 + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22}^3 + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}^3) - 2\tilde{A}_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33}) - \\ - 2\tilde{A}_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11} + \alpha_{22}) - \\ - 2\tilde{A}_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\tau_{31}. \quad (8)$$

Определение констант квазилинейного потенциала

Очевидно, что константы, фигурирующие в записи (2) должны быть установлены по результатам проведенных экспериментов на осевое растяжение и сжатие в направлениях трех главных материальных осей ортотропии и испытаний на сдвиг в трех ортогональных плоскостях ортотропии. Весь объем данных, получаемых по результатам математической обработки проведенных испытаний, дает возможность вычислить модули деформаций (секущие модули) $E_k^\pm$, коэффициенты поперечных деформаций $\nu_{ij}^\pm$ и модули сдвига в главных структурных ортогональных плоскостях ортотропии G_{ij} .



Выполнив комплекс экспериментальных замеров при испытании на осевое растяжение и осевое сжатие вдоль главной структурной оси x_1 , и проведя несложные математические процедуры, приходим к уравнениям:

$$\begin{aligned} 1/E_1^+ &= A_{1111} + \tilde{A}_{1111}; \\ -\nu_{21}^+ &= (A_{1122} + \tilde{A}_{1122})/(A_{1111} + \tilde{A}_{1111}); \\ -\nu_{31}^+ &= (A_{1133} + \tilde{A}_{1133})/(A_{1111} + \tilde{A}_{1111}); \\ 1/E_1^- &= A_{1111} - \tilde{A}_{1111}; \quad (9) \\ -\nu_{21}^- &= (A_{1122} - \tilde{A}_{1122})/(A_{1111} - \tilde{A}_{1111}); \\ -\nu_{31}^- &= (A_{1133} - \tilde{A}_{1133})/(A_{1111} - \tilde{A}_{1111}), \end{aligned}$$

вдоль главной структурной оси x_2 :

$$\begin{aligned} 1/E_2^+ &= A_{2222} + \tilde{A}_{2222}; \\ -\nu_{12}^+ &= (A_{1122} + \tilde{A}_{1122})/(A_{2222} + \tilde{A}_{2222}); \\ -\nu_{32}^+ &= (A_{2233} + \tilde{A}_{2233})/(A_{2222} + \tilde{A}_{2222}); \end{aligned}$$

$$1/E_2^- = A_{2222} - \tilde{A}_{2222}; \quad (10)$$

$$-\nu_{12}^- = (A_{1122} - \tilde{A}_{1122})/(A_{2222} - \tilde{A}_{2222});$$

$$-\nu_{32}^- = (A_{2233} - \tilde{A}_{2233})/(A_{2222} - \tilde{A}_{2222}),$$

вдоль главной оси ортотропии x_3 :

$$\begin{aligned} 1/E_3^+ &= A_{3333} + \tilde{A}_{3333}; \\ -\nu_{13}^+ &= (A_{1133} + \tilde{A}_{1133})/(A_{3333} + \tilde{A}_{3333}); \\ -\nu_{23}^+ &= (A_{2233} + \tilde{A}_{2233})/(A_{3333} + \tilde{A}_{3333}); \\ 1/E_3^- &= A_{3333} - \tilde{A}_{3333}; \quad (11) \\ -\nu_{13}^- &= (A_{1133} - \tilde{A}_{1133})/(A_{3333} - \tilde{A}_{3333}); \\ -\nu_{23}^- &= (A_{2233} - \tilde{A}_{2233})/(A_{3333} - \tilde{A}_{3333}). \end{aligned}$$

Эксперименты по чистому сдвигу в соответствующих главных плоскостях ортотропии позволяют получить следующие зависимости:

$$\begin{aligned} 1/G_{12} &= A_{1212}; \quad 1/G_{23} = A_{2323}; \\ 1/G_{13} &= A_{1313}. \quad (12) \end{aligned}$$

Технические константы ортотропных композитных материалов

Константы	Материалы [литературные источники]					
	П32-57 [11]	П36-50 [11]	П41-42 [11]	Графит АТJ-S [12]	Стеклопластик [14]	Стеклопластик [14]
E_1^+ , ГПа	12,75	10,3	8,09	11,85	140	60
E_1^- , ГПа	14,03	11,77	10,79	10,48	70	20
E_2^+ , ГПа	16,425	17,6	16,09	11,85	280	30
E_2^- , ГПа	20,60	18,54	16,97	10,48	140	15
E_3^+ , ГПа	-	-	-	9,45	-	-
E_3^- , ГПа	-	8,34	-	7,95	-	-
ν_{12}^+	0,176	0,188	0,28	0,1	0,2	-
ν_{12}^-	-	-	-	0,09	0,3	-
ν_{13}^+	0,126	0,115	0,1	-	-	-
ν_{13}^-	-	-	-	-	-	-
ν_{32}^+	-	-	-	-	-	-
ν_{32}^-	-	-	-	-	-	-
E_{12}^+ , ГПа	-	-	-	-	170	-
E_{12}^- , ГПа	-	-	-	-	875	-
G_{12} , ГПа	3,98	3,14	-	-	-	-
G_{13} , ГПа	3,28	3,49	4,02	-	-	-
G_{23} , ГПа	2,63	2,55	2,45	-	-	-



Ясно, что, рассматривая зависимости (9) - (12) в совокупности, можно вычислить все константы потенциала и выразить их через технические характеристики в форме:

$$\begin{aligned} A_{kkkk} &= (1/E_k^+ + 1/E_k^-)/2; \\ \tilde{A}_{kkkk} &= (1/E_k^+ - 1/E_k^-)/2; \\ A_{ijij} &= -(v_{ij}^+/E_j^+ + v_{ij}^-/E_j^-)/2; \\ \tilde{A}_{ijij} &= -(v_{ij}^+/E_j^+ - v_{ij}^-/E_j^-)/2; \\ A_{ijij} &= 1/G_{ij}; \quad v_{ij}^+/E_j^+ = v_{ji}^+/E_i^+; \\ v_{ij}^-/E_j^- &= v_{ji}^-/E_i^-, \end{aligned} \quad (13)$$

где $i, j, k = 1, 2, 3$.

В обязательном порядке при определении констант (13) необходимо исследовать устойчивость потенциала (7) по Дукеру [8], проверка которой сводится к анализу положительности общей квадратичной формы:

$$\delta e_{ij} \delta \sigma_{ij} = \frac{\partial^2 W_1}{\partial \sigma_{km} \partial \sigma_{ij}} \delta \sigma_{km} \delta \sigma_{ij} \geq 0. \quad (14)$$

Для информации представим механические константы некоторых материалов, заимствованные из отечественной и зарубежной литературы. Эти параметры сведем в таблицу, куда сведены технические константы композитов $E_k^\pm$, $v_{ij}^\pm$ и G_{ij} .

Заключение

Полученные зависимости между компонентами тензоров деформаций и напряжений с учетом характеристик приведенных в таблице однозначно могут определять состояния ортотропных композитов [3-7; 11-14]. Перед выполнением конкретных расчетов конструкций эти зависимости должны быть проанализированы с учетом ограничений (14). Сформулированные уравнения состояния (8) обобщают большинство известных деформационных моделей ортотропных материалов, проявляющих деформационную анизотропию.

Библиографический список

1. Трещев А.А. Потенциальная зависимость между деформациями и напряжениями для ортотропных физически нелинейных материалов / А.А. Трещев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2017. - № 4-1(324). - С. 71 - 74.
2. Трещев А.А. Удельная дополнительная работа деформирования ортотропных физически нелинейных материалов / А.А. Трещев, Ю.А. Монастырев, В.Д. Чибрикина // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: 13-я Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. - Тула: ТулГУ, 2017. - Т. 2. - С. 208 - 212.
3. Schmueser D.W. Nonlinear Stress-Strain and Strength Response of Axisymmetric Bimodulus Composite Material Shells / D.W.Schmueser // AIAA Journal. 1983. Vol. 21. №12. P. 1742 - 1747.
4. Reddy L.N. On the Behavior of Plates Laminated of Bimodulus Composite Materials / L.N.Reddy, C.W.Bert // ZAMM. 1982. Vol. 62. № 6. P. 213 - 219.
5. Jones R.M. A Nonsymmetric Compliance Matrix Approach to Nonlinear Multimodulus Ortotropic Materials / R.M.Jones // AIAA Journal. 1977. Vol. 15. № 10. P. 1436 - 1443.
6. Jones R.M. Modeling Nonlinear Deformation of Carbon-Carbon Composite Material / R.M.Jones // AIAA Journal. 1980. Vol. 18. № 8. P. 995 - 1001.
7. Jones R.M. Bucling of Stiffened Multilayered Circular Shells with Different Ortotropic Moduli in Tension and Compression / R.M.Jones // AIAA Journal. 1971. Vol. 9. № 5. P. 917 - 923.
8. Трещев А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или навешенной чувствительностью к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения. - Тула: ТулГУ, 2016. - 328 с.
9. Трещев А.А. Анизотропные пластины и оболочки из разносопротивляющихся материалов. - Тула: ТулГУ, 2007. - 160 с.
10. Трещев А.А. Определяющие соотношения для нелинейных анизотропных материалов, чувствительных к виду напряженного состояния / А.А. Трещев, Д.А. Ромашин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. - 2011. - №4. - Ч. 4. - С. 1740 - 1742.
11. Розе А.В. Трехармированные тканые материалы / А.В. Розе, И.Г. Жигун, М.Н. Душин /



/ Механика полимеров. - 1970. - №3. - С. 471-476.

12. Jones R.M., Theoretical-experimental correlation of material models for non-linear deformation of graphite / R.M.Jones, D.A.R.Nelson // AIAA Journal. 1976. Vol. 14. №10. P. 1427 - 1435.

13. Jones R.M. Stress-Strain Relations for Materials with Different Moduli in Tension and

Compression / R.M.Jones // AIAA Journal. 1977. Vol. 15. №1. P. 16 - 25.

14. Золочевский А.А. Расчет анизотропных оболочек из разномодульных материалов при неосесимметричном нагружении / А.А. Золочевский, В.Н. Кузнецов // Динамика и прочность тяжелых машин. - Днепропетровск: ДГУ, 1989. - С. 84 - 92.

Поступила в редакцию 28.04.2020 г.

VARIANT OF THE ORTHOTROPIC DEFORMATION MODEL COMPOSITE MATERIAL

© 2020 A.A. Treschev, Yu.A. Zavyalova,
M.A. Lapshina*

Variants of postulating the equations of state of composite structural materials with structural orthotropy and deformation anisotropy are considered. Connections of strain and stress tensors are constructed on the basis of general nonlinear energy dependencies between the force and geometric parameters of the deformation process. Due to the high complexity of experimental determination of constants of potential relations with a high level of non-linearity, quasi-linear approximations of the equations of state are recommended for practical application in structural calculations. The calculation of energy dependence constants is limited to conducting simple experiments, on the basis of which the values of these constants for a number of composites are obtained.

Keywords: strain potential, quasilinear equations, orthotropic different resistant material.

Received for publication on 28.04.2020

* Treschev Alexander Anatolievich - Doctor of Sciences, Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences; Zavyalova Yulia Andreyevna - Undergraduate; Lapshina Maria Alexandrovna - Undergraduate; Tula State University (Tula, Russia).



ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КОНСТРУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ВЫСОТНОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ЗДАНИЯ В ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ ЛИРА-САПР И STARKES*

© 2020 В.Н. Уткина, Е.С. Безрукова**

Статья посвящена исследованию устойчивости конструктивной системы высотного каркасно-монолитного здания гостиницы в независимых программных комплексах ЛИРА-САПР И STARKES. Представлена модель здания и приведены результаты расчета на устойчивость.

Ключевые слова: исследование устойчивости, высотное каркасно-монолитное здание, результаты расчета, ЛИРА-САПР, STARKES.

Проектирование высотных зданий требует от проектировщиков точного и достоверного расчета с учетом множества различных факторов, особенно в районах с большими горизонтальными нагрузками. Для определения напряженно-деформированного состояния несущих конструкций необходимо обладать информацией о величинах как статических, так и динамических нагрузок, а также о характере их воздействия на здание и о перераспределении между отдельными несущими элементами конструкции. Учитывая современные тенденции к строительству зданий повышенной этажности, в том числе и высотных объектов, особое значение приобретает расчет их на устойчивость, который является обязательным при анализе конструктивных решений.

Определяющее значение в обеспечении прочности, жесткости и устойчивости здания на стадии возведения и в период эксплуатации при действии всех расчетных нагрузок и воздействий имеет конструктивная система. При этом немаловажную роль играет выбор расчетной модели здания и метода расчета.

В настоящее время все большую актуальность приобретают автоматизированные программные комплексы, позволяющие с высокой степенью достоверности определять реальное поведение конструкций под различными нагрузками. При этом уделяется повышенное внимание к качеству расчетных обоснований проекта. Для высотных зданий следует выполнять параллельный расчет конструктивной системы с применением независимых программных комплексов, реализующих метод конечных элементов [1 -4].

Целью данной работы является исследование общей устойчивости конструктивной системы высотного каркасно-монолитного здания общественного назначения в двух независимых программных комплексах ЛИРА-САПР и STARKES.

Задачи: создание пространственной аналитической модели здания; выполнение расчета на устойчивость; анализ результатов, полученных в различных программных комплексах.

Объектом исследования является высотное каркасно-монолитное здание гостини-

* Работа представлена в качестве доклада на XI Академических чтениях РААСН - Международной научно-технической конференции «Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций», посвященной памяти первого Председателя Научного совета РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» Почетного члена РААСН, д.т.н., профессора Зайцева Юрия Владимировича (Саранск, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», 2020 год).

** Уткина Вера Николаевна (uvn27@mail.ru) кандидат технических наук, доцент; Безрукова Евгения Сергеевна аспирант; обе - Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, Саранск, РФ.



цы, несущая система которого создавалась и рассчитывалась методом конечных элементов в ПК МОНОМАХ и затем экспортировалась в ПК ЛИРА и ПК STARK ES.

Здание имеет прямоугольную форму в плане с размерами 51,345,9 м и высоту 75,3 м (23 этажа). Класс ответственности здания КС-2 [2]. Материалы и размеры сечений основных несущих элементов приняты в соответствии с рекомендациями СП 267.1325800.2016 и СП 63.13330.2012 [3 - 4]. Фундаментная плита выполнена из бетона класса В40 W6 толщиной 1000 мм; стены подвала толщиной 400 мм, колонны прямоугольного и квадратного сечений от 500х500 до 1000х1000 мм, а также плиты перекрытий толщиной 250 и 300 мм и диафрагмы жесткости толщиной 200х400 мм из бетона класса В35. Рабочая продольная арматура класса А500С.

Конструктивная система здания смешанная колонно-стенная, состоит из взаимосвязанных несущих вертикальных (колонн и стен) и горизонтальных (плит перекрытий и покрытия, фундаментной плиты) элементов, выполнена из монолитного железобетона. Она выбрана на основании архитектурных и объемно-планировочных решений здания гостиницы.

Благодаря жесткому соединению колонн и диафрагм с монолитной фундаментной плитой, дискам связи вертикальных и горизонтальных элементов, а также принятым по расчету толщинам перекрытий и покрытия обеспечивается прочность, устойчивость конструкции и восприятие всех внешних силовых воздействий.

Формирование пространственной модели высотного здания в ПК МОНОМАХ и результаты общего расчета с учетом совместной работы несущих конструкций и основания рассмотрены в работе авторов [5]. Проверка модели и результатов расчета выполнена в двух независимых программных комплексах ЛИРА-САПР и STARKES, поддерживающих информационную связь. На рис. 1 представлены расчетные конечно-элементные схемы конструктивной системы здания в различных программных комплексах, полученные путем экспорта модели, созданной в ПК МОНОМАХ. Автоматическая передача данных о геометрии, нагрузках и материалах значительно облегчает задачи проектировщика, позволяет снизить риск ошибки при моделировании и расчете конструкций.

В ПК ЛИРА-САПР и ПК STARKES реализован метод оценки общей устойчивости конструкции в предположении

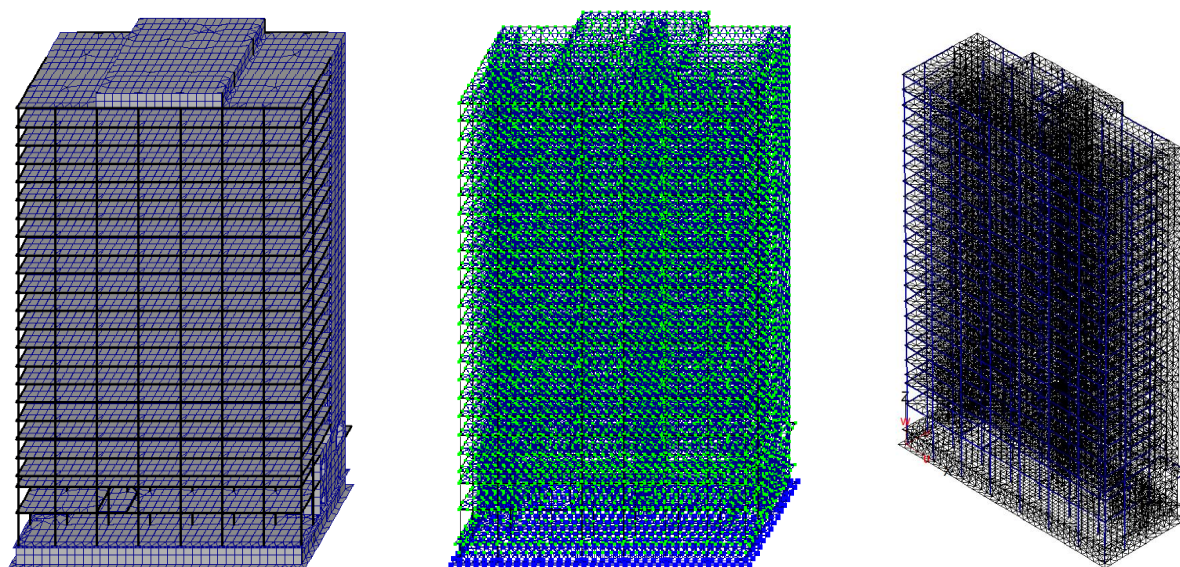


Рис. 1. Расчетные схемы конструктивной системы здания в программных комплексах МОНОМАХ-САПР, ЛИРА-САПР и STARK ES



ее упругой работы. Главная задача расчета на устойчивость определение значения критического параметра потери устойчивости конструкции λ . Физический смысл данного критического параметра потери устойчивости конструкции состоит в потере системой устойчивости при увеличении нагрузки, действующей на конструкцию, в λ раз.

Реализованный метод оценки устойчивости формы конструкции предполагает, что распределение внутренних усилий и напряжений σ_0 известно из решения линейной статической задачи. Все приложенные к системе внешние силы F_0 (и внутренние усилия и напряжения) растут пропорционально одному и

тому же параметру λ . Задача устойчивости сводится к тому, что требуется определить такое значение числового параметра λ , чтобы при внешних силах (λF_0) произошла потеря устойчивости. Для решения общей устойчивости применяется метод итерации подпространств (QR-метод), который позволяет определить не только первую, но и высшие формы потери устойчивости и соответствующую им критическую нагрузку. В текущих версиях программ можно учитывать до 10 форм [6].

Результаты расчета на общую устойчивость конструктивной системы высотного здания гостиницы в ПК ЛИРА-САПР и ПК STARKES представлены на рис. 2-5 и в таблице.

1
Форма потери устойчивости в гл. с. 1
Коэффициент 9.04329

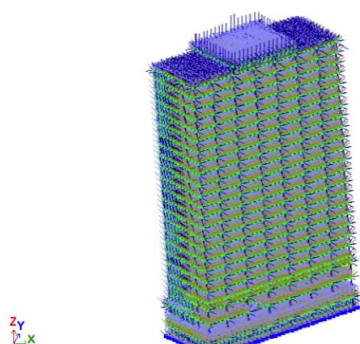


Рис. 2. Деформированная схема здания при расчете на устойчивость от РСНв ПК ЛИРА-САПР. Первая форма потери устойчивости

1
Форма потери устойчивости в гл. с. 2
Коэффициент 11.954

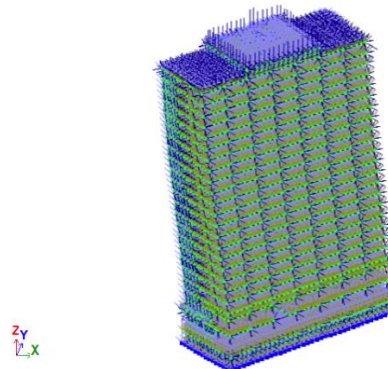


Рис. 3. Деформированная схема здания при расчете на устойчивость от РСНв ПК ЛИРА-САПР. Вторая форма потери устойчивости

1
Форма потери устойчивости в гл. с. 3
Коэффициент 27.3022 |

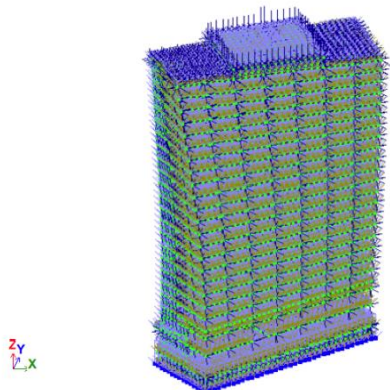


Рис. 4. Деформированная схема здания при расчете на устойчивость от РСНв ПК ЛИРА-САПР. Третья форма потери устойчивости

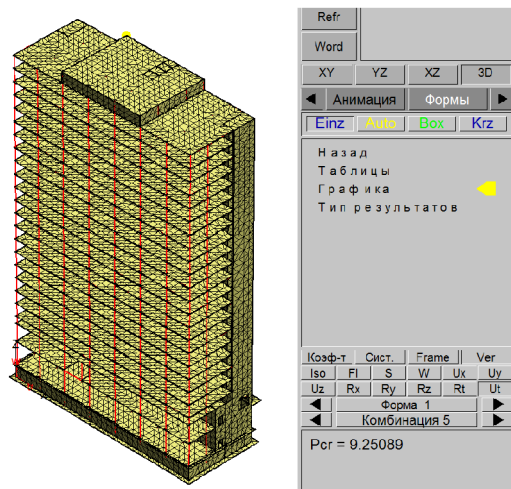


Рис. 5. Деформированная схема здания при расчете на устойчивость от РСНв ПК STARKES. Первая форма потери устойчивости



Коэффициенты запаса устойчивости конструктивной системы, полученные
при расчете в ПК ЛИРА-САПР и ПК STARKES

Наименование загружения	Коэффициент запаса устойчивости конструкции		
	Номер формы потери устойчивости		
	1	2	3
ПК ЛИРА-САПР			
Постоянное	10,00	14,00	32,00
Длительное	228,00	305,00	665,00
Кратковременное	90,00	121,00	259,00
Ветер 1	158,00	204,00	229,00
Ветер 2	332,00	451,00	482,00
РСН	9,04	11,95	27,30
ПК STARKES			
Постоянное	10,74	13,66	35,58
Длительное	235,57	307,34	795,82
Кратковременное	92,80	120,89	316,60
РСН	9,25	11,80	30,80

На рис. 2-5 показаны деформированные схемы конструктивной системы, полученные в результате расчета на устойчивость от основных расчетных сочетаний постоянных, длительных и кратковременных вертикальных и горизонтальных нагрузок (РСН) по различным формам потери устойчивости.

Сравнение коэффициентов запаса устойчивости конструктивной системы при различных загружениях и формах потери устойчивости, полученных в ПК ЛИРА-САПР и ПК STARKES, представлено в таблице.

Для зданий из монолитного железобетона коэффициент запаса по устойчивости формы должен быть не менее 2; при расчете устойчивости здания на опрокидывание коэффициент запаса должен быть больше 1,5 [3].

Согласно результатам, полученным при расчете здания на устойчивость в ПК ЛИРА-САПР и ПК STARKES, при основном расчетном сочетании нагрузок (РСН) минимальное значение критического параметра потери устойчивости формы конструкции λ составляет 9,04 и 9,25 соответственно. Таким образом, чтобы конструктивная система здания потеряла устойчивость, нагрузки должны быть превышены в 9,04 и 9,25 раза. Полученные значения удовлетворяют нормативным требованиям. Небольшие отличия результатов, полученных в двух независимых программных комплексах, подтверждают точность и корректность расчета. Необходимая устойчивость конструктивной системы высотного

здания гостиницы обеспечена, наличие запаса повышает надежность конструкции и позволяет избежать катастрофы в случае возможных ошибок проектирования, изготовления или эксплуатации.

Библиографический список

1. СП 430.1325800.2018. Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования. М.: Минстрой России, 2018. - 64 с.
2. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2015. - 16 с.
3. СП 267.1325800.2016. Здания и комплексы высотные. Правила проектирования. М.: Минстрой России, 2016. - 122 с.
4. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М.: Минрегион России, 2011. - 152 с.
5. Создание и расчет пространственной модели высотного здания с учетом совместной работы несущих конструкций и основания / В.Н. Уткина, А.Н. Смолин, Е.С. Безрукова, М.Ю. Петрунин // Строительные конструкции: состояние и перспективы развития: материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию В. А. Карташова (67 марта 2019 г.). Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2019. - С. 4047.
6. Решение задачи устойчивости в ЛИРА 10.6. [Электронный ресурс] / LIRA-SOFT. URL: <https://lira-soft.com/forum/messages/forum8/message935/207-48.-reshenie-zadachi-ustoychivosti-v-lira-10.6#message935>.

Поступила в редакцию 07.05.2020 г.



INVESTIGATION OF THE STABILITY OF THE STRUCTURAL SYSTEM
OF A HIGH-RISE PUBLIC BUILDING IN THE SOFTWARE COMPLEXES
LIRA-CAD AND STARK ES

© 2020 V.N. Utkina, E.S. Bezrukova*

The article is devoted to the study of the stability of the structural system of a high-rise frame-monolithic hotel building in the independent software systems LIRA-CAD and STARK ES. The model of the building is presented and the results of the stability calculation are presented.

Keywords: investigation of the stability, high-rise frame-monolithic building, results of calculation, LIRA-CAD, STARKES.

Received for publication on 07.05.2020

* Utkina Vera Nikolaevna - Candidate of technical, Associate Professor, Bezrukova Evgenia Sergeevna - Postgraduate; Mordovian State University named after N. P. Ogarev (Saransk, Russia).



ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ПИГМЕНТОВ И НАПОЛНИТЕЛЕЙ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ*

© 2020 Н.Н. Фомина, А.Р. Исмагилов**

Исследована дисперсность минеральных компонентов лакокрасочных материалов: двух марок пигментного диоксида титана и двух видов наполнителей - микродоломита и каолина. Применялись методы динамического и статического рассеяния света и электронная микроскопия. Исследованные пигменты и наполнители полидисперсны. Проанализированы значения среднего размер частиц, полученные разными методами. Определено процентное содержание в пробах пигментов частиц размерами в оптимальном с точки зрения рассеивающей способности диапазоне. Их не менее 14% массы (объема) пигментов. Установлено присутствие наночастиц (частиц размерами менее 115 нм) в пробах пигментов. Поверхностная обработка пигментов накладывает дополнительные сложности при исследовании их дисперсности.

Ключевые слова: пигмент, диоксид титана, наполнитель, каолин, микродоломит, дисперсность, рассеивающая способность.

Введение

Дисперсность характеризует размер частиц в дисперсных системах. Она обратно пропорциональна среднему диаметру частиц, и для минеральных порошкообразных компонентов лакокрасочных материалов указывается чаще всего или через средний размер частиц, или через величину удельной поверхности, или через величину остатка на сите (в процентах) после проведения ситового анализа. Все это - усредненные показатели дисперсности, вполне пригодные для решения производственных задач, но недостаточные для изучения процессов структурообразования в лакокрасочных композициях и покрытиях. Более полную информацию о дисперсности дает функция распределения объема или массы исследуемого материала по размерам частиц, которую можно получить, применяя методы дисперсионного анализа.

Дисперсность пигментов и наполнителей во многом определяет реологические свойства композиций, а также укрывистость, декоративные свойства и долговечность покрытий [1-5]. Поэтому представленная работа нацеливалась на исследование дисперсности широко используемых минеральных компонентов лакокрасочных материалов - пигментного диоксида титана и наполнителей (микродоломита и каолина).

Материалы и методы

В исследовании использовались две марки белых титановых пигментов из различных ценовых диапазонов: в дорогом - TiO_2 №1, в доступном - TiO_2 №2. Дисперсность для TiO_2 №1 указана производителем через средний размер частиц и составляет 0,2 мкм, а для TiO_2 №2 - через остаток на сите с ячейкой 0,045 мм и составляет не более 0,003%.

* Работа представлена в качестве доклада на XI Академических чтениях РААСН - Международной научно-технической конференции «Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций», посвященной памяти первого Председателя Научного совета РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» Почетного члена РААСН, д.т.н., профессора Зайцева Юрия Владимировича (Саранск, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», 2020 год).

** Фомина Наталья Николаевна (fominanani@yandex.ru) - кандидат технических наук, доцент; Исмагилов Артур Раельевич - аспирант; оба - Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.



Также исследовались наполнители: каолин и микродоломит. Микродоломит марки МД2 по данным производителя имеет дисперсность по массовой доле остатка на ситах с ячейками: 45 мкм - не более 0,004%, 32 мкм - не более 0,02%, 28 мкм - не более 0,09%. Каолин по данным производителя содержит не менее 85% частиц размерами менее 20 мкм, и не менее 60% частиц размерами менее 5 мкм.

Из порошков пигментов и наполнителей приготавливались навески на аналитических весах. Параметры дисперсности определялись с помощью следующих методов и исследовательского оборудования:

1. Метод **статического рассеяния света** (SLS - *Static light scattering*) или лазерной дифракции (LDM - *Laser diffraction method*). Исследование проводилось с помощью лазерного анализатора *Horiba LA 300* (диапазон измерения частиц от 100 нм до 600 мкм). Принцип работы анализатора основан на регистрации под разными углами оптического излучения, рассеянного частицами в проточной кювете. В качестве источника света использовался лазерный диод с длиной волны 650 нм. Расчет распределения частиц по размерам осуществлялся по измеренной зависимости интенсивности рассеянного излучения от угла рассеяния. Количество повторов составляло 30 измерений на каждый образец.

Подготовка образцов пигментов и наполнителей проводилась диспергированием

в дистиллированной воде ультразвуковым воздействием в течение 2...3 мин до стабилизации гистограммы рассеяния.

2. Метод **динамического рассеяния света** (DLS - *Dynamic light scattering*) или фотонной корреляционной спектроскопии (PCS - *Photon Correlation Spectroscopy*). Исследование проводилось с помощью анализатора размеров частиц *Zetasizer Nano ZS* (*Malvern*, Великобритания, угол рассеяния 173°, диапазон измерения частиц от 0,3 нм до 10 мкм). Использовалась технология неинвазивного обратного рассеяния (NiBS). В качестве источника света использовался стандартный лазер с длиной волны 633 нм.

Подготовка образцов пигментов проводилась диспергированием в деионизованной сверхчистой воде качества *Milli-Q* (*Millipore*, Франция) обработкой в ультразвуковой бане (УЗУМИ-05, Трима, Россия) в течение 30...60 мин.

3. Просвечивающая электронная микроскопия (TEM - *Transmission electron microscopy*) проводилось на приборе *Carl Zeiss Libra 120* (Германия). С каждого образца пигмента сделано по 20 снимков.

Результаты и обсуждение

Гистограммы распределения частиц пигментов и наполнителей по размерам, полученные лазерным анализатором *Horiba LA 300*, представлены на рисунке, обработка экспериментальных данных приведена в табл. 1.

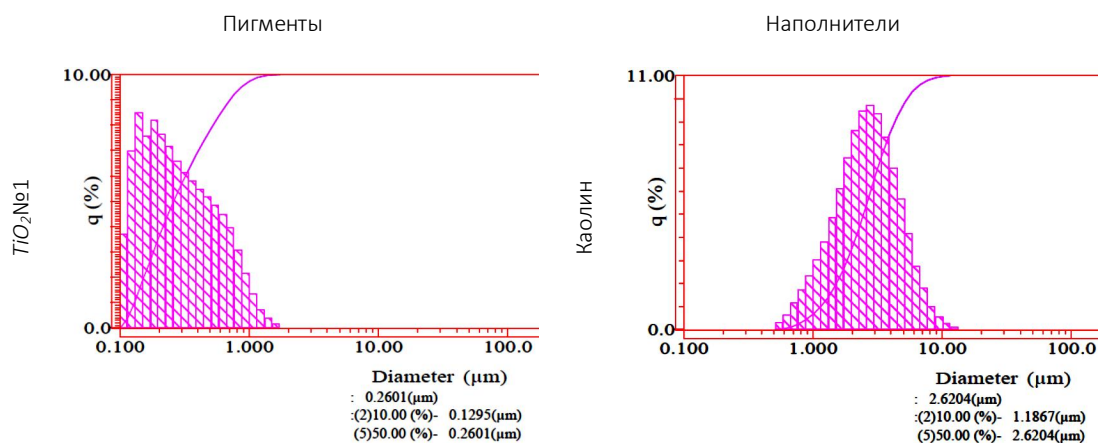


Рис. Гистограммы распределения частиц по размерам, полученные лазерным анализатором *Horiba LA 300* (начало)

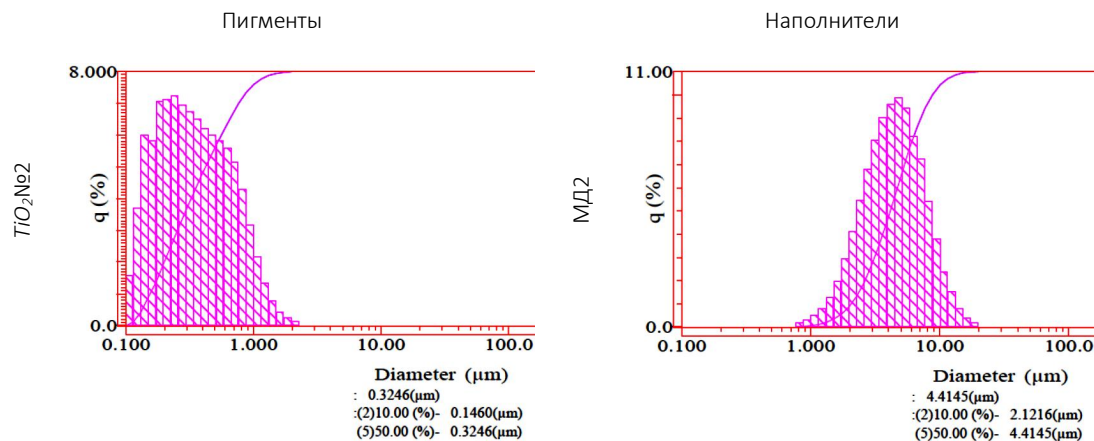


Рис. Гистограммы распределения частиц по размерам, полученные лазерным анализатором *Horiba LA 300* (окончание)

Таблица 1. Распределение частиц по размерам, полученное лазерным анализатором *Horiba LA 300*

Вид минерального порошка	Количество частиц размерами, мкм, в % от общего объема (массы)					
	Менее 1,0				1,005-10,0	Более 10,0
	Менее 0,115	0,115-0,197	0,197-0,259	0,259-1,005		
ТiO ₂ №1	3,701	31,216	14,809	47,657	2,617	0
ТiO ₂ №2	1,566	22,587	14,363	56,404	5,080	0
МД2	0	0	0	0,466	94,357	5,177
Каолин	0	0	0	6,128	93,502	0,370

В табл. 2 отражены результаты расчета среднего размера частиц при исследовании их различными методами: *SLS*, *DRS*, *TEM*.

В научных источниках приводятся разнообразные данные о среднем размере частиц пигментного диоксида титана. Так, средний размер частиц пигментного диоксида титана, по данным [6], определенный с помощью лазерного анализатора *HORIBA LA-950* после ультразвукового диспергирования в воде составил 2,04 мкм. в [7] указана дисперсность пигментного диоксида титана анатазной модификации - 0,28 мкм (метод анализа не уточняется). Образец пигмента рутильной модификации, исследованный в [8], имеет средний диаметр частиц, измеренный методом электронной микроскопии, 0,23 мкм. Такой разброс значений объясняется не

только различием в дисперсности разных марок пигментов, но и тем, что каждый метод определения размеров основывается на измерении различных характеристик частицы: максимального или, наоборот, минимального линейного размера, объема, площади поверхности и др. Соответственно, и результаты будут разными. Очевидно, что можно сравнивать только результаты измерений, где один и тот же материал анализировался одним и тем же методом.

Поэтому для экспериментального определения дисперсности использовались три различных метода. Метод *SLS* в соответствии с ГОСТ Р 55723 рекомендован для анализа частиц диаметром более 40 нм, имеющих близкую к сферической форму. Метод *DLS* в соответствии с ISO 22412, ГОСТ Р 8.774 явля-

Таблица 2. Среднее значение размеров частиц, полученное различными методами

Вид минерального порошка	Среднее значение размеров частиц, мкм, полученное методом		
	<i>SLS</i>	<i>DRS</i>	<i>TEM</i>
ТiO ₂ №1	0,351	0,754	0,233
ТiO ₂ №2	0,421	1,361	0,301
МД2	4,986	-	-
Каолин	2,983	-	-



ется первичным при анализе наночастиц, и по ГОСТ Р 55723 рекомендован для измерения гидродинамического диаметра наночастиц диаметром более 3 нм, находящихся в состоянии броуновского движения. Метод *ТЕМ* эффективен в дополнение к другим методам анализа дисперсий [9-10].

Полученные нами экспериментальные данные анализа дисперсности одних и тех же проб разными методами, действительно, различаются абсолютными значениями. Все три метода подтвердили полидисперсность исследованных минеральных порошков - как пигментов, так и наполнителей, что согласуется с [2]. Но по пигментному диоксиду титана, например, в [9] приводятся данные, полученные *ТЕМ* методом, о его монодисперсности. Значения среднего размера частиц, полученные различными методами, расходятся очень существенно. Методы *SLS* и *DLS* дают массовое (или объемное) распределение частиц по размерам, и средний размер частиц представляет собой математическое ожидание, рассчитанное запатентованным программным обеспечением приборов, с учетом естественной неидеальности формы частиц. Метод *ТЕМ* позволяет понять форму частиц, качественно оценить, присутствуют ли в системе агломераты. Однако, в случае количественного анализа велика вероятность случайных и систематических погрешностей [10], в том числе, из-за ошибочной идентификации фаз оператором, которые превышают погрешности статистики подсчета и приводят к тому, что у разных операторов при анализе одного материала получаются разные результаты. А при переходе от количественного к массовому (или объемному) распределению погрешность существенно возрастает.

В нашем случае, средний размер частиц пигмента TiO_2 №1, полученный *ТЕМ* методом (0,233 мкм), согласуется с данными [8] - 0,23 мкм, и близок к параметру, заявляемому производителем этого пигмента - 0,20 мкм. Причем размеры частиц пигмента в диапазоне 0,2-0,25 мкм считается оптимальными,

т.к. именно частицы размерами около половины длины видимого света обладают наибольшей рассеивающей способностью [1; 9], а следовательно, и укрывистостью.

Абсолютные значения среднего размера частиц пигментов, полученные методом *SLS* (0,351 мкм для TiO_2 №1 и 0,421 мкм для TiO_2 №2), не входят в оптимальный диапазон наибольшей рассеивающей способности. Но анализ гистограмм распределения (табл. 1) показывает, что как минимум 14% частиц (по массе или по объему) пигмента имеют размер в этом диапазоне (0,197-0,259 мкм). Следует отметить, что метод *SLS* с использованием лазерного анализатора показал высокую воспроизводимость результатов, как по пигментам, так и по наполнителям.

В пробах пигментов идентифицированы частицы размерами менее 0,115 мкм, и по этому критерию их можно отнести к наночастицам [11]. Но так как диапазон измерения лазерного анализатора *Horiba LA 300* от 100 нм, а гистограммы вплотную приближены к нанодиапазону (см. рисунок), пробы пигментов дополнительно исследовались методом *DLS*, с диапазоном измерения прибора от 0,3 нм. Результаты *DLS* показали количество частиц размерами менее 0,115 мкм в пигменте TiO_2 №1 - 2,1% (по *SLS*- 3,701%), а в пигменте TiO_2 №2 по данным *DLS* наночастицы отсутствуют (по *SLS*- 1,566%). Средние значения размеров частиц пигментов по данным *DLS* существенно выше значений, полученных методом *SLS*. Здесь, вероятно, необходимо учитывать химические свойства поверхности частиц пигментов, т.к. оба образца пигментов имеют поверхностную обработку, а от состояния поверхности зависит смачиваемость, адсорбционная способность, диспергируемость и агрегативная устойчивость пигментных дисперсий [1; 11]. По данным ТЭМ в обоих образцах пигментов наночастицы присутствуют, а содержание их не превышает 1%. Важно, что нанодисперсные частицы диоксида титана проявляют фотокаталитическую активность [9; 12-13], и это необходимо учитывать при выборе пигмента.



Выводы

Исследованные пигменты и наполнители лакокрасочных материалов полидисперсны. В образцах пигментов присутствует не менее 14% частиц размерами в оптимальном диапазоне наибольшей рассеивающей способности, т.е. размерами в интервале 0,2-0,25 мкм. Поверхностная обработка пигментов накладывает дополнительные сложности при исследовании их дисперсности и обуславливает разработку специальных методов пробоподготовки. Необходимы исследования зависимости укрывистости от характера распределения по размерам частиц. В пробах пигментов присутствуют наночастицы, и важно исследовать зависимость долговечности лакокрасочных покрытий от их содержания.

Библиографический список

1. Ермилов П.И. Пигменты и пигментированные лакокрасочные материалы / П.И. Ермилов, Е.А. Индейкин. И.А. Толмачев. - Л.: Химия, 1987. - 200 с.
2. Мюллер Б. Лакокрасочные материалы и покрытия. Принципы составления рецептур / Б. Мюллер, У. Пот. - М.: ООО «ПэйнтМедиа», 2007. - 237 с.
3. Фрейтаг В. Краски, покрытия и растворители: состав, производство, свойства и анализ / В. Фрейтаг, Д. Стойе. Пер. с англ. Изд. 2-е перераб.; под ред. Э.Ф. Ицко.. - СПб.: Профессия, 2007. - 526 с.
4. Loganina V.I. Increasing the Durability of Paint and Varnish Coatings in Building Products and Construction (Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering). - Woodhead Publishing. 2019. - 202 p.
5. Многокритериальная оптимизация составов наполненных микрокальцитом эпоксидных композитов / А.Н. Чернов, Т.А. Низина, Д.Р. Низин [и др.] // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всеросс. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию засл. деятеля науки РФ, акад. РААСН, д-ра техн. наук, проф. В.П. Селяева (3-5 дек. 2019 г.). Отв. ред. А.Л. Лазарев. - Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2019. - С. 428-437.
6. Морозова Н.Н. Исследование влияния среды на степень диспергирования диоксида титана / Н.Н. Морозова, Н.В. Майсурадзе, И.И. Галиев // Вестник технологического университета. - 2017. - Т.20. - №6. - С. 71-75.
7. Фотокаталитическое покрытие на основе добавки нанодисперсного диоксида титана / Н.П. Лукутцова [и др.] // Строительные материалы. - 2015. - №11. - С. 5-7.
8. Farrokhpay S. Titania Pigment Particles Dispersion in Water-Based Paint Films / S. Farrokhpay, G.E. Morris, D. Fornasiero // Journal of Coatings Technology and Research. 2006. Vol. 3. No. 4. pp. 275-276.
9. Diebold M.P. Optimizing the benefits of TiO_2 in paints // Journal of Coatings Technology and Research. 2020. Vol. 17. pp. 1-17.
10. Левин А.С. Основные принципы анализа размеров частиц. - М.: Изд-во: ООО «ЛабДепо-Мск». - 12 с.
11. Высококачественные декоративные мелкозернистые бетоны, модифицированные наночастицами диоксида титана / Ю.М. Баженов [и др.] // Вестник МГСУ. - 2012. - № 6. - С. 73-78.
12. Горощенко Я.Г. Химия титана. - Киев: Наукова думка, 1972. - 415 с.
13. Андриященко Е.А. Светостойкость лакокрасочных покрытий. - М.: Химия, 1986. - 192 с.

Поступила в редакцию 28.04.2020 г.



STUDY OF THE DISPERSION OF PIGMENTS,
PAINT AND VARNISH MATERIALS FILLERS

© 2020 N.N. Fomina, A.R. Ismagilov*

We studied the dispersion of the mineral components of exterior paints. Two grades of pigment titanium dioxide and two fillers - microdolomite and kaolin - were selected. The methods of dynamic and static light scattering and electron microscopy were used. Particles of different sizes are present in the studied pigments and fillers. The values of the average particle size obtained by different methods are analyzed. The number of particles with dimensions that provide the maximum scattering ability was at least 14% of the mass (volume). Pigments contain nanoparticles with sizes less than 115 nm. Surface treatment of pigment particles leads to additional difficulties in the study of their dispersion.

Keywords: pigment, titanium dioxide, filler, kaolin, dispersion, light scattering ability, coatings.

Received for publication on 28.04.2020

* Fomina Natalya Nikolaevna - Candidate of Sciences, Associate Professor; Ismagilov Arthur Raelevich - Postgraduate; Yuri Gagarin Saratov State Technical University (Saratov, Russia).

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации в научном журнале “ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА” принимаются статьи, соответствующие научным требованиям, общему направлению журнала и представляющие интерес для достаточно широкого круга российской и зарубежной научной общности.

Предлагаемый в статье материал должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных и электронных изданиях, написанный в контексте современной научной литературы, а также содержать очевидный элемент создания нового знания.

Все представленные статьи проходят проверку в программе “Антиплагиат” и направляются на независимое (внутреннее) рецензирование. Решение о публикации принимается редколлегией на основе рецензии.

Правила оформления

Текст статьи

Статья представляется на русском или английском языках в печатном виде (формат А4) и/или электронном виде (e-mail: expert763@mail.ru).

Перед заглавием статьи проставляется шифр УДК.

Название работы, список авторов в алфавитном порядке (ФИО, место работы, индекс и адрес места работы, должность, e-mail), аннотация, ключевые слова должны быть представлены на русском и английском языках.

Текст должен быть набран в текстовом редакторе Word для Windows с расширением doc или rtf гарнитурой Times New Roman 14 кеглем через 1,5 интервала.

Объем основного текста не должен превышать 8-9 страниц.

Рисунки и таблицы предполагают наличие названия и сквозную нумерацию.

Библиографический список оформляется с ГОСТ 2018, 2019 по порядку цитирования после основного текста. Допускается не более 20 источников.

Ссылки на упомянутую литературу в тексте обязательны и даются в квадратных скобках, например [17, с. 27]. Ссылка на иностранные источники приводятся на языке оригинала.

Графика

Растровые форматы: рисунки и фотографии, сканируемые или подготовленные в Photoshop, Paintbrush, Corel Photopaint, должны иметь разрешение не менее 300 dpi, формат TIF.

Векторные форматы: рисунки, выполненные в программе CorelDraw 5.0-11.0, должны иметь толщину линий не менее 0,2 мм, текст в них может быть набран гарнитурой Times New Roman или Arial. Не рекомендуется конвертировать графику из CorelDraw в растровые форматы.

Формулы

Единицы измерения в статье следует выражать в Международной системе единиц (СИ).

В статье приводятся лишь самые главные, итоговые формулы. Набор формул приводится в редакторе формул Microsoft Equation с параметрами: обычный - 14, крупный индекс - 9, мелкий индекс - 7, крупный символ - 20, мелкий символ - 14.

Вставка в текст статьи формул в виде графических объектов недопустима.

Все использованные в формуле символы следует расшифровать.

Статьи, оформленные не по правилам, редколлегией рассматриваться не будут.

*Редколлегия журнала
“Эксперт: теория и практика”*

Научно-практический журнал

ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
№ 3 (6) 2020 г.

Главный редактор - Мурашкин Василий Геннадьевич,
кандидат технических наук, АНО "ИССТЭ", Тольятти

Материалы представлены в авторской редакции

Компьютерная верстка О.В. Егоровой
Дизайн обложки https://vk.com/ann_sarachai

Дата выхода в свет 25.05.2020. Формат 60х84/8. Бумага офсетная. Печать оперативная.
Усл. печ. л. 9,53 (10,25). Уч.-изд. л. 8,67. Тираж 1000 экз. Первый завод 100 экз.
Распространяется бесплатно. Заказ № 170.

Издатель - АНО "ИССТЭ".
445047, Самарская область, г. Тольятти, Южное шоссе, д. 35А, оф. 401.

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО "СГЭУ".
443090, Самарская область, г. Самара, ул. Советской Армии, д. 141.

Scientific and Practical Journal

EXPERT: THEORY AND PRACTICE
№ 3 (6) 2020

Editor-in-Chief - Murashkin Vasily Gennadievich,
Candidate of Technical, INO "IFCTE" (Tolyatti, Russia)

Approved for publication 25.05.2020. Format 60x84/8. Offset paper.
Offset printing. Printed signatures 9,53 (10,25). Publisher's signatures 9,67.
Circulation 1000 copies.

Publishing house INO "IFCTE".
445047, office 401, the house 35A, Southern Highway,
Tolyatti, Samara region, e-mail: expert763@mail.ru.

Printed in the Printing House of Samara State University of Economics.
443090, Samara, ulitsa Sovetskoi Armii, 141.