

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель

Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства

Главная редакция:

А.М. Данилов (главный редактор)
Е.В. Королев (заместитель
главного редактора)
И.А. Гарькина (ответственный
секретарь)

Адрес редакции:

440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28,
ПГУАС
Тел/факс 8412 929501
E-mail: regas@pguas.ru
fmatem@pguas.ru
www.rais.pguas.ru

Редакторы: М.А. Сухова
Н.Ю. Шалимова

Дизайн обложки Е.Г. Лапшина
Е.Н. Вечкасова

Компьютерная верстка
Н.А. Сазонова

Перевод О.В. Гринцова

Журнал зарегистрирован
в Федеральной службе по надзору
за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия

Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС77-25956 от 13 октября 2006 г.

Подписной индекс:
36946 в каталоге Роспечати

Авторы опубликованных материалов
несут ответственность за достоверность
приведенных сведений, точность данных
по цитируемой литературе и за использо-
вание в статьях данных, не подлежа-
щих открытой публикации.
Редакция может опубликовать статьи
в порядке обсуждения, не разделяя точку
зрения автора.

Подписано к печати 15.09.2019.
Формат 60x84 1/8.
Уч.-изд.л. 28,125. Тираж 500 экз. Первый завод 100.
Заказ № 345.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

**РЕГИОНАЛЬНАЯ
АРХИТЕКТУРА
И СТРОИТЕЛЬСТВО
3(40)/2019**

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 7

**Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф.,
Преображенская Е.М., Макаруч М.В.**
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ
МАТЕРИАЛОВ И ПОДХОДОВ АДДИТИВНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОМЫШЛЕННОМ
ДИЗАЙНЕ..... 7

**Ерофеев В.Т., Родин А.И., Кравчук А.С.,
Ермаков А.А.**
ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ
В ШИХТЕ (ТРЕПЕЛ : Na_2CO_3)
ДЛЯ ПЕНОСТЕКЛОКЕРАМИКИ..... 16

Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Т.К.
РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЦЕМЕНТ-
НО-МИНЕРАЛЬНЫХ СИСТЕМ, ПЛАСТИФИЦИ-
РОВАННЫХ ПОЛИКАРБОКСИЛАТНЫМ
ПЛАСТИФИКАТОРОМ..... 24

**Селяев В.П., Селяев П.В., Кечуткина Е.Л.,
Данилов А.М., Гарькина И.А.**
УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
КАК СЛОЖНЫХ СИСТЕМ..... 35

Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.
ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОСТИ
И ДЕКОМПОЗИЦИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ
КОМПОЗИТОВ..... 44

**Макридин Н.И., Максимова И.Н.,
Полубарова Ю.В.**
ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕ-
НИЯ И СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КОН-
СТРУКЦИОННОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНА..... 50

**Низина Т.А., Володин В.В., Балыков А.С.,
Ошкина Л.М., Коровкин Д.И.**
ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК
НА ОСНОВЕ ОБОЖЖЕННОЙ ГЛИНЫ
НА ПРОЧНОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННОГО
ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ 58

Логанина В.И., Фокин Г.А.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ВНЕШНЕГО ВИДА
ЗАЩИТНО-ДЕКОРАТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ
ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ 68

© Авторы публикаций, 2019

© Е.Г. Лапшина, Е.Н. Вечкасова, дизайн обложки, 2019

© ПГУАС, 2019

Логанина В.И., Аверин И.А., Карманов А.А. ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СИЛИКОНОВОЙ СМОЛЫ .. 73	ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ 150
Логанина В.И., Аль Саиди Бассам Шариф Денеф, Фокин Г.А. ОРГАНОМИНЕРАЛЬНАЯ ДОБАВКА НА ОСНОВЕ ГЛИН С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ МОНТМОРИЛЛОНИТА ... 78	Аверкин А.Г., Еремкин А.И., Аверкин Ю.А. ОСУШЕНИЕ ВОЗДУХА НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ СОРБЕНТОВ 150
Очкина Н.А. УСАДКА, ВНУТРЕННИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ КОМПОЗИТОВ С ВЫСОКОПЛОТНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ... 85	Ерёмкин А.И., Фильчакина И.Н., Орлова Н.А. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИ- РОВАНИЕ ПРОЦЕССА УВЛАЖНЕНИЯ ТЕКСТИЛЬНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С КОНДИЦИО- НИРОВАННЫМ ВОЗДУХОМ..... 157
Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф., Преображенская Е.М., Макачук М.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИЛАКТИДА В АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ..... 92	Перелыгин Ю.П., Гришин Б.М., Титов Е.А., Осипова Н.Н. РЕАГЕНТНАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ДРОЖЖЕВОГО ЗАВОДА ОТ ФОСФАТ- ИОНОВ И ИОНОВ АММОНИЯ..... 167
Береговой В.А., Снадин Е.В., Волков П.В., Фокин Г.А. ВЛИЯНИЕ РАЗЖИЖАЮЩИХ ДОБАВОК НА ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ СИЛИЦИТОВОГО ШЛИКЕРА..... 102	Королева Т.И., Аржаева Н.В., Мельников И.Е., Ивашенко Н.Ю. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕ- НИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ВОЗДУШНОЙ ПРОСЛОЙКИ ДЛЯ НЕОДНОРОДНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ 173
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ 107	Ильина Т.Н., Гольцов А.Б., Емельянов Д.А. АНАЛИЗ АЭРОДИНАМИКИ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ В АСПИРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА 181
Глухов В.С., Вишнякова Ю.С. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙ ПРИ ПОГРУЖЕНИИ В ДАВЛИВАНИЕМ 107	Васин Л.А. ОТКРЫТАЯ ПЛАТФОРМА УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМИ СЕТЯМИ: ОРГАНИЗАЦИЯ ВИДЕОСИСТЕМЫ СМАРТ-ДОМА 187
Гучкин И.С., Ласьков Н.Н., Жуков А.Н. УСИЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ КИРПИЧНОЙ СТЕНЫ, ОСЛАБЛЕННОЙ НАКЛОННОЙ МАГИСТРАЛЬНОЙ ТРЕЩИНОЙ 113	Андреев С.Ю., Яхкинд М.И., Ласьков Н.Н., Князев В.А. НОВАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОФИЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ОСРЕДНЕННЫХ МЕСТНЫХ СКОРОСТЕЙ ПО СЕЧЕНИЮ НАПОРНОГО ТРУБОПРОВОДА 193
Селютина Л.Ф., Емельянова Н.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДОЩАТЫХ ФЕРМ С УЗЛОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЛАСТИНАХ 120	Вилкова Н.Г., Мишина С.И., Депутатов Е.Д. ПЕНЫ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ ОКСИДОМ ТИТАНА: ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА 206
Монахов В.А., Зайцев М.Б. ПОСТРОЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ ПЛОСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ..... 130	АРХИТЕКТУРА..... 214
Вдовин В.М. УСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТОЙ РЕБРИСТОЙ СТЕНОВОЙ ПАНЕЛИ 135	Береговой А.М., Береговой В.А. СИСТЕМА ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕ- СКИЕ ПАРАМЕТРЫ В ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕ- ТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ БИОДОМА 214
Нежданов К.К., Гарькин И.Н. ВЫСОКОРЕСУРСНАЯ НЕРАЗРЕЗНАЯ ПОРТАЛЬНАЯ ДВУХСТЕНЧАТАЯ ПОДКРАНОВАЯ БАЛКА 140	Береговой А.М., Береговой В.А. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В РАЗНОТИПНЫХ ЗДАНИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ..... 220
Юрьев А.Г., Зинькова В.А. РАСЧЕТ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФЕРМ НА ОСНО- ВЕ ВАРИАЦИОННЫХ ПРИНЦИПОВ..... 145	

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	7	Erofeev V.T., Elchishcheva T.F., Preobrazhenskaya E.M., Makarchuk M.V. STUDY OF PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF POLYLACTIDE SAMPLES IN ADDITIVE TECHNOLOGY	92
Erofeev V.T., Elchishcheva T.F., Preobrazhenskaya E.M., Makarchuk M.V. PROSPECTS OF APPLICATION NEW MATERIALS AND APPROACHES OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN INDUSTRIAL DESIGN	7	Beregovoi V.A., Snadin E.V., Volkov P.V., Fokin G.A. THE INFLUENCE OF THINNING ADDITIVES ON THE FRACTIONAL STRUCTURE OF SILICIT SLIKER	102
Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Ermakov A.A. STUDY OF PHASE TRANSFORMATIONS IN CHARGE (TRIPOLI: Na ₂ CO ₃) FOR GLASS CERAMIC FOAMS	16	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS	107
Inozemtcev A.S., Korolev E.V., Duong T.Q. RHEOLOGICAL FEATURES OF CEMENT- MINERAL SYSTEMS WITH A POLYCARBOXYLATE PLASTICIZER.....	24	Glukhov V.S., Vishnyakova Y.S. RECOMMENDATIONS ON THE DETERMINATION OF THE CARRYING ABILITY OF PILES DIVING UNDER PRESSURE	107
Selyaev V.P., Selyaev P.V., Kechytkina E.L., Danilov A.M., Garkina I.A. PROPERTY CONTROL OF COMPOSITE MATERIALS AS COMPLEX SYSTEMS.....	35	Guchkin I.S., Laskov N.N., Zhukov A.N. REINFORCEMENT OF A BEARING BRICK WALL WEAKENED BY AN INCLINED MAIN CRACK.....	113
Budylnina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. PRINCIPLES OF SYSTEM AND DECOMPOSITION WHEN DEVELOPING COMPOSITES.....	44	Selutina L.F., Emelyanova N.V. EXPERIMENTAL END THEORETICAL STUDIES OF BOARD TRUSSES WITH NODAL CONNECTIONS ON METALL GEAR PLATES.....	120
Makridin N.I., Maksimova I.N., Polubanova Y.V. PECULIARITIES OF MECHANICAL BEHAVIOR AND STRUCTURAL CHANGES OF CONSTRUCTION CERAMZIT CONCRETE.....	50	Monakhov V.A., Zaytsev M.B. CONSTRUCTION OF KINEMATIC MATRIX FLAT ROD SYSTEMS	130
Nizina T.A., Volodin V.V., Balykov A.S., Oshkina L.M., Korovkin D.I. INFLUENCE OF THE ADDITIVES ON THE BASIS OF BURNT CLAY ON THE STRENGTH OF CEMENT STONE	58	Vdovin V.M. SUSTAINABILITY OF CENTRALLY COMPRESSED RIBBED WALL PANELS ...	135
Loganina V.I., Fokin G.A. ENSURING THE QUALITY OF THE EXTERNAL TYPE OF VARNISH AND PAINT COATINGS OF CEMENT CONCRETE.....	68	Nezdanov K.K., Garkin I.N. HIGH-RESOURCE UNIVERSE PORTAL DOUBLE CRANE BEAM	140
Loganina V.I., Averin I.A., Karmanov A.A. ESTIMATION OF THE STRUCTURE OF ANTI-EMERGENCY COATING ON THE BASIS OF SILICONE RESIN	73	Yuriev A.G., Zinkova V.A. CALCULATION OF METAL TRUSSES BASED ON VARIATIONAL PRINCIPLES.....	145
Loganina V.I., Al Saedi Bassam Shareef Deneef, Fokin G.A. ORGANOMINERAL ADDITIVE BASED ON CLAY WITH INCREASED CONTENT OF MONTMORILLONITE.....	78	ENGINEERING SYSTEMS.....	150
Ochkina N.A. SHRINKAGE, INTERNAL STRESSES AND CRACK RESISTANCE OF HIGH-DENSITY FILLER COMPOSITES	85	Averkin A.G., Eremkin A.I., Averkin Y.A. AIR DRAINAGE BASED ON SOLID SORBENTS.....	150
		Eremkin A.I., Filchakina I.N., Orlova N.A. PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF TEXTILE MATERIAL MOISTURING WHEN INTERACTING WITH AIR CONDITIONED AIR.....	157

Perelygin Y.P., Grishin B.M., Titov E.A., Osipova N.N. REAGENT CLEANING OF WASTEWATER OF YEAST FACTORY FROM PHOSPHATE IONS AND AMMONIUM IONS.....	167	Andreev S.Y., Yakhkind M.I., Laskov N.N., Knyazev V.A. NEW METHOD OF CALCULATING THE DISTRIBUTION PROFILE OF RELATIVE AVERAGED LOCAL VELOCITIES BY SECTION OF A PRESSURE PIPE	193
Koroleva T.I., Arzhaeva N.V., Melnikov I.E., Ivaschenko N.Y. DETERMINATION OF AIR LAYER RESISTANCE TO HEAT TRANSFER FOR INHOMOGENEOUS PROTECTION STRUCTURE	173	Vilkova N.G., Mishina S.I., Deputatov E.D. FOAMS STABILIZED BY TITANIUM OXIDE: OBTAINING AND PROPERTIES.....	206
Il'ina T.N., Goltsov A.B., Emel'anov D.A. ANALYSIS OF TWO-PHASE AERODYNAMICS FLOWS IN ASPIRATION SYSTEM OF TECHNOLOGICAL COMPLEX.....	181	ARCHITECTURE	214
Vasin L.A. OPEN PLATFORM OF ENGINEERING NETWORK MANAGEMENT: SMART HOME VIDEO SYSTEM ORGANIZATION	187	Beregovoy A.M., Beregovoy V.A. SYSTEM OF NATURAL VENTILATION, ECOLOGICAL AND HEAT-ENERGY PARAMETERS IN THE UNIFIED ENERGY SYSTEM OF THE BIOHOUSE	214
		Beregovoy A.M., Beregovoy V.A. ENERGY SAVING IN MULTI-TYPE BUILDINGS OF URBAN DEVELOPMENT	220

К 75-ЛЕТИЮ ВЫСШЕГО СТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ



В 1944 году на базе Пензенского индустриального института, эвакуированного из Одессы, был организован строительный факультет. В марте 1958 года Постановлением Совета министров СССР № 269 было принято решение об образовании в городе Пензе инженерно-строительного института на базе строительного факультета ПИИ. Приказом министра высшего образования СССР от 17 марта 1958 года № 292 была обозначена дата начала работы нового вуза страны.

В шестидесятые годы XX века институт сумел создать основу материально-технической базы и условия для подготовки высококвалифицированных кадров для строительной отрасли и развития научных исследований в регионе. Семидесятые годы – это период интенсивного роста вуза. Были открыты новые специальности – «Архитектура» и «Сельскохозяйственное строительство». В 1994 году вуз получил название «Пензенский государственный архитектурно-строительный институт». Дополнительно открыт ряд новых специальностей, начата подготовка выпускников для зарубежных стран. В ноябре 1996 года институт получил статус академии. Затем в марте 2003 года академия была преобразована в «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства». Университет включал четыре института и четыре факультета, где велась подготовка бакалавров по 13 направлениям, магистров по 10 направлениям и специалистов по 26 специальностям. На 30 кафедрах работало более 500 преподавателей, в числе которых 70 профессоров, докторов наук, и более 300 доцентов, кандидатов наук, открыто 19 направлений аспирантуры и три диссертационных совета по защите докторских и кандидатских диссертаций.

В двухтысячные годы вуз продолжал динамично развиваться, в 2003 году получил статус университета. Учебный процесс и научно-исследовательская работа осуществлялись по инновационным программам и проектам, многие из которых разработаны ведущими специалистами университета и нашли признание в других вузах региона и России. Ученые университета внесли значительный вклад в разработку стратегий и планов социально-экономического развития Пензенской области.

За последние годы университет стабильно входит в число лучших строительных вузов России, является одним из ведущих образовательных, научных, культурных и спортивных центров региона и страны. В университете многое делается для гармоничного развития студентов, воспитания из них достойных граждан России. Выпускники вуза являются особой гордостью университета. Они вносят достойный вклад в развитие экономики города, области и страны. Из стен вуза вышли многие известные люди, видные ученые и руководители, военачальники, строители, бизнесмены, общественные и политические деятели. Многие из них награждены орденами и медалями, отмечены ведомственными и государственными наградами, почетными званиями. Университет продолжает хранить лучшие традиции своей истории и уверенно смотрит в будущее.

Врио ректора ПГУАС

С.А. Болдырев



СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.175.2

*Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева)*

Россия, 430005, г. Саранск,
ул. Большевистская, д. 68
тел. (8342) 47-71-56

Ерофеев Владимир Трофимович,
доктор технических наук, профессор,
академик РААСН, декан архитектурно-
строительного факультета, директор НИИ
«Материаловедение», зав. кафедрой
«Строительные материалы и технологии»
E-mail: al_rodin@mail.ru

*Тамбовский государственный технический
университет*

Россия, 392000, г. Тамбов,
ул. Советская, д. 106
тел.: (4752) 63-04-39

Ельчишева Татьяна Федоровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Архитектура
и строительство зданий»
E-mail: elshevat@mail.ru

Преображенская Екатерина Михайловна,
ассистент кафедры «Архитектура
и строительство зданий»
E-mail: kiki198608@yandex.ru

Макарчук Максим Валерьевич,
кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры
«Материалы и технология»
E-mail: energ-lab@yandex.ru

*National Research Ogarev Mordovia State
University (MRSU)*

Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.,
tel.: (8342) 47-71-56

Yerofeev Vladimir Trofymovich,
Doctor of Sciences, Professor, Academician of the
RAACSN, Dean of the Faculty of Architecture and
Construction, Director of the Research Institute
«Materials Science», Head of the department
«Building materials and technology»
E-mail: al_rodin@mail.ru

Tambov state technical university

Russia, 392000, Tambov, 106,
Sovetskaya St.,
tel.: +7 (4752) 63-40-39

Elchishcheva Tatiana Fedorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Architecture and
construction of buildings»
E-mail: elshevat@mail.ru

Preobrazhenskaya Ekaterina Mikhailovna,
Assistant of the department «Architecture and
construction of buildings»
E-mail: kiki198608@yandex.ru

Makarchuk Maxim Valerievich,
Candidate of Sciences, senior lecturer of the
Department «Materials and technology»
E-mail: energ-lab@yandex.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОДХОДОВ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОМЫШЛЕННОМ ДИЗАЙНЕ*

В.Т. Ерофеев, Т.Ф. Ельчишева, Е.М. Преображенская, М.В. Макарчук

Выполнен анализ подходов, способствующих улучшению прочностных характеристик прототипа, изготовленного по аддитивной технологии. Проведены синтез в низко-

* Публикуется при поддержке гранта РФФИ РМ № 18-48-130013 "Комплексное исследование физико-химических процессов в композиционных материалах на основе эпоксидных смол и других синтетических полимеров, перспективных для применения в строительстве".

температурной плазме наноструктурных материалов и модифицирование ими полилактида. Исследованы прочностные характеристики образцов из модифицированного полилактида и выявлено их повышение по сравнению с образцами без наноструктурных компонентов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, модифицирование полимеров, наноструктурные добавки, промышленный дизайн, прочностные характеристики.

PROSPECTS OF APPLICATION NEW MATERIALS AND APPROACHES OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN INDUSTRIAL DESIGN

V.T. Erofeev, T.F. Elchishcheva, E.M. Preobrazhenskaya, M.V. Makarchuk

The analysis of approaches improving the strength characteristics of the prototype, manufactured by additive technology is clone. Synthesis of nanostructured materials in low-temperature plasma and their modification of polylactide is performed. The strength characteristics of the samples from modified polylactide are investigated and their increase is revealed in comparison with the samples without nanostructured components.

Keywords: additive technologies, industrial design, nanostructured additives, polymer modification, strength characteristics

Введение

Использование аддитивных технологий в промышленном дизайне получило широкое распространение. Аддитивные технологии обладают такими преимуществами, как быстрое изготовление прототипа, точность размеров, мобильность. Однако данные технологии обладают рядом недостатков и ограничений. Прототип должен иметь близкие к проектируемому изделию прочностные характеристики, и в то же время на него следует расходовать минимальное количество материала. Аддитивная технология позволяет получить прототип с ячеистой внутренней конструкцией, это существенно экономит сырье при прототипировании будущего продукта. При этом чем меньше степень заполнения ячеек при создании прототипа, тем более низкими прочностными характеристиками он будет обладать. Соответственно, такой прототип не выполнит требований по прочности, предъявляемых к проектируемому изделию. Следует найти баланс между минимально необходимым количеством используемого материала при прототипировании и требуемой прочностью прототипа.

Данную задачу можно решать в нескольких направлениях. Самое очевидное решение – это получить зависимость прочности прототипа от степени заполнения ячеистой конструкции, выраженной в процентах (%). Такая зависимость позволит для требуемой прочности прототипа выбрать процент заполнения ячеистой конструкции.

Другой путь решения задачи – это поиск формы ячеек с наибольшей прочностью. В качестве природного аналога рассмотрим бионические структуры (рис. 1) [1].

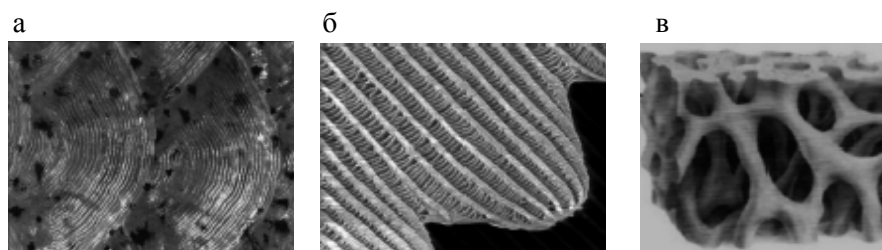


Рис. 1. Природные аналоги бионических структур:
а – поверхностные покровы жуков и бабочек; б – липидные бинарные слои;
в – блок-сополимеры [1]

Такие структуры обнаруживаются в мембранах хлоропластов растений и в кутикулярных образованиях на крыльях бабочек. Они сочетают в себе высокие прочностные характеристики и небольшую массу [1].

В качестве искусственного аналога таких структур предлагается ячеистая структура («гиرويد», с топологией трижды периодической поверхности минимальной энергии), состоящая из повторяющихся элементов с минимально возможной площадью (рис. 2) [2].

Такая структура была изготовлена по аддитивной технологии из полилактида методом FDM (Fused Deposition Modeling) – послойной заливки экструдированным расплавом пластмасс. Проведены исследования физико-механических свойств образцов. Показано качественное улучшение прочностных характеристик структуры с использованием топологии ячеек типа «гиرويد». Авторами исследования было установлено, что разрушение при нагружении образца в разных направлениях относительно оси построения происходит, в зависимости от направления, хрупко или пластично [1]. Очевидно, что требуется дальнейшее изучение этого вопроса для описания рекомендаций по использованию топологии ячеек типа «гиرويد» в аддитивной технологии. Данное направление исследования является перспективным и позволит качественно повысить прочностные характеристики прототипа.

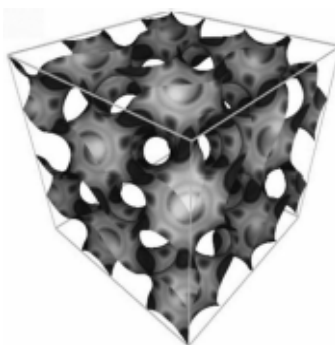


Рис. 2. Ячеистая структура с топологией «гиرويد» [2]

Не менее перспективным является направление по использованию в аддитивной технологии композитных материалов. Проведено большое количество исследований по введению в полимеры наноструктурных добавок, применение которых дает возможность получать композиты с полезными свойствами [3–11].

Для модификации полимеров наиболее перспективным является метод модификации под воздействием низкотемпературной плазмы [12–14].

В настоящей работе представлены результаты исследований прочностных свойств образцов из модифицированного полимера, изготовленных методом 3D-печати. В качестве модифицированного полимера использовался композит из полимера «полилактид» и наноструктурных материалов.

Материалы и методы исследования

Для модификации полимера применялись наноструктурные материалы, которые синтезировались методом низкотемпературной плазмы. В используемом методе низкотемпературная плазма образуется в месте электрического разряда между двумя графитовыми электродами. Процесс модификации полимера происходит в одном технологическом объеме одновременно с синтезом наноструктурных материалов при термическом разложении графита путем пропускания нитей полимера в непосредственной близости от зоны синтеза наноструктурных материалов. Метод позволяет решить в одном технологическом цикле несколько задач: непосредственно синтез и активацию углеродного наноструктурного материала, а также модифицирование полимеров, находящихся в твердом состоянии, синтезированными наноструктурными материалами.

Исследование полученных наноструктурных материалов проводилось с использованием методов дериватографии и электронной микроскопии [15, 16]. Для исследований применялись дериватограф Q1500 D и электронный микроскоп ЭМБ-100А.

В качестве полимера использовался полилактид, полиэфир молочной (2-гидроксипропионовой) кислоты $\text{CH}_3\text{-CH}(\text{OH})\text{-COOH}$.

Образцы для испытания на разрыв изготавливались по аддитивной технологии на 3D-принтере MakerBot Replicator Z18 с заливкой ячеистой структуры на 100 % по настройкам, рекомендованным производителем оборудования. Геометрические размеры образцов составляли: общая длина – 150 мм, расстояние между широкими частями с параллельными сторонами – 108 мм, длина узкой части с параллельными сторонами – 60 мм, радиус головки – 60 мм, ширина широкой части – 20 мм, ширина узкой части с параллельными сторонами – 10 мм, толщина – 4 мм [17].

Исследование предела прочности проводилось путем растяжения образцов из первичного и модифицированного полилактида на разрывной машине МР-0,5-1 по инструкции изготовителя.

Результаты исследования и их обсуждение

Синтезированный методом термического разложения графита углеродный наноструктурный материал подвергался дериватографическим исследованиям с целью идентификации вида наноструктурных образований и их процентного соотношения в общей массе материала. Проводились исследования навесок из синтезированного наноструктурного материала массой 230 мг. Распад образцов осуществлялся при постоянном увеличении температуры в открытом держателе проб – тигле. Испытания проводились с изменением скорости нагрева с шагом 10°C в минуту до достижения предельного значения температуры 1000°C , с последующим завершением исследований.

Как видно из графика зависимости массы образцов (m , мг) от температуры отжига (T , $^\circ\text{C}$), распад углеродного материала начинался при температуре около 530°C и завершался при температуре около 900°C (рис. 3). Отслеживалась нелинейная зависимость уменьшения массы с ростом температуры, так как наблюдалось резкое падение массы образцов при температуре 630°C и 846°C . Скорее всего, это связано с наличием в синтезированном наноструктурном материале нановолокон с температурой распада 630°C и нанотрубок с температурой распада 846°C . Данное предположение в дальнейшем подтвердилось результатами электронно-оптических исследований. Между указанными точками на шкале температур падение массы образцов происходило близко к линейной зависимости.



Рис. 3. Дериватограмма отжига углеродного наноструктурного материала

Исследования полученных углеродных наноструктурных материалов с помощью электронного микроскопа дали возможность оценить размеры и морфологию нано-объектов. Было установлено, что в процессе синтеза углеродных наноматериалов в

низкотемпературной плазме образуются углеродные нанотрубки и нановолокна (рис. 4, а), а также игольчатые нанотрубки (рис. 4, б). Метод синтеза углеродных наноструктурных материалов при термическом разложении графита позволил получить достаточное их количество, необходимое для модифицирования полимера.

Следует отметить, что углеродный наноструктурный материал равномерно распределялся в поверхностном слое нитей полилактида.

В дальнейшем исследованию подвергались изготовленные методом 3D-печати образцы из первичного полилактида и из полилактида, модифицированного методом воздействия низкотемпературной плазмы. Анализ полученных данных показал, что в составе модифицированного полилактида содержится до 1 % нанотрубок и до 3 % нановолокон от общей массы композита.

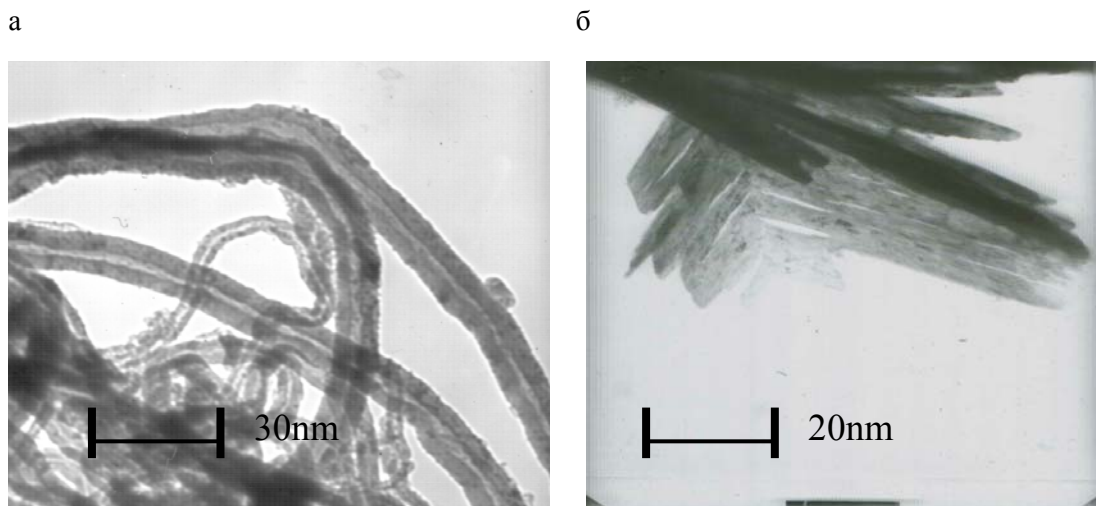


Рис. 4. Фотографии синтезированных нанообъектов:

а – углеродные нанотрубки и нановолокна; б – игольчатые нанотрубки

До проведения дальнейших исследований обеспечивалось хранение образцов в упаковке из паро- и влагонепроницаемого материала.

Исследования предела прочности при растяжении первичного и модифицированного полилактида выполнялись на разрывной машине МР-0,5-1. Первую группу составляли контрольные образцы из первичного полилактида без наноструктурных добавок – 6 образцов, вторую группу – образцы из модифицированного полилактида – 6 образцов. С использованием оптической микроскопии были изучены изломы образцов из первичного и модифицированного полилактида. Характерный вид изломов представлен на рис. 5.

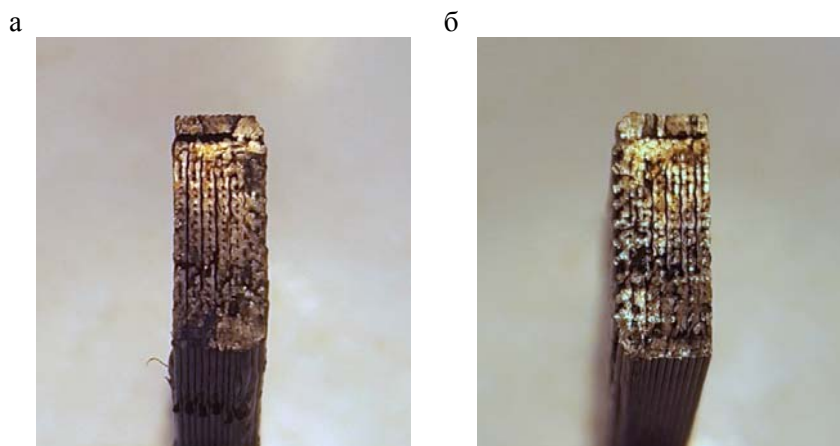


Рис. 5. Излом образцов, изготовленных из первичного (а) и модифицированного (б) полилактида

Визуальные исследования показали, что поверхность излома образцов каждой из двух групп пористая. Хорошо просматриваются нити полимера, сформировавшие образцы. По степени пластической деформации образцы обеих групп – хрупкие. Излом образцов при воздействии нагрузки – плоский со сколами. Отражение света изломами образцов неравномерное, наблюдаются матовые и блестящие участки с желтым и синим отливом, занимающие до 30 % от площади излома. Оптические исследования показали схожесть внешнего вида изломов у всех исследуемых образцов. Результаты испытания двух групп образцов материала на разрывной машине и их статистический анализ сведены в таблицу.

Результаты испытания образцов из первичного и модифицированного полилактида на разрыв

№ образца	Первичный полилактид			Модифицированный полилактид		
	масса, г	удлинение, мм	разрывная нагрузка, МПа	масса, г	удлинение, мм	разрывная нагрузка, МПа
1	9,65	15	20,74	9,72	7	22,06
2	9,68	14	21,37	9,84	7	22,75
3	9,65	11	21,33	10,22	8	21,57
4	10,04	15	20,7	9,78	6	23,53
5	9,78	9	18,39	9,71	10	22,26
6	9,66	12	21,13	9,73	7	22,75
Среднее значение	9,74	12,7	20,61	9,83	7,5	22,49
Размах вариации	0,39	6	2,98	0,51	4	1,96
Дисперсия	0,0235	5,8667	1,2640	0,0382	1,9	0,4602
Стандартное отклонение	0,1534	2,4221	1,1243	0,1785	1,3784	0,6784

Установлено, что значения показателя массы внутри каждой группы образцов незначительно различаются. Взаимосвязь изменения массы полилактида от его модифицирования не отслеживается, так как разница средней массы образцов двух исследуемых групп составляет менее 1 %. Характерным является показатель удлинения образцов при разрыве модифицированного полилактида. Его значение уменьшилось почти в 2 раза (на 40,8 отн. %) по сравнению с контрольными образцами из первичного полилактида. Уменьшение пластичности модифицированного полилактида, по-видимому, связано с наличием в его структуре наноструктурных материалов. Полученный эффект требует более детального изучения.

В каждой группе исследуемых образцов есть разброс значения предела прочности материала на разрыв. Предел прочности у образцов из модифицированного полилактида, в сравнении с контрольными образцами, увеличился на величину до 10 %.

Анализ результатов эксперимента показал, что необходимы дополнительные исследования модифицированного полилактида при разной степени заполнения ячеистой структуры образцов.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности проведения в дальнейшем исследований в направлении модификации полилактида и изучения физико-механических свойств изготовленных из него изделий.

Выводы

Приведен краткий обзор возможных подходов по улучшению прочностных характеристик прототипов, выполненных по аддитивной технологии из полимеров.

Предложен метод изготовления образцов из полилактида, содержащего в составе наноструктурные материалы. Метод дал возможность увеличить предел прочности

модифицированных образцов на величину до 10 %. Это подтверждает предположение о возможности повышения прочностных характеристик прототипа при использовании наноструктурных материалов. Авторы считают, что перспективными будут являться исследования в следующих направлениях:

- получение зависимости прочности прототипа от степени заполнения его ячеистой структуры;
- проведение исследования изделий, выполненных с ячеистой структурой типа «гироид»;
- проведение исследования прочностных характеристик модифицированных полимеров в зависимости от режимов их модификации;
- выявление оптимального варианта зависимости прочности изделия от вышеперечисленных подходов.

Список литературы

1. Дьяченко, С.В. Физико-механические свойства модельного материала с топологией трижды периодических поверхностей минимальной энергии типа гироид в форме куба / С.В. Дьяченко, Л.А. Лебедев, М.М. Сычев, Л.А. Нефедова // Журнал технической физики. – 2018. – Т. 88, вып. 7. – С. 1014–1017. – DOI: 10.21883/JTF.2018.07.46169.2555.
2. Lord, E.E. New Geometry for New Materials / E.E. Lord, A.L. McKay, S. Ranganathan. – M.: Fizmatlit, 2010. – 264 p. – ISBN: 0521861047, 9780521861045.
3. Dai, L. Controlled Synthesis and Modification of Carbon Nanotubes and C₆₀: Carbon Nanostructures for Advanced Polymeric Composite Materials / L. Dai, A.W.H. Mau // Advanced Materials. – 2001. – Vol. 13, iss. 12–13. – P. 899–913. – DOI: [https://doi.org/10.1002/1521-4095\(200107\)13:12/13<899::AID-ADMA899>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1521-4095(200107)13:12/13<899::AID-ADMA899>3.0.CO;2-G).
4. Breuer, O. Big returns from small fibers: a review of polymer/carbon nanotube composites / O. Breuer, U. Sundararaj // Polymer composites. – 2004. – Vol. 25, iss. 6. – P. 630 – 645. – DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.20058>.
5. Coleman, J.N. Mechanical Reinforcement of Polymers Using Carbon Nanotubes / J.N. Coleman, U. Khan, Yu.K. Gun'ko // Advanced Materials. – 2006. – Vol. 18, iss. 6. – P. 689–706. – DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.200501851>.
6. Njuguna, J. Properties of Composites with Carbon Nanotubes / J. Njuguna, K. Pielichowski, S. Desai // Polymers for Advanced Technologies. – 2008. – Vol. 19, iss. 8. – P. 947–960. – DOI: <https://doi.org/10.1002/pat.1074>.
7. Ciardelli, F. Nanocomposites based on polyolefins and functional thermoplastic materials / F. Ciardelli, S. Coiai, E. Passaglia, A. Pucci, G. Ruggeri // Polymer International. – 2008. – Vol. 57, iss. 6. – P. 805–836. – DOI: <https://doi.org/10.1002/pi.2415>.
8. Morgan, P. Carbon Fibers and Their Composites / P. Morgan. – Boca Raton: CRC Press, 2005. – 1200 p. – DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420028744>.
9. Krueger, A. Carbon Materials and Nanotechnology / A. Krueger. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2010. – 474 p.
10. Бадамшина, Е.Р. Модификация углеродных нанотрубок и синтез полимерных композитов с участием нанотрубок / Е.Р. Бадамшина, М.П. Гафурова, Я.И. Эстрин // Достижения химии. – 2010. – Т. 79, № 11. – С. 945–979. – DOI: <https://doi.org/10.1070/RC2010v079n11ABEH004114>.
11. Gonzalez-Guerrero, A.B. Discriminating the carboxylic groups from the total acidic sites in oxidized multi-wall carbon nanotubes by means of acid–base titration / A.B. Gonzalez-Guerrero, E. Mendoza, E. Pellicer, F. Alsina, C. Fernandez-Sanchez, L.M. Lechuga // Chemical Physics Letters. – 2008. – Vol. 462, iss. 4–6. – P. 256–259. – DOI: 10.1016/j.cplett.2008.07.071.
12. Крестинин, А.В. Получение и характеристика фторированных однослойных углеродных нанотрубок / А.В. Крестинин, А.П. Харитонов, Ю.М. Шульга, О.М. Жигалина, Е.И. Кнерelman, М. Дюбуа [и др.] // Российские нанотехнологии. – 2009. – Т.4, вып. 1–2. – С. 115–131. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995078009010078>.

13. Syrgiannis, Z. Covalent Sidewall Functionalization of SWNTs by Nucleophilic Addition of Lithium Amides / Z. Syrgiannis, F. Hauke, J. Rohl, M. Hundhausen, R. Graupner, Y. Elemes, A. Hirsch // *European Journal of Organic Chemistry*. – 2008. – Vol. 2008, iss. 15. – P. 2544–2550. – DOI: <https://doi.org/10.1002/ejoc.200800005>.
14. Inagaki, N. Plasma Surface Modification and Plasma Polymerization / N. Inagaki // *Interactions Between Plasma and Polymeric Materials*. – Lancaster: Technomic Publication Co, 1996. – Chap. 2. – P. 22–28.
15. Korolev, A.P. The technique of research of fields of short-range action of cluster nanostructures is developed / A.P. Korolev, M.V. Makarchuk, M.N. Dutov, A.D. Loskutova // *Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures (MRDMS-2017): Proceedings of the 11th International conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures*. – 2017. – Vol. 1915, iss. 1. – P. 030009-1–030009-4. – DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5017329>.
16. Korolev, A.P. Studying the Regimes of Forming Carbonic Nano-Objects on Copper Island Structure / A.P. Korolev, M.V. Makarchuk, M.N. Dutov, A.D. Loskutova, A.V. Firssova // *XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*. – 2018. – P. 36–38. – DOI: <https://doi.org/10.1109/APEIE.2018.8545282>.
17. ГОСТ 33693-2015 (ISO 20753:2008). Пластмассы. Образцы для испытания. – М.: Стандартинформ, 2016. – 16 с.

References

1. Dyachenko, S.V. Physical and mechanical properties of a model material with a topology of three times periodic surfaces of minimum energy such as a gyroid in the form of a cube / S.V. Dyachenko, L.A. Lebedev, M.M. Sychev, L.A. Nefedova // *Journal of Technical Physics*. – 2018. – Vol. 88, iss. 7. – P. 1014–1017. – DOI: 10.21883 / JTF.2018.07.46169.2555
2. Lord, E.E. New Geometry for New Materials / E.E. Lord, A.L. McKay, S. Ranganathan. – M.: Fizmatlit, 2010. – 264 p. – ISBN: 0521861047, 9780521861045.
3. Dai, L. Controlled Synthesis and Modification of Carbon Nanotubes and C₆₀: Carbon Nanostructures for Advanced Polymeric Composite Materials / L. Dai, A.W.H. Mau // *Advanced Materials*. – 2001. – Vol. 13, iss. 12–13. – P. 899–913. – DOI: [https://doi.org/10.1002/1521-4095\(200107\)13:12/13<899::AID-ADMA899>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1521-4095(200107)13:12/13<899::AID-ADMA899>3.0.CO;2-G).
4. Breuer, O. Big returns from small fibers: a review of polymer/carbon nanotube composites / O. Breuer, U. Sundararaj // *Polymer composites*. – 2004. – Vol. 25, iss. 6. – P. 630 – 645. – DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.20058>.
5. Coleman, J.N. Mechanical Reinforcement of Polymers Using Carbon Nanotubes / J.N. Coleman, U. Khan, Yu.K. Gun'ko // *Advanced Materials*. – 2006. – Vol. 18, iss. 6. – P. 689–706. – DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.200501851>.
6. Njuguna, J. Properties of Composites with Carbon Nanotubes / J. Njuguna, K. Pielichowski, S. Desai // *Polymers for Advanced Technologies*. – 2008. – Vol. 19, iss. 8. – P. 947–960. – DOI: <https://doi.org/10.1002/pat.1074>.
7. Ciardelli, F. Nanocomposites based on polyolefins and functional thermoplastic materials / F. Ciardelli, S. Coiai, E. Passaglia, A. Pucci, G. Ruggeri // *Polymer International*. – 2008. – Vol. 57, iss. 6. – P. 805–836. – DOI: <https://doi.org/10.1002/pi.2415>.
8. Morgan, P. Carbon Fibers and Their Composites / P. Morgan. – Boca Raton: CRC Press, 2005. – 1200 p. – DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420028744>.
9. Krueger, A. Carbon Materials and Nanotechnology / A. Krueger. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2010. – 474 p.
10. Badamshina, E.R. Modification of carbon nanotubes and synthesis of polymer composites involving nanotubes / E.R. Badamshina, M.P. Gafurova, I.I. Estrin // *Achievements of Chemistry*. – 2010. – Vol. 79, No. 11. – P. 945–979. – DOI: <https://doi.org/10.1070/RC2010v079n11ABEH004114>.

11. Gonzalez-Guerrero, A.B. Discriminating the carboxylic groups from the total acidic sites in oxidized multi-wall carbon nanotubes by means of acid–base titration / A.B. Gonzalez-Guerrero, E. Mendoza, E. Pellicer, F. Alsina, C. Fernandez-Sanchez, L.M. Lechuga // *Chemical Physics Letters*. – 2008. – Vol. 462, iss. 4–6. – P. 256–259. – DOI: 10.1016/j.cplett.2008.07.071.
12. Krestinin, A.V. Production and characterization of fluorinated single-walled carbon nanotubes / A.V. Krestinin, A.P. Kharitonov, Yu.M. Shulga, O.M. Zhigalina, E.I. Knerelman, M. Dubois [etc.] // *Russian nanotechnologies*. – 2009. – Vol. 4, iss. 1–2. – P. 115–131. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995078009010078>.
13. Syrgiannis, Z. Covalent Sidewall Functionalization of SWNTs by Nucleophilic Addition of Lithium Amides / Z. Syrgiannis, F. Hauke, J. Rohl, M. Hundhausen, R. Graupner, Y. Elemes, A. Hirsch // *European Journal of Organic Chemistry*. – 2008. – Vol. 2008, iss. 15. – P. 2544–2550. – DOI: <https://doi.org/10.1002/ejoc.200800005>.
14. Inagaki, N. Plasma Surface Modification and Plasma Polymerization / N. Inagaki // *Interactions Between Plasma and Polymeric Materials*. – Lancaster: Technomic Publication Co, 1996. – Chap. 2. – P. 22–28.
15. Korolev, A.P. The technique of research of fields of short-range action of cluster nanostructures is developed / A.P. Korolev, M.V. Makarchuk, M.N. Dutov, A.D. Loskutova // *Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures (MRDMS-2017): Proceedings of the 11th International conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures*. – 2017. – Vol. 1915, iss. 1. – P. 030009-1–030009-4. – DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5017329>.
16. Korolev, A.P. Studying the Regimes of Forming Carbonic Nano-Objects on Copper Island Structure / A.P. Korolev, M.V. Makarchuk, M.N. Dutov, A.D. Loskutova, A.V. Firssova // *XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*. – 2018. – P. 36–38. – DOI: <https://doi.org/10.1109/APEIE.2018.8545282>.
17. GOST 33693-2015 (ISO 20753:2008). Plastics. Test specimens. – M.: Standardinform, 2016. – 16 p.

УДК 691.618.93:693.542.3

Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева)

Россия, 430005, г. Саранск,
ул. Большевикская, д. 68
тел. (8342) 47-71-56

Ерофеев Владимир Трофимович,
доктор технических наук, профессор,
академик РААСН, декан архитектурно-
строительного факультета, директор НИИ
«Материаловедение», зав. кафедрой
«Строительные материалы и технологии»
E-mail: al_rodin@mail.ru

Родин Александр Иванович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Строительные материалы
и технологии»
E-mail: AL_Rodin@mail.ru

Кравчук Алексей Сергеевич,
аспирант кафедры «Строительные
материалы и технологии»
E-mail: a.kravchuk.s@yandex.ru

Ермаков Анатолий Анатольевич,
магистрант кафедры «Строительные
материалы и технологии»
E-mail: anatoly.ermakov97@mail.ru

National Research Ogarev Mordovia State
University (MRSU)

Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.,
tel.: (8342) 47-71-56

Yerofeev Vladimir Trofymovich,
Doctor of Sciences, Professor, Academician
of the RAACSN, Dean of the Faculty of
Architecture and Construction, Director of the
Research Institute «Materials Science», Head of the
department «Building materials and technology»
E-mail: al_rodin@mail.ru

Rodin Aleksandr Ivanovich,
Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the department «Building
materials and technologies»
E-mail: AL_Rodin@mail.ru

Kravchuk Aleksej Sergeevich,
Postgraduate student of the department
«Building materials and technologies»
E-mail: a.kravchuk.s@yandex.ru

Ermakov Anatolij Anatol'evich,
Master student of the department «Building
materials and technologies»
E-mail: anatoly.ermakov97@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ШИХТЕ (ТРЕПЕЛ : Na_2CO_3) ДЛЯ ПЕНОСТЕКЛОКЕРАМИКИ*

В.Т. Ерофеев, А.И. Родин, А.С. Кравчук, А.А. Ермаков

Применение технологии вспенивания шихты, без операции высокотемпературной варки стекломассы, а также расширение сырьевой базы строительных материалов за счёт использования различных местных горных пород является одним из перспективных направлений в области получения строительных материалов из пеностекла. В этой связи целью данной работы являлось изучение фазовых превращений, происходящих в шихте для пеностеклокерамики, содержащей трепел и кальцинированную соду, при нагревании. Методами термического анализа подтверждена возможность получения вспененных материалов на основе трепела и кальцинированной соды за один нагрев шихты. Установлено, что силикатообразование в шихте, состоящей из кремнеземсодержащей породы (трепел) и кальцинированной соды, начинается при температуре около 400 °С, плавление – при температуре около 650 °С, а вспенивание – при температуре около 700 °С. Согласно данным рентгенофазового анализа, обожженный материал на 55-60 % состоит из аморфной и на 40-45 % кристаллической фаз.

Ключевые слова: фазовый состав, трепел, кальцинированная сода, пеностеклокерамика, теплоизоляционный материал, кремнеземсодержащая порода, ДТА, РФА

STUDY OF PHASE TRANSFORMATIONS IN CHARGE (TRIPOLI: Na_2CO_3) FOR GLASS CERAMIC FOAMS

V.T. Erofeev, A.I. Rodin, A.S. Kravchuk, A.A. Ermakov

The use of charge foaming technology, without the operation of high-temperature glass cooking, as well as the expansion of the raw material base of building materials by using various local rocks is one of the promising areas in the field of getting building materials from foam glass. In this regard,

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-73-00213).

the aim of this work was to study the phase transformations occurring in the charge for foam glass ceramics containing tripoli and soda ash while heating. Methods of thermal analysis confirmed the possibility of obtaining foamed materials based on tripoli and soda ash in one charge heating. It is established that silicate formation in the charge consisting of silica-containing rock (tripoli) and soda ash begins at the temperature of about 400 °C, melting at a temperature of about 650 °C, and foaming at a temperature of about 700 °C. According to x-ray phase analysis, the annealed material consists of 55-60 % amorphous and 40-45 % crystalline phases.

Keywords: phase composition, tripoli, soda ash, glass ceramic foams, thermal insulation material, silicic rock, DTA, XRD

Введение

Пеностекло является уникальным строительным материалом, который более чем на 99 % состоит из стеклянных ячеек. Материалы и изделия на основе пеностекла обладают малым весом, характеризуются очень низкой теплопроводностью, достаточной эксплуатационной прочностью, не дают усадки и не изменяют геометрические размеры с течением времени под действием эксплуатационных нагрузок, выдерживают высокие температуры при эксплуатации, являются коррозионно-стойкими [1, 2]. Технология производства пеностекла включает несколько этапов. На первом – производят варку стекла, на втором – остывшее стекло размалывают с газообразующими добавками и повторно нагревают с последующим отжигом полученного материала.

Одним из перспективных направлений научных исследований в области получения строительных материалов из пеностекла является изучение процессов вспенивания шихты, минуя процесс высокотемпературной варки стекломассы [3-8], а также расширение сырьевой базы за счёт применения различных местных горных пород, позволяющее значительно увеличить доступность сырья и, одновременно, снизить его стоимость [3, 4, 6–16] и др.

Физико-химические процессы вспучивания цеолитов, глинистых и перлитовых пород, шлака и стекла к настоящему времени достаточно хорошо изучены. Данные механизмы нельзя соотнести с процессами, происходящими при вспучивании кремнеземсодержащих пород, таких, как диатомит, трепел, опока. Однако из литературы известны случаи вспенивания трепелов с добавлением в их состав глинозема, а также диатомитов с добавлением водного раствора NaOH или KOH [3, 6, 7, 17–20].

В данной работе приводятся результаты исследований строительных материалов на основе кремнеземсодержащей породы (трепел) и кальцинированной соды, полученных за один нагрев шихты плотностью от 200 до 600 кг/м³, теплопроводностью от 0,053 до 0,115 Вт/(м·°C) и прочностью при сжатии от 1,2 до 9,8 МПа.

Ниже представлены результаты, относящиеся к изучению фазовых превращений, происходящих в шихте для пеностеклокерамики, содержащей трепел и кальцинированную соду, при нагревании.

Материалы и методы исследований

Шихта для получения пеностеклокерамики готовилась с использованием следующих компонентов:

– кремнеземсодержащей породы (трепел) месторождения близ с. Енгальчево, Дубенского района, Республики Мордовия, следующего химического состава: SiO₂ – 71,00 %, CaO – 9,01 %, Al₂O₃ – 8,90 %, Fe₂O₃ – 2,86 %, K₂O – 2,06 %, MgO – 1,61 %, TiO₂ – 0,444 %, Na₂O – 0,252 %, P₂O₅ – 0,171 %, SrO – 0,064 %, BaO – 0,029 %, SO₃ – 0,027 %, ZrO₂ – 0,017 %, V₂O₅ – 0,012 %, MnO – 0,012 %, Cr₂O₃ – 0,009 %, Rb₂O – 0,010 %, CuO – 0,008 %, ZnO – 0,005 %, ППП – 3,50 % и минералогического состава: кристобалит (SiO₂) – 42,1 %, гейландит ((Ca,Sr,K₂,Na₂)[Al₂Si₆O₁₆]·5H₂O) – 17,7 %, мусковит (KAl₂[AlSi₃O₁₀](OH)₂) – 14,4 %, кальцит (CaCO₃) – 13,9 %, кварц (SiO₂) – 11,2 %, тридимит (SiO₂) – 0,7 %;

– соды кальцинированной технической первого сорта, отвечающей требованиям ГОСТ 5100–85. Химическая формула Na₂CO₃.

Шихту получали совместным помолом высушенной до постоянной массы при $t = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ вышеуказанной породы и кальцинированной соды до достижения удельной поверхности не менее $1\,000\text{ м}^2/\text{кг}$.

Фазовые превращения, происходящие в шихте при нагревании, изучались с помощью прибора TGA/DSC1. Для этого $0,15\text{--}0,16\text{ г}$ шихты взвешивалось с точностью до $0,0001\text{ г}$ и засыпалось в алундовый тигель объемом 150 мкл . Пробу уплотняли постукиванием тигля о стол. Далее тигель устанавливали на держатель и помещали в печь. Образец нагревался от 30 до $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Фазовый состав образцов пеностеклокерамики, полученных при разной максимальной температуре нагрева, определялся методом рентгенофазового анализа (РФА) с помощью дифрактометра ARL X'tra (Швейцария). Регистрация дифрактограмм осуществлялась на $\text{CuK}\alpha_{1+2}$ излучении в интервале углов $2\Theta = 4\text{--}70^{\circ}$ со скоростью $2^{\circ}/\text{минуту}$. Во время съемки образец вращался со скоростью 60 оборотов/минуту. Качественный фазовый анализ осуществлен методом Ханавальта с использованием базы данных ICDD PDF-2. Количественный рентгенофазовый анализ проведен по методу Ритвельда с использованием программного обеспечения Siroquant 3 Sietronics Pty Ltd.

Результаты и их обсуждение

Анализ состава компонентов, образующих разрабатываемые пеностеклокерамические материалы, свидетельствует о следующем. Химический состав трепела не содержит в достаточном количестве элементов, входящих в состав плавней (Na, K и т.п.), необходимых для получения низкотемпературных эвтектик, снижения вязкости стеклофазы и т.п. Основным компонентом в породе является кристобалит (SiO_2), который, при наличии кальцита (CaCO_3) микрокристаллической структуры (регулирует температуру плавления, вязкость, улучшает механические и химические свойства будущего материала), а также при добавлении кальцинированной соды (Na_2CO_3) (снижает температуру плавления), при нагревании до температуры около $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ начинает вступать в химические реакции с образованием силикатов. Скорость образования силикатов тем выше, чем выше активность компонентов шихты, а также зависит от количества щелочных и щелочноземельных составляющих состава. Силикатообразование ускоряется и при наличии влаги в составе, особенно гидратной, а также от степени помола шихты. Известно, что в шихтах, состоящих из кремнезема, кальцинированной соды и достаточного количества глинозема, образование тройных соединений типа девитрит завершается уже при температуре, равной $600\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эвтектики, образованные данными соединениями и силикатами натрия, плавятся уже при температуре $710\text{--}760\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2, 21]. Во многих кремнеземсодержащих породах отсутствуют вспучивающие компоненты. Представленная в данной работе порода имеет в своем составе сразу несколько компонентов, которые можно отнести к вспучивающим: мусковит, который выделяет конструкционную воду при температуре около $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, гейландит, характеризуемый ступенчатой дегидратацией вплоть до температуры, равной $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, и кальцит, декарбонизация которого происходит при температуре выше $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2, 21]. Следовательно, можно предположить, что шихта, состоящая из представленной в данной работе кремнеземсодержащей породы и кальцинированной соды, нагретая до температуры $750\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$, будет вспениваться.

С целью подтверждения вышесказанного, методами термического анализа нами проведены исследования фазовых превращений, происходящих в измельченной до удельной поверхности не менее $1\,000\text{ м}^2/\text{кг}$ шихте (смесь трепела и кальцинированной соды в соотношении от 85:15 до 76:24). Методика проведения эксперимента описана выше. Результаты исследований представлены на рис. 1.

Согласно данным, представленным на рис. 1, в результате нагрева шихты были выявлены следующие основные фазовые превращения. Первый пик в интервале температур от 25 до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (эндоэффект) соответствует диссоциации кристаллически не связанной воды. Второй пик в интервале температур от 100 до $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответствует диссоциации образовавшегося в результате присутствия незначительного количества влаги в шихте NaHCO_3 . Третий и четвертый эндоэффекты при температурах 240 и

350 °C соответствуют дегидратации присутствующего в породе гейландита. Следующий эндотермический эффект и значительная потеря массы в интервале температур от 400 до 550 °C соответствуют образованию силикатов натрия, интенсивность которых возрастает с увеличением содержания в шихте Na_2CO_3 . Эндотермический эффект в интервале температур от 550 до 700 °C соответствует декарбонизации непрореагировавшего кальцита, а также дегидратации структурно связанной воды из породы. Интенсивность данного пика уменьшается с увеличением содержания в шихте кальцинированной соды. Последний пик (эндоэффект) и потеря массы в интервале температур от 700 до 720 °C соответствуют выделению конструкционной воды из мусковита. Плавление шихты, согласно данным рис. 1, а, начинается при температуре около 650 °C. Вышесказанное подтверждает предположение о том, что получение вспененного материала из кремнеземсодержащей породы за один нагрев шихты является возможным.

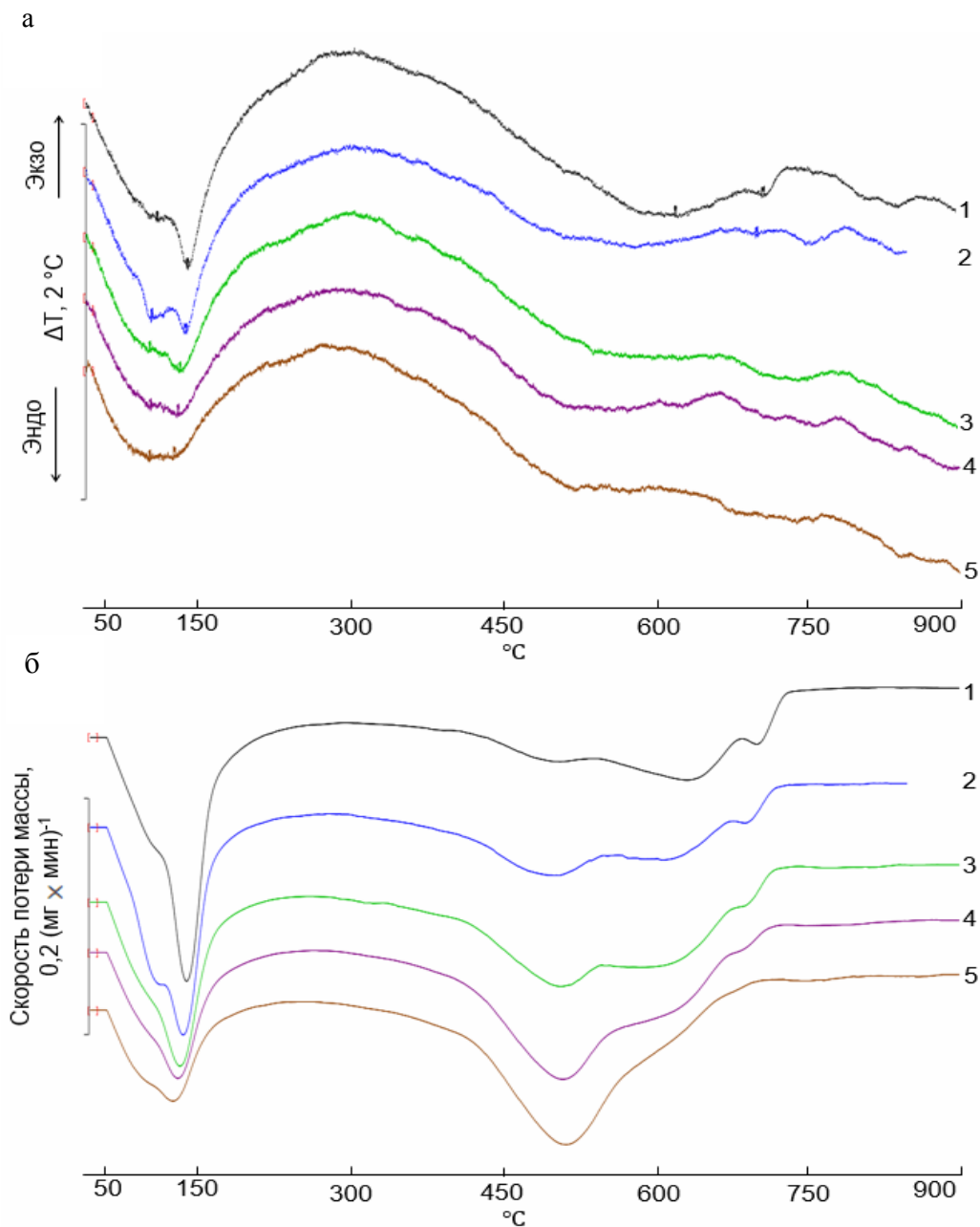


Рис. 1. ДТА (а) и ДТГ (б) кривые смеси трепела и Na_2CO_3 соотношением:
1, 2, 3, 4, 5 – 85:15; 82,5:17,5; 80:20; 78:22; 76:24 соответственно

На рис. 2 представлены результаты рентгенофазового анализа пеностеклокерамических материалов, полученных при различных максимальных температурах нагрева шихты (трепел : Na_2CO_3).

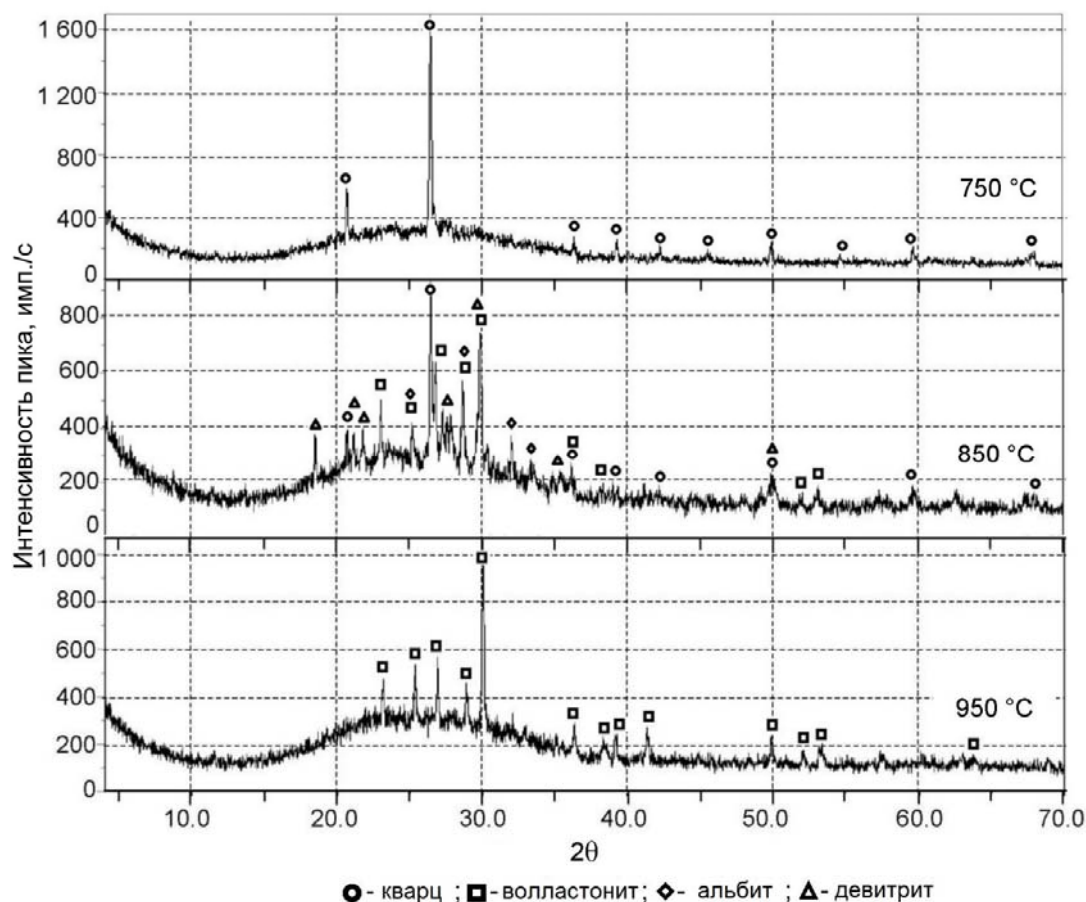


Рис. 2. РФА обожженных материалов, полученных при различных максимальных температурах нагрева шихты

Согласно данным рис. 2, после нагрева шихты (смесь трепела и кальцинированной соды в соотношении 80:20 соответственно) до максимальной температуры, равной 750 °С, состав обожженного материала, установленный в результате проведенного рентгенофазового анализа, состоит из 60 % аморфной фазы и 40 % кварца. При увеличении максимальной температуры на 100 °С обожженный материал состоит из аморфной фазы – 55 %, волластонита – 26 %, альбита и девитрита по 6,5 % и кварца – 6 %. При увеличении максимальной температуры еще на 100 °С состав материала представлен аморфной фазой – 60 % и волластонитом – 40 %.

Выводы

1. Методами термического анализа подтверждена возможность получения вспененных материалов на основе трепела и кальцинированной соды за один нагрев шихты.

2. Установлены фазовые превращения, происходящие в шихте (смесь трепела и кальцинированной соды) при нагревании. Выявлено, что силикатообразование в шихте начинается при температуре около 400 °С, а плавление – около 650 °С. Предполагается, что процесс вспенивания осуществляется за счет выделения конструкционной воды из мусковита, входящего в состав трепела, при температуре около 700 °С.

3. Методом РФА установлен фазовый состав обожженного материала, который на 55-60 % состоит из аморфной и на 40-45 % кристаллической фаз.

Список литературы

1. Manevich, V.E. Foam glass and problems of energy conservation / V.E. Manevich, K.Yu. Subbotin // *Glass and Ceramics* (English translation of *Steklo i Keramika*). – 2008. – Vol. 65, No. 3–4. – P. 105–108. – DOI: 10.1007/s10717-008-9026-1.
2. Минько, Н.И. Теплоизоляционные стекломатериалы. Пеностекло / Н.И. Минько, О.В. Пучка, М.Н. Степанова, С.С. Вайсера. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. – 263 с.
3. Kazantseva, L.K. Particulars of foam glass manufacture from zeolite-alkali batch / L.K. Kazantseva // *Glass and Ceramics* (English translation of *Steklo i Keramika*). – 2013. – Vol. 70, No. 7–8. – P. 277–281. – DOI: 10.1007/s10717-013-9560-3.
4. Manevich, V.E. Diatomite – Siliceous material for the glass industry / V.E. Manevich, R.K. Subbotin, E.A. Nikiforov, N.A. Senik, A.V. Meshkov // *Glass and Ceramics* (English translation of *Steklo i Keramika*). – 2012. – Vol. 69, No. 5–6. – P. 168–172. – DOI: 10.1007/s10717-012-9438-9.
5. Qu, Y.-N. Lightweight and high-strength glass foams prepared by a novel green spheres hollowing technique / Y.-N. Qu, J. Xu, Z.-G. Su, N. Ma, X.-Y. Zhang, X.-Q. Xi, J.-L. Yang // *Ceramics International*. – 2016. – Vol. 42, No. 2. – P. 2370–2377. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.10.034.
6. Никитин, А.И. Теплоизоляционные материалы и изделия на основе трепелов Потанинского месторождения / А.И. Никитин, Г.И. Стороженко, Л.К. Казанцева, В.И. Верещагин // *Строительные материалы*. – 2014. – № 8. – С. 34–37.
7. Орлов, А.Д. Оптимизированная одностадийная технология гранулированного пеностекла на основе низкотемпературного синтеза стеклофазы / А.Д. Орлов // *Строительные материалы*. – 2015. – № 1. – С. 24–26.
8. Ivanov, K.S. Diatomites in Granular Foam-Glass Technology / K.S. Ivanov, S.S. Radaev, O.I. Selezneva // *Glass and Ceramics* (English translation of *Steklo i Keramika*). – 2014. – Vol. 71, No. 5–6. – P. 157–161. – DOI: 10.1007/s10717-014-9641-y.
9. Bernardo, E. Glass foams from dismantled cathode ray tubes / E. Bernardo, F. Albertini // *Ceramics International*. – 2006. – Vol. 32, No. 6. – P. 603–608. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2005.04.019.
10. Chen, M. Lead recovery and the feasibility of foam glass production from funnel glass of dismantled cathode ray tube through pyrovacuum process / M. Chen, F.-S. Zhang, J. Zhu // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 161, No. 2–3. – P. 1109–1113. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.04.084.
11. Fernandes, H.R. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents / H.R. Fernandes, D.U. Tulyaganov, J.M.F. Ferreira // *Ceramics International*. – 2009. – Vol. 35, No. 1. – P. 229–235. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2007.10.019.
12. Guo, Y. Novel glass ceramic foams materials based on polishing porcelain waste using the carbon ash waste as foaming agent / Y. Guo, Y. Zhang, H. Huang, X. Meng, Y. Liu, S. Tu, B. Li // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 125. – P. 1093–1100. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.134.
13. Li, Z. Preparation and characterization of glass–ceramic foams with waste quartz sand and coal gangue in different proportions / Z. Li, Z. Luo, X. Li, T. Liu, L. Guan, T. Wu, A. Lu // *Journal of Porous Materials*. – 2016. – Vol. 23, No. 1. – P. 231–238. – DOI: 10.1007/s10934-015-0074-y.
14. Rincón, A. Novel ‘inorganic gel casting’ process for the manufacturing of glass foams / A. Rincón, G. Giacomello, M. Pasetto, E. Bernardo // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2017. – Vol. 37, No. 5. – P. 2227–2234. – DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.01.012.
15. Yin, H. Fabrication of foam glass from iron tailings / H. Yin, M. Ma, J. Bai, Y. Li, S. Zhang, F. Wang // *Materials Letters*. – 2016. – Vol. 185. – P. 511–513. – DOI: 10.1016/j.matlet.2016.09.034.
16. Zhang, Q. Preparation of high strength glass ceramic foams from waste cathode ray tube and germanium tailings / Q. Zhang, F. He, H. Shu, Y. Qiao, S. Mei, M. Jin, J. Xie // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 111. – P. 105–110. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.036.

17. Береговой, В.А. Облегченная керамика повышенной прочности для энергоэффективных ограждающих конструкций / В.А. Береговой, Е.В. Снадин // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4 (33). – С. 54–59.
18. Береговой, В.А. Улучшение прочностных показателей пенокерамического сырца / В.А. Береговой, Е.В. Снадин // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 4 (37). – С. 80–84.
19. Иваненко, В.Н. Строительные материалы и изделия из кремнистых пород / В.Н. Иваненко. – Киев: Будиівельник, 1978. – 120 с.
20. Сенник, Н.А. Получение высокоэффективного теплоизоляционного материала на основе диатомита путем низкотемпературного вспенивания / Н.А. Сенник, А.В. Мешков, А.Л. Виницкий, Т.В. Вакалова, В.И. Верещагин // Техника и технология силикатов. – 2012. – Т. 19, № 4. – С. 6–12.
21. Pak, V.N. Porous glass and nanostructured materials / V.N. Pak, Y.Y. Gavronskaya, T.M. Burkat. – New York: Nova, 2015. – 113 p.

References

1. Manevich, V.E. Foam glass and problems of energy conservation / V.E. Manevich, K.Yu. Subbotin // Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika). – 2008. – Vol. 65, No. 3–4. – P. 105–108. – DOI: 10.1007/s10717-008-9026-1.
2. Min'ko, N.I. Insulating glass materials. Foam glass / N.I. Min'ko, O.V. Puchka, M.N. Stepanova, S.S. Vajsera. – Belgorod: Publishing house of BSTU, 2016. – 263 p.
3. Kazantseva, L.K. Particulars of foam glass manufacture from zeolite-alkali batch / L.K. Kazantseva // Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika). – 2013. – Vol. 70, No. 7-8. – P. 277–281. – DOI: 10.1007/s10717-013-9560-3.
4. Manevich, V.E. Diatomite – Siliceous material for the glass industry / V.E. Manevich, R.K. Subbotin, E.A. Nikiforov, N.A. Senik, A.V. Meshkov // Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika). – 2012. – Vol. 69, No. 5-6. – P. 168–172. – DOI: 10.1007/s10717-012-9438-9.
5. Qu, Y.-N. Lightweight and high-strength glass foams prepared by a novel green spheres hollowing technique / Y.-N. Qu, J. Xu, Z.-G. Su, N. Ma, X.-Y. Zhang, X.-Q. Xi, J.-L. Yang // Ceramics International. – 2016. – Vol. 42, No. 2. – P. 2370–2377. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.10.034.
6. Nikitin, A.I. Insulation materials and products based on diatomaceous earth Potanin field / A.I. Nikitin, G.I. Storozhenko, L.K. Kazanceva, V.I. Vereshchagin // Building material. – 2014. – No. 8. – P. 34–37.
7. Orlov, A.D. Optimized single-stage technology of granulated foam glass based on low-temperature synthesis of glass phase / A.D. Orlov // Building material. – 2015. – No. 1. – P. 24–26.
8. Ivanov, K.S. Diatomites in Granular Foam-Glass Technology / K.S. Ivanov, S.S. Radaev, O.I. Selezneva // Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika). – 2014. – Vol. 71, No. 5–6. – P. 157–161. – DOI: 10.1007/s10717-014-9641-y.
9. Bernardo, E. Glass foams from dismantled cathode ray tubes / E. Bernardo, F. Albertini // Ceramics International. – 2006. – Vol. 32, No. 6. – P. 603–608. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2005.04.019.
10. Chen, M. Lead recovery and the feasibility of foam glass production from funnel glass of dismantled cathode ray tube through pyrovacuum process / M. Chen, F.-S. Zhang, J. Zhu // Journal of Hazardous Materials. – 2009. – Vol. 161, No. 2-3. – P. 1109–1113. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.04.084.
11. Fernandes, H.R. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents / H.R. Fernandes, D.U. Tulyaganov, J.M.F. Ferreira // Ceramics International. – 2009. – Vol. 35, No. 1. – P. 229–235. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2007.10.019.
12. Guo, Y. Novel glass ceramic foams materials based on polishing porcelain waste using the carbon ash waste as foaming agent / Y. Guo, Y. Zhang, H. Huang, X. Meng,

Y. Liu, S. Tu, B. Li // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 125. – P. 1093–1100. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.134.

13. Li, Z. Preparation and characterization of glass–ceramic foams with waste quartz sand and coal gangue in different proportions / Z. Li, Z. Luo, X. Li, T. Liu, L. Guan, T. Wu, A. Lu // Journal of Porous Materials. – 2016. – Vol. 23, No. 1. – P. 231–238. – DOI: 10.1007/s10934-015-0074-y.

14. Rincón, A. Novel ‘inorganic gel casting’ process for the manufacturing of glass foams / A. Rincón, G. Giacomello, M. Pasetto, E. Bernardo // Journal of the European Ceramic Society. – 2017. – Vol. 37, No. 5. – P. 2227–2234. – DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.01.012.

15. Yin, H. Fabrication of foam glass from iron tailings / H. Yin, M. Ma, J. Bai, Y. Li, S. Zhang, F. Wang // Materials Letters. – 2016. – Vol. 185. – P. 511–513. – DOI: 10.1016/j.matlet.2016.09.034.

16. Zhang, Q. Preparation of high strength glass ceramic foams from waste cathode ray tube and germanium tailings / Q. Zhang, F. He, H. Shu, Y. Qiao, S. Mei, M. Jin, J. Xie // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 111. – P. 105–110. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.036.

17. Beregovoj, V.A. Lightweight high-strength ceramics for energy-efficient walling / V.A. Beregovoj, E.V. Snadin // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 4 (33). – P. 54–59.

18. Beregovoj, V.A. Improvement of strength parameters of raw foam ceramic / V.A. Beregovoj, E.V. Snadin // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 4 (37). – P. 80–84.

19. Ivanenko, V.N. Building materials and products from siliceous rocks / V.N. Ivanenko. – Kiev: Budivelnik, 1978. – 120 p.

20. Senik, N.A. Production of high-performance thermal insulation material based on diatomite by low-temperature foaming / N.A. Senik, A.V. Meshkov, A.L. Vinickij, T.V. Vakkalova, V.I. Vereshchagin // Technique and technology of silicates. – 2012. – Vol. 19, No. 4. – P. 6–12.

21. Pak, V.N. Porous glass and nanostructured materials / V.N. Pak, Y.Y. Gavronskaya, T.M. Burkat. – New York: Nova, 2015. – 113 p.

УДК [691.5:691.542]:691-404

*Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет*

Россия, 129337, г. Москва,
Ярославское шоссе, д. 26,
тел.: +7 (495) 781-80-07;
факс: +7 (499) 183-44-38

Иноземцев Александр Сергеевич,
кандидат технических наук,
младший научный сотрудник, доцент
E-mail: InozemtcevAS@mgsu.ru

Королев Евгений Валерьевич,
доктор технических наук, профессор,
проректор
E-mail: KorolevEV@mgsu.ru

Зыонг Тхань Куй,
аспирант

*National Research Moscow State University of
Civil Engineering*

Russia, 129337, Moscow,
26, Yaroslavskoe shosse,
tel.: +7 (495) 781-80-07;
fax: +7 (499) 183-44-38

Inozemtsev Sergey Sergeevich,
Doctor of Sciences, junior researcher,
Associate Professor
E-mail: InozemtcevAS@mgsu.ru

Korolev Evgeny Valer'evich,
Doctor of Sciences, Professor, Vice-rector
E-mail: KorolevEV@mgsu.ru

Duong Than Qui,
Postgraduate

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЦЕМЕНТНО-МИНЕРАЛЬНЫХ СИСТЕМ, ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИКАРБОКСИЛАТНЫМ ПЛАСТИФИКАТОРОМ*

А.С. Иноземцев, Е.В. Королев, Т.К. Зыонг

В работе представлены результаты исследования пластифицированных цементно-минеральных паст, наполненных тонкими минеральными добавками – золой-уносом бурых углей, известняковым порошком из крымского ракушечника, порошком из кварцевого песка и микрокремнеземом. Установлено, что реологические кривые цементно-минеральных паст, пластифицированных эфирами поликарбоксилатов, характеризуются наличием аномальных участков, описываемых нисходящим участком на зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига и свойственных слабоструктурированным подвижным системам с напряжением сдвига менее 1 Па.

Ключевые слова: цементно-минеральные пасты, пластифицированные композиции, поликарбоксилатный пластификатор, реологическая кривая, кривая течения, аномалия течения, реологическая аномалия

RHEOLOGICAL FEATURES OF CEMENT-MINERAL SYSTEMS WITH A POLYCARBOXYLATE PLASTICIZER

A.S. Inozemtcev, E.V. Korolev, T.Q. Duong

The results of the study of plasticized cement-mineral pastes filled with fine mineral additives are given in the article. Abnormal area of rheological curves of cement-mineral pastes with polycarboxylate ethers was found out. The flow anomaly is described by the decreasing of shear stress on the shear rate for mixtures in the range of shear stress less than 1 Pa. The plasticizer is a key factor in the demonstration of an abnormal area for the studied cement-mineral dispersion systems.

Keywords: cement-mineral pastes, plasticized compositions, polycarboxylate plasticizer, rheological curve, flow curve, flow anomaly, rheological anomaly

* Работа выполнена в рамках соглашения № 14.583.21.0072 о предоставлении субсидий для реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (идентификатор проекта – RFMEFI58318X0072) при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Введение

Вопросам применения минеральных добавок в портландцементных системах посвящено множество трудов (см., например, 9)]. При этом их влияние в зависимости от физико-химических свойств может существенно варьироваться: от структурно-топологического до участия в процессах структурообразования за счет взаимодействия с основными компонентами и продуктами гидратации вяжущего. Особенный интерес представляют работы, посвященные совместной работе минеральных добавок и поликарбоксилатов.

Так, в трудах [3...12] отмечается, что комбинирование минеральных и пластифицирующих добавок за счет водоредуцирующего эффекта позволяет управлять В/Ц-отношением или расходом вяжущего вещества, что является важным фактором для повышения прочности или конкурентоспособности бетонов. Высокодисперсные минеральные добавки (МД), заполняя пустоты между более крупными частицами в пластифицированных бетонных смесях, способствуют лучшему их течению и формируют более плотную структуру, также обеспечивая повышение механических свойств композита [10, 11, 13].

В [12] тонкодисперсные компоненты в бетонных смесях как для обычных, так и для высокопрочных и особовысокопрочных бетонов по функциональному действию классифицированы на 2 вида:

- 1) реологически активные, характеризующиеся усиленным действием пластификаторов в цементно-минеральной матрице;
- 2) реологически- и реакционно-активные, отличающиеся от первого вида, дополнительной химической активностью кремнеземистой фазы по отношению к гидролизной извести портландцемента.

Ранее в [15] на модельной системе (пластифицированный цементно-песчаный раствор) исследовано влияние МД на ее реологические свойства. Исследования показали, что при постоянном расходе портландцемента увеличение до определенного количества высокодисперсных компонентов в смеси за счет уменьшения количества крупной фракции (мелкого заполнителя) приводит к повышению подвижности смесей (рис. 1). При этом прочностные свойства композита увеличиваются прямо пропорционально подвижности смеси (рис. 2).

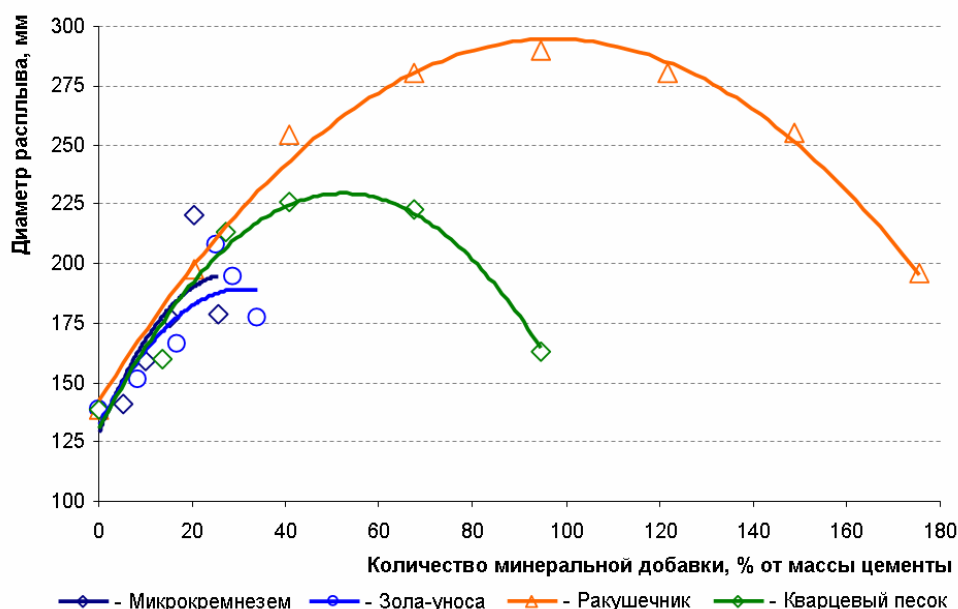


Рис. 1. Влияние минеральных добавок на реологические свойства портландцементных дисперсных систем, оцениваемые по диаметру расплыва смеси

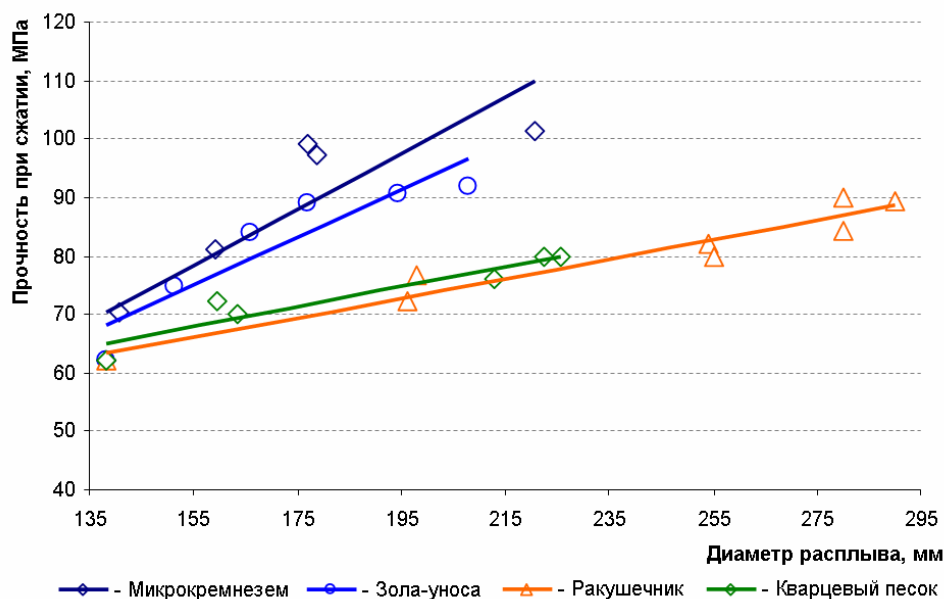


Рис. 2. Зависимость между подвижностью смеси и прочностью исследуемых составов

Представленные результаты можно объяснить, с одной стороны, оптимизацией строения смеси, когда за счет увеличения толщины прослойки цементно-минеральной смеси (портландцемент, минеральная добавка, вода и пластификатор) снижаются силы сопротивления движению частиц мелкого заполнителя, а с другой – вкладом высокодисперсных частиц минерального наполнителя в распределение пластификатора в смеси и, как следствие, равномерным распределением воды по поверхности компонентов. При достижении определенной степени наполнения, которая связана с физическими особенностями каждой из минеральных добавок, начинают преобладать негативные факторы (увеличение суммарной площади сухих компонентов, неоднородность объемного распределения воды), вследствие действия которых подвижность смесей снижается.

Максимальная подвижность смеси и прочность композита зависят как от физико-химических свойств минеральной добавки, так и от вида и количества пластификатора. Причем эффективность пластификатора (водоредуцирующий эффект) также зависит от указанных свойств минеральной добавки. Отсюда немаловажным является вклад взаимодействия пластификатора с минеральной добавкой для обеспечения требуемой подвижности смесей и соответствующей прочности композита.

Для получения смесей с равномерно распределенными компонентами, имеющих реологические свойства, обеспечивающие их транспортировку (перекачку) и укладку, важными являются исследования зависимости реологических характеристик от скорости сдвига.

Материалы и методы исследования

В работе для исследования влияния минеральных добавок на реологические свойства пластифицированных цементно-минеральных паст применяли следующие компоненты. В качестве вяжущего вещества использовался портландцемент СЕМ I 42,5. Для обеспечения подвижности растворной смеси применялся гиперпластификатор на поликарбонатной основе Melflux 1641F. В качестве минеральных добавок использовались: зола-унос, тонкоизмельченный ракушечник (далее – мука из ракушечника), тонкоизмельченный кварцевый песок (далее – мука из кварцевого песка), микрокремнезем. В составе цементно-минеральной смеси варьировалось соотношение минеральной добавки к вяжущему веществу (табл. 1) при постоянном В/Ц = 0,4 и количестве пластификатора – 1 % от массы портландцемента.

Т а б л и ц а 1

Маркировка составов и содержание минеральных добавок в цементных пастах

№	Состав	Д/Ц	Состав	Д/Ц	Состав	Д/Ц	Состав	Д/Ц
1	МКМ-1	0,06	П-1	0,14	З-1	0,08	Р-1	0,20
2	МКМ-2	0,11	П-2	0,27	З-2	0,15	Р-2	0,41
3	МКМ-3	0,17	П-3	0,41	З-3	0,23	Р-3	0,68
4	МКМ-4	0,22	П-4	0,68	З-4	0,30	Р-4	0,95
5	МКМ-5	0,28	П-5	0,95	З-5	0,38	Р-5	1,22

П р и м е ч а н и е : Д/Ц – соотношение между минеральной добавкой и портландцементом, МКМ – микрокремнезем, П – мука из кварцевого песка, З – зола-унос, Р – мука из ракушечника.

Т а б л и ц а 2

Химический состав минеральных добавок

№	Минеральная добавка	Соединение, % мас.					
		SiO ₂	CaO+CaCO ₃	Al ₂ O ₃	FeO+Fe ₂ O ₃	MgO+MgCO ₃	Другое
1	Микрокремнезем	90,0	3,5	–	–	–	6,5
2	Зола-унос	50,0	2,5	37,0	4,5	0,5	5,5
3	Мука из кварцевого песка	94,5	0,3	–	2,5	0,1	2,3
4	Мука из ракушечника	21,2	65,0	1,5	0,5	0,4	11,4

Т а б л и ц а 3

Физические свойства компонентов и структурные характеристики исследуемых составов

№	Состав	Свойства минеральной добавки		Геометрические характеристики исследуемых составов									
		d^* , мкм	$S_{уд}^{**}$, м ² /кг	Суммарная площадь поверхности дисперсной фазы, S_b 10 ⁶ м ²					Расчетная толщина водной прослойки, h_b , мкм				
				Номер состава									
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	К	—		44,43					12,47				
2	МКМ	11,2	83600	49,48	54,26	58,78	63,06	67,12	10,87	9,64	8,66	7,86	7,19
3	З	19,1	20900	44,84	45,22	45,58	45,91	46,23	11,88	11,36	10,87	10,43	10,02
4	П	14,0	14000	43,94	43,52	43,14	42,51	42,00	11,77	11,15	10,59	9,62	8,82
5	Р	5,6	16800	44,43	44,43	44,43	44,44	44,44	11,27	10,28	9,21	8,33	7,61

П р и м е ч а н и е : К – контрольный состав без минеральной добавки; * – размер частиц, определенный по методу лазерной дифракции; ** – удельная поверхность, определенная по методу БЭТ.

Исследование реологических характеристик пластифицированных цементно-минеральных смесей осуществлялось по показателю предельного напряжения сдвига на ротационном вискозиметре MCR-101 с измерительной системой «шар» (рис. 3).

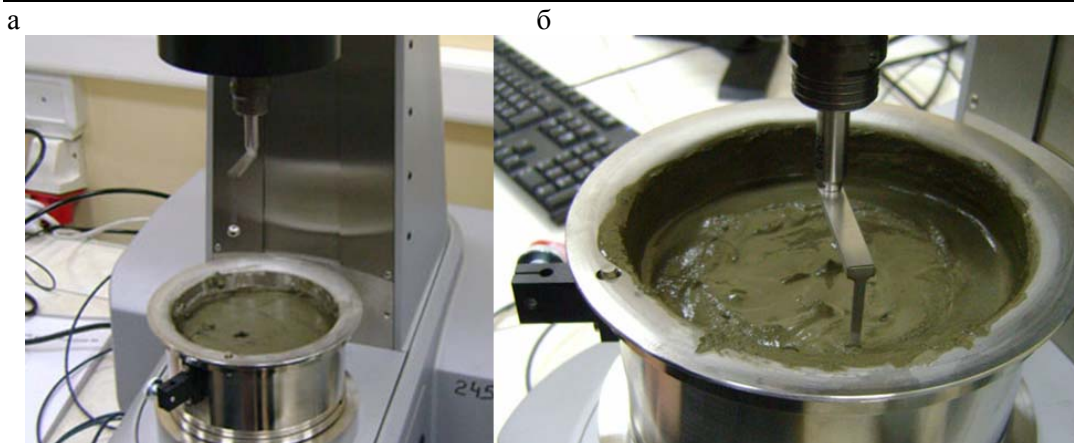


Рис. 3. Общий вид ротационного вискозиметра MCR-101 с измерительной системой «шар» до (а) и в момент испытания (б)

Результаты и обсуждение

Традиционно для описания реологических кривых течения используется модель Оствальда – Вейля [16]:

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n,$$

где τ – напряжение сдвига; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига; k – показатель консистенции; n – показатель, характеризующий тип течения.

Как известно, к псевдопластическим системам ($n < 1$), как правило, относятся суспензии с асимметричными или волокнистыми частицами твердой фазы, а также растворы многих полимеров или целлюлозы, которые начинают течь уже при самых малых значениях сдвиговых нагрузок (с увеличением скорости сдвига напряжение сдвига изменяется с *затухающей* интенсивностью). К дилатантным средам ($n > 1$) относят насыщенные дисперсной фазы системы, где дисперсионная среда находится в прослойках между частицами и при небольших скоростях сдвига способствует снижению трения (с увеличением скорости сдвига напряжение сдвига изменяется с *растущей* интенсивностью). Примером таких систем являются суспензии крахмала, силиката калия, различные клеи.

Проведенные исследования показали, что исследуемые комплексы «пластификатор – минеральная добавка» оказывают различное влияние на течение цементно-минеральных смесей. Наблюдается сложное течение (рис. 4) – кривые течения характеризуются наличием участков со снижением напряжения сдвига при увеличении скорости сдвига.

На представленных на рис. 4 зависимостях видно, что при определенном соотношении минеральной добавки и портландцемента на зависимостях «предельное напряжение сдвига – скорость сдвига» можно выделить несколько участков зависимости $\tau = f(\dot{\gamma})$, различающихся как по интенсивности изменения (табл. 4), так и по направлению (нисходящий участок на кривой течения) в диапазоне $0,5 < \dot{\gamma} < 0,8$ 1/с. Отметим, снижением напряжения сдвига при увеличении скорости сдвига на зависимостях $\tau = f(\dot{\gamma})$ описываются как пластифицированные цементные пасты контрольного состава (без минеральной добавки), так и составы с комплексом «пластификатор – минеральная добавка».

В табл. 4 представлены эмпирические коэффициенты математических моделей исследуемой зависимости, разбитой на четыре участка, аппроксимированных с помощью уравнения Оствальда – Вейля.

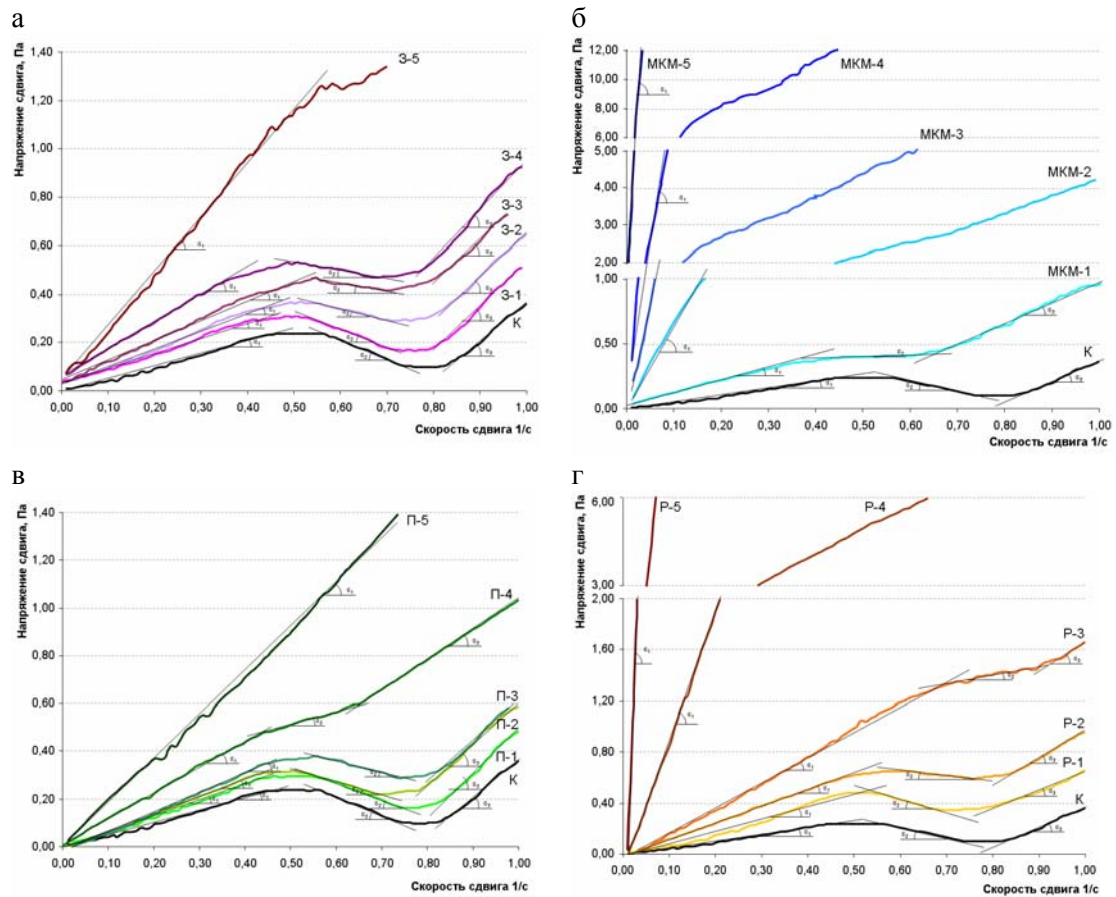


Рис. 4. Кривые течения $\tau(\dot{\gamma})$ пластифицированных цементно-минеральных смесей на: золе-уносе (а), микрокремнеземе (б), муке из кварцевого песка (в) и ракушечнике (г) (обозначения в соответствии с табл. 1)

Т а б л и ц а 4

Характеристики участков зависимости $\tau = f(\dot{\gamma})$

№ п/п	Состав	Участок 1		Участок 2		Участок 3		Участок 4	
		k_1	n_1	k_2	n_2	k_3	n_3	k_3	n_3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	К	0,48	0,99	0,05	-2,91	0,41	6,83	-9,39	9,75
2	МКМ-1	0,71	0,72	0,38	-0,06	0,76	1,06	-7,75	8,69
3	МКМ-2	4,08	0,87	-	-	-	-	-	-
4	МКМ-3	6,85	0,62	-	-	-	-	-	-
5	МКМ-4	20,01	0,61	-	-	-	-	-	-
6	МКМ-5	75,31	0,41	-	-	-	-	-	-
7	П-1	0,61	0,98	0,09	-2,14	0,51	5,06	-9,33	9,82
8	П-2	0,65	0,97	0,14	-1,29	0,62	3,68	-9,26	9,87
9	П-3	0,70	0,98	0,21	-1,10	0,64	3,67	-9,28	9,88
10	П-4	0,98	0,94	-	-	-	-	-	-
11	П-5	1,87	1,04	-	-	-	-	-	-
12	Р-1	0,94	0,98	0,21	-1,38	0,64	2,41	-9,24	9,89
13	Р-2	1,17	0,95	0,53	-0,42	0,96	2,25	-9,09	10,05
14	Р-3	1,71	0,89	-	-	-	-	-	-
15	Р-4	8,91	0,96	-	-	-	-	-	-
16	Р-5	20825	2,85	-	-	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
17	3-1	0,56	0,78	0,10	-1,77	0,52	4,49	-9,30	9,84
18	3-2	0,65	0,81	0,22	-0,82	0,54	2,27	-9,24	9,89
19	3-3	0,79	0,81	0,63	-0,40	0,62	1,23	-9,17	9,97
20	3-4	0,91	0,71	0,41	-0,39	0,71	1,18	-9,09	10,05
21	3-5	1,94	0,83	-	-	-	-	-	-

Анализ полученных зависимостей $\tau = k\dot{\gamma}^n$ показывает, что на участке 1 ($\dot{\gamma} < 0,5$ 1/с) смеси описываются, как правило, псевдопластическим характером течения ($n < 1$). Лишь при достижении высоких степеней наполнения минеральной добавкой интенсивность изменения напряжения сдвига увеличивается, что отражается в величине n (составы П-5, Р-5), превышающей $n = 1$.

Особенностью участка 2 ($0,5 < \dot{\gamma} < 0,8$ 1/с) является нисходящее направление изменения $\tau(\dot{\gamma})$ при определенной степени наполнения для каждой из смеси с минеральной добавкой. Отметим, что коэффициент n для этого участка имеет отрицательное значение, показывающее направление изменения напряжения сдвига. При увеличении степени наполнения n изменяется от значений меньше -1 до значений, лежащих в диапазоне от -1 до 0. Это может свидетельствовать об изменении характера течения. Поэтому течение такого участка с растущей интенсивностью, для которого $n < 0$ и $|n| > 1$, будем называть **адилатантным**, а с затухающей интенсивностью при $n < 0$ и $|n| < 1$ – **апсевдопластическим**. Так, в указанном диапазоне скоростей сдвига составы с комплексами «пластификатор – минеральная добавка» описываются адилатантным течением, сменяющимся апсевдопластическим при увеличении степени наполнения.

В [18] перечислено множество концепций, принятых для объяснения реологического поведения дисперсных систем. Концепция диссипации энергии вязкого трения на отдельных частицах и агрегатах, представленных в виде модельных цилиндров или сфер, предлагает для описания сложных кривых течения уравнения Эйнштейна, Куна и Кэссона. Как эти модели, так и обобщенное уравнение течения, сформулированное на основе модели Кэссона, предназначены для описания общего явления – снижение вязкости дисперсных систем при увеличении скорости сдвига и напряжения сдвига. И в большинстве случаев последние из них могут быть использованы с высокой достоверностью. Однако при описании сложного характера течения такие модели позволяют аппроксимировать лишь отдельные (как правило, начальный и конечный) участки кривой. Нисходящий участок кривой $\tau(\dot{\gamma})$ называется переходным (аномальным) и не анализируется, хотя отчетливо идентифицируется и описывается как сдвиговое расслоение или срыв течения. Отсюда следует, что для описания сложного течения дисперсных систем необходимо построение структурной модели, учитывающей не только изменение конфигурации частиц, но и изменение силовых эффектов.

В диапазоне скорости сдвига $0,8 < \dot{\gamma} < 0,95$ 1/с наблюдается интенсивное приращение напряжения сдвига, отличающее участок 3 дилатантным характером течения ($n > 1$), который при увеличении скорости сдвига более 0,95 1/с сменяется псевдопластическим (участок 4).

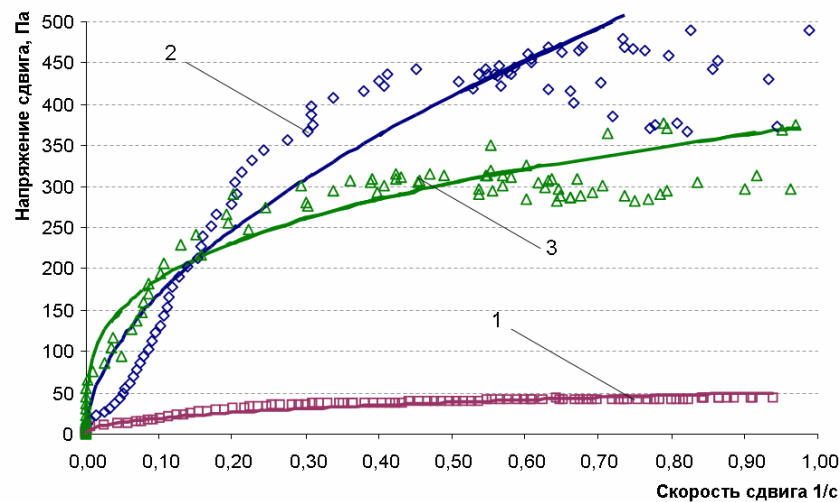
Таким образом, исследуемые составы при аппроксимации кривых течения с помощью модели Оствальда – Вейля описываются сменой характера течения при увеличении сдвиговой нагрузки с переходным аномальным участком, выраженность которого зависит от структурных особенностей смеси. То есть при достижении $\dot{\gamma} < 0,5$ 1/с происходит некое преобразование структуры смеси, вызванное изменением особенностей взаимодействия частиц дисперсной фазы и их агломератов.

Описанный характер изменения напряжения сдвига от скорости сдвига наблюдается для смесей с каждой из исследуемых минеральных добавок и зависит от степени наполнения. Так, в составах с микрокремнеземом аномалии отмечаются лишь при незначительном соотношении Д/Ц = 0,06. Для остальных составов отсутствие

аномалий наблюдается при больших концентрациях: для золы-уноса при $D/C = 0,3$, для муки ракушечника и кварцевой муки – $D/C = 0,41$. При этом суммарная площадь поверхности сухих компонентов составляет $49,48 \cdot 10^6 \text{ м}^2$ для смесей с микрокремнеземом, для составов с золой-уносом – $S_f < 45,91 \cdot 10^6 \text{ м}^2$; с кварцевым песком – более $43,14 \cdot 10^6 \text{ м}^2$, а с ракушечником и для составов без минеральной добавки (К) – $44,43 \cdot 10^6 \text{ м}^2$. Предельная толщина водной прослойки (см. табл. 3) для цементных паст с каждой из минеральной добавок, когда такой участок наблюдается, составляет близкие значения в диапазоне $10,28 \dots 10,87 \text{ мкм}$.

На рис. 5,а показано, что наличие пластификатора в смеси является важным условием проявления аномалий течения. Составы с пластификатором характеризуются наличием такого участка на кривой течения (рис. 5,б) как при варьировании В/Ц-отношения, так и при введении минеральной добавки. То есть очевидный эффект от применения пластификатора отражается в изменении напряжения сдвига на порядки, а аномалии идентифицируются на каждом из составов с различным В/Ц или в присутствии минеральных добавок. При этом можно отметить, что общая тенденция для пластифицированных цементных паст заключается в проявлении аномального характера слабоструктурированных подвижных систем ($\tau < 1 \text{ Па}$) (рис. 5).

а



б

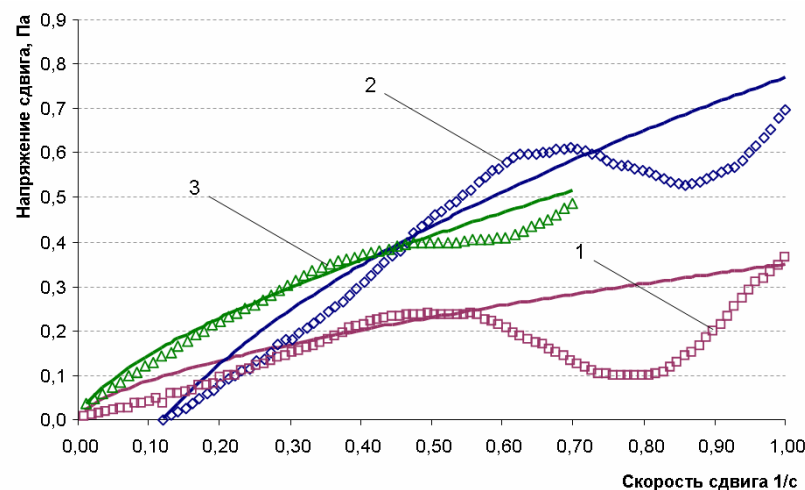


Рис. 5. Зависимость предельного напряжения сдвига от скорости сдвига для составов без пластификатора (а) и с пластификатором (б):
1 – цементная паста с В/Ц=0,4; 2 – цементная паста с В/Ц=0,3;
3 – цементно-минеральная паста с микрокремнеземом при $D/C=0,6$ и В/Ц=0,4

Сложный характер течения пластифицированных поликарбоксилатами цементно-минеральных смесей отмечался в [16, 17] для тиксотропных смесей. Характерная особенность – нелинейность зависимости $\tau(\dot{\gamma})$ в областях напряжения сдвига, где не наблюдается разрушения структуры. Это связывается с хрупкостью структурного каркаса и называется сверханомалией. Для дисперсных систем II типа (твердая фаза – жидкая среда) проявление аномалии объясняется возникновением «локального разрыва сплошности». То есть сдвиг распространяется в тонких слоях при сохранении неразрушенной структуры в объеме. Однако общей структурной модели, позволяющей описывать особенности течения систем с реологической аномалией, не существует. Поэтому установление такой модели и ее интерпретация является перспективной задачей для управления реологическими свойствами смесей и повышения эффективности пластификаторов для цементных систем.

Заключение и выводы

Установлено, что цементные пасты, в том числе с минеральными добавками, пластифицированные поликарбоксилатным пластификатором, характеризуются сложным характером течения. На кривых течения слабоструктурированных подвижных систем в диапазоне $0,5 < \dot{\gamma} < 0,8$ 1/с наблюдается нисходящий участок напряжения сдвига при увеличении скорости сдвига. Ключевым фактором в проявлении аномального участка в исследуемых цементно-минеральных дисперсных системах является наличие пластификатора. Предельная толщина водной прослойки для цементных паст с минеральной добавкой, когда идентифицируются аномальные участки, составляет 10,28...10,87 мкм. Этот показатель можно использовать для характеристики структуры цементно-минеральных композиций, течение которых может иметь выявленную аномалию.

Список литературы

1. Пустовгар, А.П. Особенности применения гиперпластификаторов в сухих строительных смесях / А.П. Пустовгар, А.Ф. Бурьянов, П.Г. Василик // Строительные материалы. – 2010. – № 12. – С. 62–65.
2. Баженов, Ю.М. Высококачественные самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов сжигания угля / Ю.М. Баженов, В.В. Воронин, Л.А. Алимов, А.М. Бахрах, О.А. Ларсен, В.Н. Соловьев, Д.В.К. Нгуен // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12, № 12 (111). – С. 1385–1391.
3. Пустовгар, А.П. Модифицирующие добавки для сухих строительных смесей / А.П. Пустовгар // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2002. – № 4 (520). – С. 8.
4. Бузулуков, В.И. Портландцемент, модифицированный активными минеральными добавками на основе диатомита / В.И. Бузулуков, В.Т. Ерофеев, А.И. Емельянов, Д.В. Черкасов, О.В. Тараканов // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 4. – С. 5–9.
5. Ермилова, Е.Ю. Композиционный портландцемент с гибридной минеральной добавкой на основе метакаолина и известняка / Е.Ю. Ермилова, З.А. Камалова, Р.З. Рахимов, О.В. Стоянов // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 8. – С. 98–101.
6. Коровкин, М.О. Исследование эффективности различных способов введения суперпластификатора в цемент с инертной минеральной добавкой / М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2016. – № 5. – С. 198–206.
7. Федюк, Р.С. Самоуплотняющийся бетон с использованием предварительно подготовленной золы рисовой шелухи / Р.С. Федюк, В.С. Лесовик, А.П. Свинцов, А.В. Мочалов, С.В. Куличков, Н.Ю. Стоюшко, Н.А. Гладкова, Р.А. Тимохин // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – № 3 (79). – С. 66–76.

8. Логанина, В.И. Сухие строительные смеси с применением низкообжиговых минеральных добавок / В.И. Логанина, Р.В. Тарасов, Э.Р. Акжигитова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 33 (52). – С. 78–83.
9. Тараканов, О.В. Применение комплекса минеральных добавок в составе органо-минеральных модификаторов бетона / О.В. Тараканов, Е.О. Тараканова // СтройПРОФИль. – 2009. – № 8 (78). – URL: <http://stroyprofile.com/archive/3810>.
10. Калашников, В.И. Через рациональную реологию – в будущее бетонов. 1. Тонкодисперсные реологические матрицы и порошковые бетоны нового поколения / В.И. Калашников // Технологии бетонов. – 2007. – № 5. – С. 8–10.
11. Калашников, В.И. Через рациональную реологию – в будущее бетонов. 2. Виды реологических матриц в бетонной смеси, стратегия повышения прочности бетона нового поколения / В.И. Калашников // Технологии бетонов. – 2007. – № 6. – С. 8–11.
12. Калашников, В.И. Через рациональную реологию – в будущее бетонов. 3. От высокопрочных и особовысокопрочных бетонов будущего к суперпластифицированным бетонам общего назначения настоящего / В.И. Калашников // Технологии бетонов. – 2008. – № 1. – С. 22–26.
13. Леснов, В.В. Реологические и структурные свойства наполненных матричных цементных композиций, предназначенных для каркасных композитов / В.В. Леснов, В.Т. Ерофеев // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 4. – С. 12–19.
14. Inozemtcev, A.S. Selection of mineral additives for high-performance concrete / A.S. Inozemtcev, E.V. Korolev, T.Q. Duong // Science Journal of Architecture & Construction. – 2017. – № 28. – P. 7–9.
15. Inozemtcev, A.S. Study of mineral additives for cement materials for 3D-printing in construction / A.S. Inozemtcev, E.V. Korolev, T.Q. Duong // IOP conf. Series: materials science and engineering. – 2018. – Vol. 365. – 032009. – Doi:10.1088/1757-899x/365/3/032009.
16. Пивинский, Ю.Е. Реология дилатантных и тиксотропных дисперсных систем / Ю.Е. Пивинский. – СПб.: РИО СПбГТИ (ТУ), 2001. – 174 с.
17. Урьев, Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов / Н.Б. Урьев. – М.: Химия, 1988. – 256 с.
18. Кирсанов, Е.А. Неньютоновское течение дисперсных, полимерных и жидкокристаллических систем. Структурный подход / Е.А. Кирсанов, В.Н. Матвеев. – М.: Техносфера. 2016. – 379 с.

References

1. Pustovgar, A.P. Features of the use of hyperplasticizers in dry building mixtures / A.P. Pustovgar, A.F. Buryanov, P.G. Vasilik // Building materials. – 2010. – № 12. – P. 62–65.
2. Bazhenov, Yu.M. High-quality self-compacting concretes using coal waste / Yu.M. Bazhenov, V.V. Voronin, L.A. Alimov, A.M. Bakhrakh, O.A. Larsen, V.N. Soloviev, D.V.K. Nguyen // Vestnik MGSU. – 2017. – Vol. 12, № 12 (111). – P. 1385–1391.
3. Pustovgar, A.P. Modifying additives for dry building mixes / A.P. Pustovgar // Proceedings of higher educational institutions. Building. – 2002. – № 4 (520). – P. 8.
4. Buzulukov, V.I. Portland cement modified by active mineral additives based on diatomite / V.I. Buzulukov, V.T. Erofeev, A.I. Yemelyanov, D.V. Cherkasov, O.V. Tarakanov // Regional architecture and engineering. – 2014. – № 4. – P. 5–9.
5. Ermilova, E.Yu. Composite Portland cement with a hybrid mineral additive based on metakaolin and limestone / E.Yu. Ermilova, Z.A. Kamalova, R.Z. Rakhimov, O.V. Stoyanov // Bulletin of the Technological University. – 2015. – Vol. 18, № 8. – P. 98–101.
6. Korovkin, M.O. Study of the effectiveness of various ways of introducing superplasticizer in cement with an inert mineral additive / M.O. Korovkin, N.A. Eroshkina // Education and science in the modern world. Innovation. – 2016. – № 5. – P. 198–206.

7. Fedyuk, R.S. Self-compacting concrete using pre-prepared rice husk ash / R.S. Fedyuk, V.S. Lesovik, A.P. Svintsov, A.V. Mochalov, S.V. Kulichkov, N.Yu. Stoyushko, N.A. Gladkova, R.A. Timokhin // *Engineering and Construction Journal*. – 2018. – № 3 (79). – P. 66–76.
8. Loganina, V.I. Dry building mixtures with the use of low-burning mineral additives / V.I. Loganina, R.V. Tarasov, E.R. Akzhigitova // *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and Architecture*. – 2013. – № 33 (52). – P. 78–83.
9. Tarakanov, O.V. The use of a complex of mineral additives in the composition of organic concrete modifiers / O.V. Tarakanov, E.O. Tarakanova // *StroyPROFIL*. – 2009. – № 8 (78). – URL: <http://stroyprofile.com/archive/3810>.
10. Kalashnikov, V.I. Through rational rheology into the future of concrete. 1. Finely dispersed rheological matrices and powder concretes of a new generation / V.I. Kalashnikov // *Concrete technology*. – 2007. – № 5. – P. 8–10.
11. Kalashnikov, V.I. Through rational rheology into the future of concrete. 2. Types of rheological matrices in concrete mix, a strategy to increase the strength of concrete of a new generation / V.I. Kalashnikov // *Concrete technology*. – 2007. – № 6. – P. 8–11.
12. Kalashnikov, V.I. Through rational rheology into the future of concrete. 3. From high-strength and extremely high-strength concrete of the future to superplasticized general purpose concrete of the present / V.I. Kalashnikov // *Concrete technology*. – 2008. – № 1. – P. 22–26.
13. Lesnov, V.V. Rheological and structural properties of filled matrix cement compositions intended for frame composites / V.V. Lesnov, V.T. Erofeev // *Regional architecture and construction*. – 2018. – № 4. – P. 12–19.
14. Inozemtcev, A.S. Selection of mineral additives for high-performance concrete / A.S. Inozemtcev, E.V. Korolev, T.Q. Duong // *Science Journal of Architecture & Construction*. – 2017. – № 28. – P. 7–9.
15. Inozemtcev, A.S. Study of mineral additives for cement materials for 3D-printing in construction / A.S. Inozemtcev, E.V. Korolev, T.Q. Duong // *IOP conf. Series: materials science and engineering*. – 2018. – Vol. 365. – 032009. – Doi:10.1088/1757-899x/365/3/032009.
16. Pivinsky, Yu.E. Rheology of dilatant and thixotropic disperse systems / Yu.E. Pivinsky. – SPb.: RIO SPbSTI (TU), 2001. – 174 p.
17. Uryev, N.B. Physical and chemical bases of the technology of dispersed systems and materials / N.B. Uryev. – M.: Chemistry, 1988. – 256 p.
18. Kirsanov, E.A. Non-Newtonian flow of dispersed, polymeric and liquid crystal systems. Structural approach / E.A. Kirsanov, V.N. Matveenko. – M.: Technosphere, 2016. – 379 p.

УДК 691:519.7

*Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева*Россия, 430006, г. Саранск,
ул. Большевистская, д. 68,
тел.: (8342)47-71-56; факс: (8342)47-71-56**Селяев Владимир Павлович,**
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Строительные
конструкции», академик РААСН
E-mail: ntorm80@mail.ru**Селяев Павел Владимирович,**
кандидат технических наук, доцент
E-mail: ntorm80@mail.ru**Кечуткина Евгения Львовна,**
инженер кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: kechytkina85@mail.ru*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77**Данилов Александр Максимович,**
доктор технических наук, профессор,
советник РААСН, зав. кафедрой
«Математика и математическое
моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru**Гарькина Ирина Александровна,**
доктор технических наук, профессор
кафедры «Математика и математическое
моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru*Ogarev Mordovia State University*Russia, 430006, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.,
tel.: +7(8342)47-71-56; fax: +7(8342)47-71-56**Selyaev Vladimir Pavlovich,**
Doctor of Science, Professor, Head of the
department «Building designs», Academician
of the Russian Academy of Architectural and
Construction Sciences
E-mail: ntorm80@mail.ru**Selyaev Pavel Vladimirovich,**
Candidate of Sciences, Associate Professor
E-mail: ntorm80@mail.ru**Kechytkina Evgenya Lvovna,**
Engineer of the department «Building
structures»
E-mail: kechytkina85@mail.ru*Penza State University of Architecture
and Construction*Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77**Danilov Alexander Maksimovich,**
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the
Russian Academy of Architectural and
Construction Sciences, Head of the department
«Mathematics and Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru**Garkina Irina Aleksandrovna,**
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Mathematics
and Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КАК СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

В.П. Селяев, П.В. Селяев, Е.Л. Кечуткина, А.М. Данилов, И.А. Гарькина

Представляются подходы к идентификации и управлению свойствами композиционных материалов как сложных систем. Указываются возможности их приложения к оценке долговечности на примере цементных композитов.

Ключевые слова: композиты, сложные системы, идентификация, управление свойствами, приложения

PROPERTY CONTROL OF COMPOSITE MATERIALS AS COMPLEX SYSTEMS

V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, E.L. Kechytkina, A.M. Danilov, I.A. Garkina

Approaches to the identification and management of the properties of composite materials as complex systems are presented. The possibilities of their application to the assessment of durability on the example of cement composites are indicated.

Keywords: composites, complex systems, identification, property management, applications

Сложная система определяется как составной объект, части которого можно рассматривать как системы, закономерно объединённые в единое целое в соответствии с определенными принципами или связанные между собой заданными отношениями [1...5]. Ее можно (не обязательно единственным образом) расчленить на конечное число частей (подсистем). Каждую подсистему (высшего уровня) можно, в свою очередь, расчленить на конечное число более мелких подсистем и т. д., вплоть до получения подсистем первого уровня (элементов; объективно не подлежат расчленению на части, либо относительно их дальнейшей неделимости имеется соответствующая договорённость). Свойства каждого из элементов в общем случае зависят от условий, определяемых поведением других элементов. Свойства же сложной системы в целом определяются не только свойствами элементов, но и характером взаимодействия между ними. Важно отметить, что две системы с попарно одинаковыми элементами, но с различными взаимодействиями между ними должны рассматриваться как две разные системы. Как оказалось, строительные материалы, в том числе специальные назначения, также целесообразней рассматривать с позиций теории сложных систем. Так, в частности, на основе когнитивного моделирования материалов с учетом иерархической структуры критериев качества разрабатывалась иерархическая структура радиационно-защитных материалов [1, 6, 7].

Принцип моделируемости сложной системы («...сложная система представима конечным множеством моделей, отражающих определенную грань ее сущности») дает возможность исследовать определенное свойство или группу свойств сложной системы с помощью одной или нескольких упрощенных (узкоориентированных) моделей. Выявление новых свойств и сущностей необязательно должно сопровождаться построением обобщающих моделей; может ограничиваться наращиванием множества упрощенных моделей. *Отражение сложной системы в целом обеспечивается взаимодействием упрощенных моделей.* Модель, ориентированная на определенную группу свойств сложной системы, всегда проще самой системы. *Создание же полной модели практически невозможно, ибо она будет столь же сложной, как и сама система.*

Принцип целенаправленности позволяет сопоставить сложной системе любого содержания множество частных критериев, а часто и некоторый функционал (глобальный критерий), описывающий ее существование как целого.

В соответствии с *принципом физичности* всякой системе независимо от ее природы присущи физические законы, возможно уникальные, *определяющие внутренние причинно-следственные связи, существование и функционирование*; никаких других законов для описания действия системы не требуется.

На первый взгляд принцип моделируемости выглядит противоречащим постулату целостности, а принципы физичности и целенаправленности могут показаться несовместимыми. Однако это не так. Законы физики известны достаточно хорошо – по крайней мере в части, непосредственно связанной с человеческими потребностями; кроме того, они формализованы (искусственные системы действуют в соответствии с закономерностями, наделенными их создателем). *В системе все взаимосвязано, но это не мешает ее рассмотрению с различных точек зрения.*

Специальные методы идентификации и обработки экспериментальных данных позволяют оценивать неизвестные параметры посредством сравнения значений функциональных и структурных характеристик сложных систем, устанавливаемых экспериментально и в результате моделирования. Как показывает опыт, в том числе наш собственный, *при системном подходе имеется возможность на основе определения поправок к первоначальным значениям параметров добиваться достаточной точности оценки неизвестных параметров методом последовательных приближений* [8...10]. Не потеряло актуальности существенное развитие аналитических методов исследования, основанных на теории случайных процессов.

С системных позиций можно рассматривать и вопросы *долговечности* материалов ([11...14]; разрушение системы – катастрофа, связанная с нарушением гомеостаза). Способность к катастрофе – фамильное свойство сложных систем. Устранить это

свойство невозможно, оно присуще природе сложной системы. Можно считать, что сложные системы всегда работают как поврежденные. Система продолжает функционировать за счет множества дополнительных средств обеспечения устойчивости. Ее работа – непрерывно меняющееся сочетание сбоев и восстановлений компонентов. Когда происходят заметные глобальные сбои и несколько мелких по отдельности безобидных сбоев объединяются, создается возможность глобальной системной аварии. Каждый из этих сбоев провоцирует аварию, но только вместе они приводят к результату. Иными словами, возможностей для возникновения системных аварий гораздо больше, чем проявившихся аварий. Большая часть этих возможностей блокируется специалистами на ранней стадии развития созданными для этого средствами защиты. *Системная авария происходит как следствие сочетания множества ошибок.* Однако не существует единственной причины аварии и часто невозможно определить ее корневую причину. *Ретроспективный анализ катастроф, в особенности при экспертной оценке, является необъективным* (техническое недопонимание природы сбоя позволяет с легкостью найти виновного катастрофы). Случившиеся сбои выглядят единственно возможным следствием прошлых событий. *Действия специалистов воспринимаются как ошибки. На самом деле действия специалистов – попытки угадать будущее неопределенное событие.* Успешная работа системы есть также результат угадывания, хотя это и не является очевидным и общепринятым. Как показывает опыт, в том числе наш собственный, *при системном подходе имеется возможность на основе определения поправок к первоначальным значениям параметров добиваться достаточной точности оценки неизвестных параметров.*

При оценке долговечности композитов как сложных систем предполагается, что структурные элементы формируются из элементарных частиц, которые под действием внешних факторов объединяются в молекулы, кластеры, глобулы и фибриллы; появляются ассоциативные кластеры и более сложные упорядоченные упаковки структурных элементов (кубические, гексагональные, октаэдрические и др.; [15]). С изменением энергетического состояния сложных систем изменяются и формы структурообразования.

На смену гипотезе о сплошной среде, представляющей в классической механике деформируемое твердое тело, сформировались и представления о дискретном строении среды. По Бенуа Мандельброту, многие формы природы настолько неправильны и фрагментированы, что в сравнении с евклидовыми объектами природа демонстрирует не просто более высокую степень, но совершенно иной уровень сложности (частное подобно целому; соблюдается принцип масштабной инвариантности; на каждом масштабном уровне формируются структуры, которые можно считать подобными структурам на смежных уровнях материала; [16]).

Квантово-механический подход к описанию процесса разрушения твердого тела основан на гипотезах о дискретном строении вещества (твердое тело представляется в виде совокупности элементарных осцилляторов); *о дискретном характере выделения и поглощения энергии* (энергия выделяется и поглощается элементарными порциями – квантами; разрушение одного структурного элемента не приводит к разрушению всей системы, но переводит ее в новое энергетическое состояние; [17]). *Разрушение рассматривается как процесс, протекающий на масштабных уровнях (интегральное проявление одновременного протекания процессов с учетом энергии активации, критического уровня напряжений; времени релаксации).*

В классической теории сопротивления материалов предел прочности рассматривается как предельное напряжение, соответствующее началу прогрессирующего разрушения материала и рассчитывается на основании данных об атомных связях в кристаллических решетках; зависит от вида и количества дефектов в его структуре (в металлах – дислокации, искажения атомно-кристаллических пространственных решеток; в композитах – поры, неоднородности, включения). В материаловедении традиционно используются два основных направления повышения прочности:

– устранение или уменьшение числа дислокаций, создание металлов с правильным атомно-кристаллическим строением;

– увеличение числа неоднородностей, создание демпферов для поглощения энергии разрушения.

Разрушение твердого тела, исходя из принципов анализа сложных систем, рассматривается не как критическое событие предельного состояния системы, а как процесс на разных масштабных уровнях. Процесс разрушения твердых тел начинается с момента энергетического воздействия (силового, температурного, химического, радиационного и др.). На первом этапе в структуре материала накапливаются пластические разрыхления, формируются мельчайшие трещины и другие дефекты структуры (микро-несплошности); на втором этапе возможно образование новых трещин, их торможение, залечивание, формирование магистральной трещины; дальнейшее разрушение структурных элементов (фракталов) сопровождается ростом магистральной трещины до критических размеров; наконец, прогрессирующее развитие трещины приводит к разрушению твердого тела [18]. Энергетическое воздействие на твердое тело сопровождается эволюцией структуры материала, представленной дискретными элементами (фракталами) и дефектами. На каждом этапе нагружения разрушение происходит на определенном масштабном уровне. По [19], разрушение начинается на микроуровне масштабном уровне (кинетически-флуктуационный подход описания). В результате микроразрушений происходит разрыхление, разупрочнение материала и создаются предпосылки для роста технологических (врожденных) трещин (выделение и поглощение энергии отдельными порциями (квантами); дискретные разрушения отдельных или ассоциативных фракталов. Это обусловлено тем, что на пути развития микротрещин встречаются дефекты структуры или другие демпфирующие элементы, которые останавливают развитие трещин до тех пор, пока не накопится новая порция энергии разрушения. На этом этапе эволюции структуры действуют законы энтропийной кинетики; заканчивается формированием магистральной трещины, развитие которой описывается кинетическими законами механики разрушения твердых тел [16, 18].

В качестве иллюстрации рассмотрим приложение принципов анализа сложных фрактальных систем к решению задач *прогнозирования прочности цементных композитов* [15... 20]. Твердое тело здесь рассматривается в виде сложной масштабно-инвариантной системы, иерархия строения которой предполагает выполнение принципа самоподобия на любом масштабном уровне структуры композита.

Количественной мерой порядка фрактальных структур предполагается фрактальная размерность (для структурных элементов композитов имеет одинаковое дробное значение на любом масштабном уровне; для цементных композитов определяли по формуле Мандельброта – Ричардсона).

Справедливо:

$$L(\delta) = \alpha \delta^{d-d_m}, \quad (1)$$

где d_m – фрактальная размерность; d – Евклидова размерность; α – множитель, равный половине длины ℓ_0 трещины.

Фрактальная размерность порового пространства и других неоднородностей композитов близка к 1,5; линейный размер дефекта структуры (трещины, поры) на масштабном уровне δ определяется в виде

$$L(\delta) = \alpha \delta^{d-d_m} = l_0 \delta^{d-d_m} l_0 \delta^{-0,5}. \quad (2)$$

Фрактальная модель цементного композита представляется сложной системой, состоящей из плоских структурных элементов, каждый из которых содержит дефект в виде трещины длиной $L(\delta)$ (рис. 1).

Модель построена с учетом условий: в цементном композите в процессе изготовления формируется множество врожденных (технологических) трещин; для системы выполняются условия масштабной инвариантности и самоподобия (линейный

размер трещины на каждом масштабном уровне определяется по (2)); ориентация трещин в пространстве – случайная; прочность цементных композитов на различных масштабных уровнях зависит от размеров трещин.

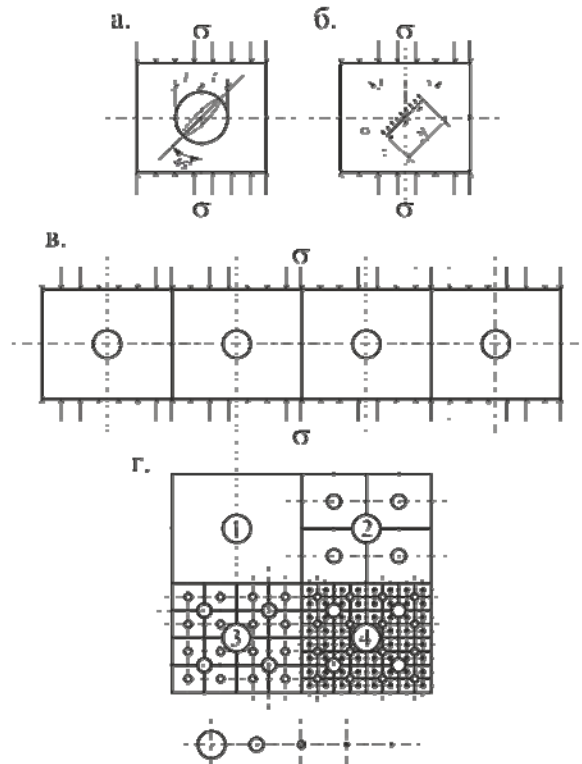


Рис. 1. Фрактальная модель структуры бетона:
а – первичный фрактал; б – расчетная модель фрактала; в – цепочный фрактал;
г – плоский фрактал; 1...5, – уровни структуры

По модели Гриффитса прочность при растяжении первичного фрактала (структурного элемента)

$$R_{Gt} = \sqrt{\frac{4\gamma E}{\pi \ell_0}} \cdot \delta^{(d-dm)0,5} = \frac{k_1 \delta^{0,5(d-dm)}}{\sqrt{\pi \ell_0}}. \quad (3)$$

По предыдущему прочность при сжатии R_G цементного композита с учетом условия прочности Кулона – Навье определится в виде [16]

$$R_G = \frac{4k_2 \delta^{0,5(d-dm)}}{\sqrt{\pi \ell_0} (1-\beta)}, \quad (4)$$

k_1, k_2 – коэффициенты интенсивности напряжений при растяжении и сдвиге; β – коэффициент трения.

Прочность цементных композитов на различных масштабных уровнях структуры описывается с учетом (1), (3), (4) в виде

$$R_G(\delta) = R_{Gu} \alpha_n \delta^{0,5(d-dm)}, \quad (5)$$

R_{Gu} – прочность структурного элемента, эталонного образца конкретных размеров δ ;
 α_n – коэффициент приведения, подобия.

Если структурный элемент представлен кубиком с размером ребра $\delta = 15$ см, то при $d = 1, d_m = 1,5$

$$\frac{R_G(15)}{R_{Gu}} = \alpha_n \delta^{-0,25} = 1. \quad (6)$$

Так как $\delta = 15$ см, то $\alpha_n = 1,97$. Тогда изменение прочности с учетом масштабной инвариантности будет описываться соотношением

$$R_G(\delta) = R_G(15) \cdot 1,97 \cdot \delta^{-0,25}. \quad (7)$$

Результаты вычислений по (7) приведены в таблице и на рис. 2.

Значения $R_{Gi\alpha} / R_{Gio}$ в зависимости от размера ребра (масштабного фактора α)

№ п/п	$R_{Gi\alpha} / R_{Gio}$	Численные значения							
1	α_i, m	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$
2	$1,97 \alpha_i^{-0,25};$ $\alpha_0 = 15$	11,1	6,23	3,5	1,97	1,1	1,0	0,93	0,788
3	$0,58 + 0,42 \left(\frac{v_0}{v} \right)^{1/B}$	-	-	42,58	4,78	1,0	0,86	0,79*	0,685
4	$\alpha_i, \text{см}$	0,001	0,01	0,1	1,0	10	15	20	40
5	$1,75 \alpha_i^{-0,25};$ $\alpha_0 = 10$	10,0	5,6	3,16	1,77	1,0	0,89	0,84	0,7

На рис. 2 приведены зависимости прочности от размеров образцов, полученные по формулам В.В. Болотина – кривая 1 и по формуле (7) – кривая 2.

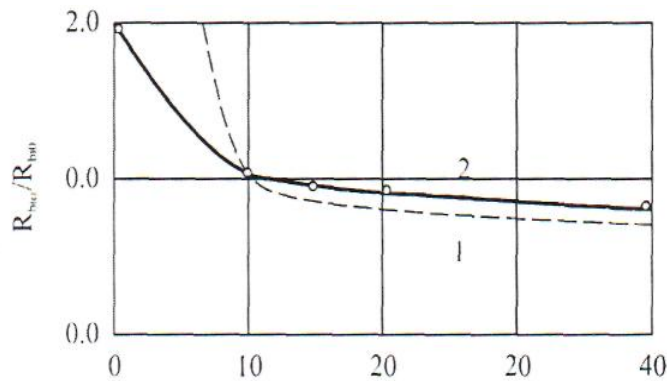


Рис. 2. Зависимость прочности от размера куба

Если фрактальная размерность $d_m = d = 1$, что соответствует однородной бездефектной структуре, линейные размеры которой описываются евклидовой геометрией, то прочность образцов не зависит от размеров; масштабный эффект отсутствует.

Список литературы

1. Danilov, A. Methodological principles of the development and quality control of special-purpose building materials / A.Danilov, E.Korolev, A.Proshin, O.Figovsky, A.Bormotov, I.Garkina. // Scientific Israel – Technological Advantages. – 2002. – № 3 «Civil Engineering». – Vol. 4. – P. 36–42.

2. Garkina, I.A. Materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Selyaev // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2016. – 11(11). – P. 2461–2464.
3. Garkina, I.A. Principles of optimal control in the synthesis of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Selyaev // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol.723. – P. 32–36.
4. Budylna, E. Control of multiobjective complex systems / E. Budylna, A. Danilov, I. Garkina // *Contemporary Engineering Sciences*. – 2015. – №8(9–12). – P. 441–445.
5. Garkina, I. Composite Materials: Identification, Control, Synthesis / I. Garkina, A. Danilov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol.471(3). – P.032005.
6. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol.191(1). – P.012006.
7. Garkina, I.A. Tasks of building materials from the viewpoint of control theory / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol.737. – P.578–582.
8. Garkina, I.A. Mathematical Methods of System Analysis in Construction Materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol.245(6). – P.062014.
9. Garkina, I.A. Experience of Development of Epoxy Composites: Appendix of Methods of Rank Correlation / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Key Engineering Materials*. – 2018. – Vol.777. – P. 8–12.
10. Garkina, I.A. Approximation of the Rheological Properties of Composite Materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Key Engineering Materials*. – 2018. – Vol.777. – P. 32–36.
11. Garkina, I.A. Property Modelling and Durability of Composite Materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol.471(3). – P.032004.
12. Селяев, В.П. Возможность применения хлопкового волокна для производства вакуумных изоляционных панелей / В.П. Селяев, А.М. Данилов, П.В. Селяев, Н.Н. Киселев, О.Г. Маштаев, Е.Л. Кечуткина. // *Технология текстильной промышленности*. – 2017. – №1(367). – С.112–118.
13. Данилов, А.М. Приближенные методы аналитического конструирования композиционных материалов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // *Региональная архитектура и строительство*. – 2019. – №1(38). – С.24–29.
14. Гарькина, И.А. Единая концепция системного проектирования сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // *Региональная архитектура и строительство*. – 2019. – №1(38). – С.119–123.
15. Селяев, В.П. Применение модели Бозе – Эйнштейна для анализа временной зависимости прочности композиционных материалов при совместном действии агрессивных сред, температуры и механических напряжений / В.П. Селяев, Л.И. Куприяшкина, О.Ю. Коровина, Е.Л. Кечуткина // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2010. – №8. – С.21–27.
16. Селяев, В.П. Эволюция теории прочности бетонов. От простого к сложному / В.П. Селяев, П.В. Селяев, Е.Л. Кечуткина // *Строительные материалы. Научно-технический и производственный журнал*. – 2016. – №12. – С. 70–78.
17. Селяев, В.П. Физико-химические основы механики разрушения цементных композитов: монография / В.П. Селяев, П.В. Селяев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. – 203 с.
18. Селяев, В.П. Фрактальные модели разрушения бетонов / В.П. Селяев, Л.И. Куприяшкина, В.А. Неверов, П.В. Селяев // *Региональная архитектура и строительство*. – 2015. – №1. – С. 11–23.
19. Селяев, В.П. Прогнозирование долговечности железобетонных изгибаемых элементов методом деградиационных функций / В.П. Селяев, П.В. Селяев, Е.В. Соколин, Е.Л. Кечуткина // *Жилищное строительство*. – 2014. – №12. – С. 8–19.

20. Травуш, В.И. О возможном квантовом характере деформации и разрушения композитов / В.И. Травуш, В.П. Селяев, П.В. Селяев, Е.Л. Кечуткина // Промышленное и гражданское строительство. – 2016 – №9. – С.94–100.

References

1. Danilov, A. Methodological principles of the development and quality control of special-purpose building materials / A.Danilov, E.Korolev, A.Proshin, O.Figovsky, A.Bormotov, I.Garkina. // Scientific Israel – Technological Advantages. – 2002. – № 3 «Civil Engineering». – Vol. 4. – P. 36–42.
2. Garkina, I.A. Materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Selyaev // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – 11(11). – P. 2461–2464.
3. Garkina, I.A. Principles of optimal control in the synthesis of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Selyaev // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol.723. – P. 32–36.
4. Budylna, E. Control of multiobjective complex systems / E. Budylna, A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – №8(9–12). – P. 441–445.
5. Garkina, I. Composite Materials: Identification, Control, Synthesis / I. Garkina, A. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol.471(3). – P.032005.
6. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol.191(1). – P.012006.
7. Garkina, I.A. Tasks of building materials from the viewpoint of control theory / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol.737. – P.578–582.
8. Garkina, I.A. Mathematical Methods of System Analysis in Construction Materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol.245(6). – P.062014.
9. Garkina, I.A. Experience of Development of Epoxy Composites: Appendix of Methods of Rank Correlation / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Key Engineering Materials. – 2018. – Vol.777. – P. 8–12
10. Garkina, I.A. Approximation of the Rheological Properties of Composite Materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Key Engineering Materials. – 2018. – Vol.777. – P. 32–36.
11. Garkina, I.A. Property Modelling and Durability of Composite Materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol.471(3). – P.032004.
12. Selyaev, V.P. Possibility of cotton fibers application for production of vacuum insulating panels / V.P. Selyaev, A.M. Danilov, P.V. Selyaev, N.N. Kisselev, O.G. Mustaev, E.L. Chechetkina. // Technology for the textile industry. – 2017. – №1(367). – P. 112–118.
13. Danilov, A.M. Approximate methods of analytical design of composite materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2019. – №1(38). – P. 24–29.
14. Garkina, I.A. Unified system design concept for complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2019. – №1(38). – P. 119–123.
15. Selyaev, V.P. Application of the Bose – Einstein model to analyze the time dependence of the strength of composite materials under the combined action of aggressive media, temperature and mechanical stresses / V.P. Selyaev, L.I. Kupryashkina, O.Yu. Korovin, E. L. Chechetkina // News of higher educational institutions. Construction. – 2010. – №8. – P. 21–27.
16. Selyaev, V.P. The evolution of the theory of strength of concrete. From simple to complex / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, E.L. Kechutkina // Building materials. Scientific, technical and production journal. – 2016. – №12. – P. 70–78.
17. Selyaev, V.P. Physico-chemical fundamentals of fracture mechanics of cement composites: monograph / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev. – Saransk: Publishing house of Muzzles. UN-TA, 2018. – 203 p.

18. Selyaev, V.P. Fractal models of concrete destruction / V.P. Selyaev, L.I. Kupyashkina, V.A. Neverov, V.P. Selyaev // Regional architecture and engineering. – 2015. – №1. – P. 11–23.
19. Selyaev, V.P. Forecasting of the durability of reinforced concrete bent elements by the method of degradation functions / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, E.V. Sorokin, E.L. Kechutkina // Housing construction. – 2014. – №12. – P. 8–19.
20. Traves, V.I. On the possible quantum nature of deformation and destruction of composites / V.I. Travush, V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, E.L. Kechutkina // Industrial and civil construction. – 2016 – №9. – P. 94–100.

Московский политехнический университет
Россия, 107023, г. Москва,
ул. Б.Семёновская, д. 38

Будылина Евгения Александровна,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Инфокогнитивные
технологии»
E-mail: bud-ea@yandex.ru

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8412) 48-74-77

Гарькина Ирина Александровна,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Математика и математическое
моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Данилов Александр Максимович,
доктор технических наук,
профессор, советник РААСН,
зав. кафедрой «Математика
и математическое моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Moscow Polytechnic University
Russia, 107023, Moscow,
38, B.Semenovskaya St.

Budylna Eugenia Aleksandrovna,
Candidate of Physical and Mathematical
Sciences, Associate Professor of the
department «Infocognitive technologies»
E-mail: bud-ea@yandex.ru

Penza State University of Architecture
and Construction
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Garkina Irina Aleksandrovna,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Mathematics
and Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Danilov Alexander Maksimovich,
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the
Russian Academy of Architectural and
Construction Sciences, Head of the department
«Mathematics and Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОСТИ И ДЕКОМПОЗИЦИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОМПОЗИТОВ

Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов

Рассматриваются теоретические принципы теории систем и их реализация при синтезе композиционных материалов с заданными свойствами и структурой. Избегая противоречий в используемых понятиях на междисциплинарном уровне, указываются математические методы описания алгоритмических процессов, обеспечивающих строгость и логичность доказательств. Особое внимание уделяется постулатам (действий, области неопределенности, дополненности, внешнего дополнения) принципа моделируемости, а также целенаправленности и физичности при моделировании композитов (содержательные эмпирические представления и их эволюция с позиций смены парадигм; синтез композитов как сложных систем). Определяется содержание основных видов анализа и синтеза (структурный, функциональный, информационный, параметрический) композитов как систем. Указываются примеры синтеза ряда композитов, а также их частные и обобщенные показатели, составляющие иерархическую структуру.

Ключевые слова: сложные системы, композиционные материалы, анализ и синтез, моделируемость, целенаправленность, физичность, постулаты, иерархическая структура, синтез, методы и модели, примеры

PRINCIPLES OF SYSTEM AND DECOMPOSITION WHEN DEVELOPING COMPOSITES

E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov

The theoretical principles of the theory of systems and their implementation in the synthesis of composite materials with specified properties and structure are considered. Mathematical methods of describing algorithmic processes that provide rigor and consistency of evidence are indicated, avoiding contradictions in the concepts used at the interdisciplinary level. Special attention is paid to the postulates (actions, areas of uncertainty, complementarity, external addition) of the principle of modeling, and also focus and physicality in modeling composites (meaningful empirical ideas and their evolution from the standpoint of changing paradigms; synthesis of composites as complex

systems). The content of the main types of analysis and synthesis (structural, functional, informational, parametric) of composites as systems is determined. Examples of the synthesis of a number of composites are indicated, as well as their particular and generalized indicators that constitute a hierarchical structure.

Keywords: complex systems, composite materials, analysis and synthesis, simulability, purposefulness, physicality, postulates, hierarchical structure, synthesis, methods and models, examples

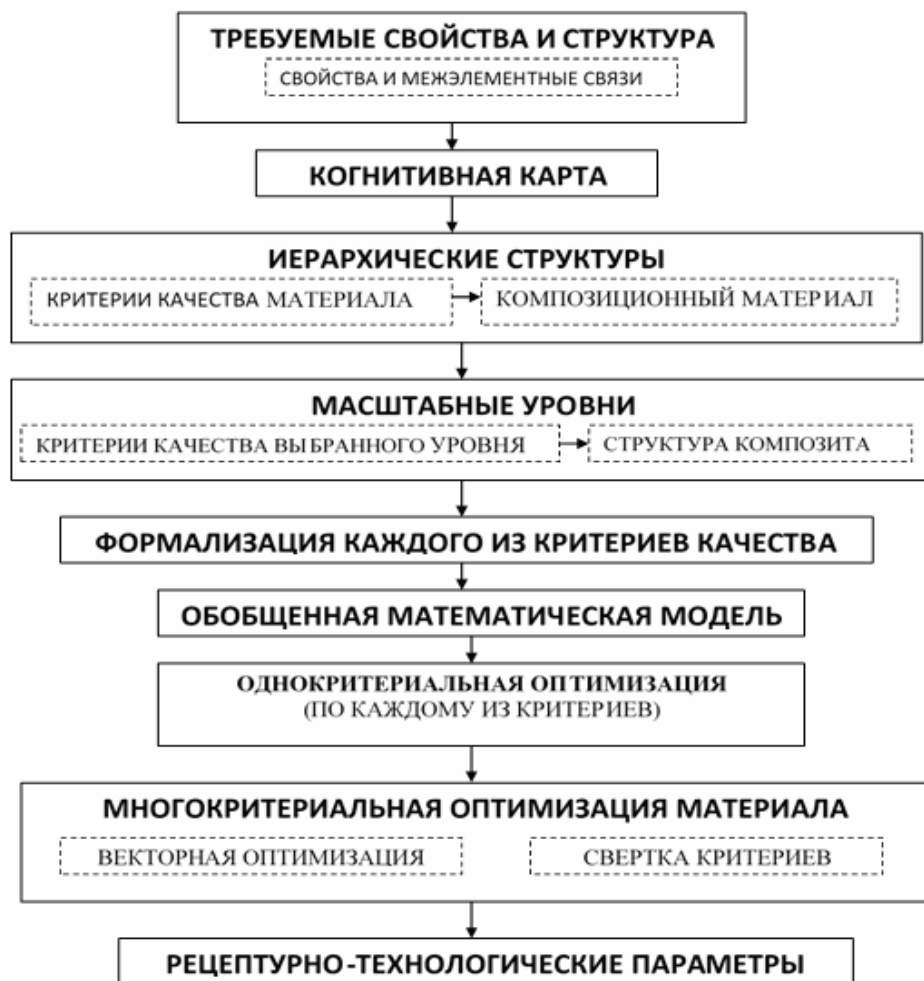
Исследование любой сложной и большой системы начинается с *постановки проблемы* (возникает тогда, когда состояние системы не соответствует условиям ее существования). *Результатами принятия решений* являются: определение цели исследования или системы подцелей, определение критериев их достижения, формулировка и выбор способов решения поставленных задач [1...5]. *Методологической основой принятия любого решения* является функциональная зависимость, связывающая цель решения со средствами ее достижения [6]. Она определяется на основе *закономерностей функционирования системы в определенных условиях*, позволяющих определить концепцию построения теории для разрешения проблемных ситуаций (если теории нет, выдвигается научная гипотеза, на основе которой и разрабатывается концептуально-имитационная модель, по которой могут быть достигнуты поставленные цели). *Достижение цели определяет эффективность методов решения* сформулированных задач. Реализация целей исследования в теории систем достигается на основе формализации (способ описания систем качественными (методы описания сценария, экспертных оценок, дерева целей, морфологического моделирования) или количественными (все существующее многообразие математических методов) характеристиками. *Ценность формализации систем* заключается в том, что исследуемая проблема может быть эффективно разрешена на основе четкой формулировки задачи (при решении любой проблемы необходимо сформулировать задачи и находить методы их решения. Отметим, *проблема отличается от задачи тем, что обычно не существует четкого метода ее решения*). Сложность и неоднозначность исследования сложных и больших систем приводят к использованию метода моделирования. Он разработан с учетом *принципа изоморфизма* (замена объекта на адекватную модель). В теории систем утверждается, что кроме моделирования нет других средств для качественного и эффективного описания больших и сложных систем. *По Н.М. Амосову, всякое познание является моделированием*. Формализации предшествуют содержательные эмпирические представления. Применение математических средств возможно лишь тогда, когда определены средства оценки и измерения всех существенных параметров системы. Любая модель строится на основе теоретических принципов теории систем и реализуется определенными математическими методами описания алгоритмических процессов. Такой подход в моделировании обеспечивает определенную строгость и логичность доказательств и позволяет избежать многих противоречий в понятиях на междисциплинарном уровне. Исходя из справедливости *принципа моделируемости сложных систем* [7...14], предполагается, что *любая система представима конечным множеством моделей, отражающих определенную грань ее сущности*. Это дает возможность исследования выделенных свойств по некоторой совокупности упрощенных узкоориентированных моделей. Для исследования новых свойств, естественно, требуется добавить новые модели в указанную совокупность.

Отметим основные *постулаты принципа моделируемости*. Начнем с *постулата многообразия моделей*: определение характеристик системы на всех уровнях производится на основе множества моделей, различающихся используемыми математическими зависимостями и физическими закономерностями; выбор моделей зависит от целей анализа и синтеза, а также особенностей системы. *Требования к системе, формируемые на любом уровне, выступают как условия (или ограничения) выбора частных моделей и предельных возможностей системы на нижележащих уровнях; при невозможности выполнения требований осуществляется корректировка условий (согласование уровней)*. Существует область неопределенности, в пределах которой свойства системы могут быть описаны только вероятностными характеристиками (*постулат неопределенности*). Одновременно измерить значения двух (или более) параметров с точностью, превышающей определенный уровень, невозможно; *внутри*

области неопределенности повышение точности измерения одного свойства влечет за собой снижение точности измерения другого (других).

Далее. Реакция системы на внешнее воздействие носит пороговый характер (*постулат действий*; для изменения поведения системы требуется прирост воздействия, превосходящего некоторое пороговое значение; порог есть функция количества определенного вещества, энергии и определенной информации, например, рецептурно-технологических параметров при синтезе композитов). Наблюдатель воспринимает одни грани сущности в одних условиях и другие сущности в других: сложные системы, находясь в различных средах, могут проявлять различные системные свойства, в том числе несовместимые ни в одной из ситуаций по отдельности (*постулат дополнительности*). Необходимым условием получения правильных решений на всех уровнях исследования системы является использование исходных данных, моделей и методов вышележащих уровней (*постулат внешнего дополнения*). Последовательность этапов определения требуемых характеристик в процессе совершенствования сложной системы выбирается по возрастанию затрат на улучшение системы, с проверкой достаточности принимаемых решений по заданным критериям эффективности (*постулат достаточности*). При анализе и синтезе системы необходимо использовать лишь хорошо отработанные и экспериментально проверенные модели и методики (обеспечивающие отдельные характеристики системы в заданные сроки и с требуемой точностью).

Функционирование сложной системы определяется как результат взаимодействия упрощенных моделей. Рассмотренный подход к анализу и синтезу структурированных сложных систем в приложении к разработке композиционных материалов представлен в виде структурной схемы.



Структурная схема синтеза композита

Из прагматических соображений следует, что обобщенная модель как совокупность упрощенных моделей должна быть проще самой системы; создание полной модели практически невозможно: она будет столь же сложной, как сама система. На это особое внимание обращается и в известном Принципе стопроцентной эффективности математики (речь идет о заданной, а не абсолютной точности описания системы некоторой математической структурой и наоборот). На первый взгляд, принцип моделируемости выглядит противоречащим постулату целостности сложной системы: в системе все взаимосвязано, но это не мешает ее рассмотрению с различных точек зрения, позволяющих оценивать желаемые свойства разрабатываемой системы и ее суммарный эффект. Функционально сложная система направлена на достижение системой некоторого состояния / усиление или сохранение некоторого процесса. Методология системного подхода основывается не только на принципе моделируемости, но также целенаправленности и физичности. Укажем и основные виды анализа и синтеза систем. Структурный анализ (определение статических характеристик системы по известной структуре) проводится с целью исследования статических характеристик системы путем выделения подсистем и элементов; объекты исследования – различные варианты структур систем. Структурный синтез (создание системы, обладающей желательными свойствами) проводится с целью обоснования множества элементов структуры, отношений и связей, обеспечивающих в совокупности максимальную степень соответствия заданным требованиям. Функциональный анализ (определение динамических характеристик системы) проводится путем исследования процессов изменения ее состояния с течением времени на основе принятых алгоритмов (способов, методов, принципов). Информационный анализ (определение объема и форм представления информации, методов и средств ее передачи, обработки, хранения, ввода и вывода при известной структуре и алгоритма функционирования системы; дополняет задачи функционального синтеза) выполняется с целью исследования количественных и качественных характеристик информации, используемой в системе. Параметрический анализ (определение необходимой и достаточной совокупности показателей, характеризующих исследуемые свойства системы и позволяющих оценивать желаемые свойства разрабатываемой системы и ее суммарный эффект; объект исследования – частные и обобщенные показатели системы, образующие иерархическую структуру).

Структурная схема синтеза материала многократно и эффективно использовалась при разработке композитов специального назначения [15...18]. На практике уточнение рецептурно-технологических параметров, как правило, производилось итеративно.

Список литературы

1. Данилов, А.М. Цель системы: абстрактная модель и ее формализация / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 1 (26). – С. 20–23.
2. Данилов, А.М. Строительное материаловедение: комплексные исследования, системный анализ / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 1 (30). – С. 42–46.
3. Гарькина, И.А. Единая концепция системного проектирования сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №1(38). – С.119-123.
4. Гарькина, И.А. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2018. – № 1–2. – С. 60–62.
5. Данилов, А.М. Методологическая парадигма естественных наук: системный подход / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 3 (28). – С. 161–165.

6. Данилов, А.М. Формализация кинетических процессов и обобщенный критерий качества композитов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 4 (29). – С. 28–32.
7. Данилов, А.М. Методология проектирования сложных систем при разработке материалов специального назначения / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 1 (625). – С. 80–85.
8. Данилов, А.М. Гомеостатическая концепция моделирования систем в строительном материаловедении / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, Д.С. Сорокин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 4. – С. 24–30.
9. Garkina, I.A. Methodological principles design of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.A. Budylna // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11. – P. 2524.
10. Данилов, А.М. Отраслевые аспекты системного анализа / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 4 (29). – С. 131–136.
11. Garkina, I. Modeling of Building Materials as Complex Systems / I.Garkina, A. Danilov, Y. Skachkov. // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417.
12. Garkina, I. Principles of optimal control in the synthesis of composite materials / I. Garkina, A. Danilov, V. Selyaev // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 723. – P. 32–36.
13. Будылина, Е.А. Синтез композитов: логико-методологические модели / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Д.С. Сорокин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 149.
14. Гарькина, И.А. Система: проектирование, модификации, критерии оценки / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Я.И. Сухов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1–1. – С. 365.
15. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2. «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.
16. Данилов, А.М. Приближенные методы аналитического конструирования композиционных материалов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №1(38). – С.24–29.
17. Garkina, I.A. Tasks of building materials from the viewpoint of control theory / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 737. – P. 578–582.
18. Garkina, I.A. Composite Materials: Identification, Control, Synthesis / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol.471. – P. 032005.

References

1. Danilov, A.M. The purpose of the system: an abstract model and its formalization / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2016. – № 1 (26). – P. 20–23.
2. Danilov, A.M. Building materials science: complex studies, systems analysis / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2017. – № 1 (30). – P. 42–46.
3. Garkina, I.A. Unified system design concept for complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2019. – №1 (38). – P.119–123.
4. Garkina, I.A. The evolution of ideas about composite materials from the standpoint of changing paradigms / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Construction materials. – 2018. – № 1–2. – P. 60–62.
5. Danilov, A.M. Methodological paradigm of natural sciences: a systems approach / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2016. – № 3 (28). – P. 161–165.

6. Danilov, A.M. Formalization of kinetic processes and generalized quality criterion of composites / A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and engineering*. – 2016. – № 4 (29). – P. 28–32.
7. Danilov, A.M. Methodology of designing complex systems in the development of special-purpose materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Proceedings of higher educational institutions. Building*. – 2011. – № 1 (625). – P. 80–85.
8. Danilov, A.M. Homeostatic concept of modeling systems in building materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina, D.S. Sorokin // *Regional architecture and engineering*. – 2014. – № 4. – P. 24–30.
9. Garkina, I.A. Methodological principles design of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.A. Budylnina // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2016. – Vol. 11. – P. 2524.
10. Danilov, A.M. Industry Aspects of Systems Analysis / A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and engineering*. – 2016. – № 4 (29). – P. 131–136.
11. Garkina, I. Modeling of Building Materials as Complex Systems / I.Garkina, A. Danilov, Y. Skachkov. // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417.
12. Garkina, I. Principles of optimal control in the synthesis of composite materials / I. Garkina, A. Danilov, V. Selyaev // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 723. – P. 32–36.
13. Budylnina, E.A. Synthesis of composites: logical-methodological models / E.A. Budylnina, I.A. Garkina, A.M. Danilov, D.S. Sorokin // *Modern problems of science and education*. – 2014. – № 5. – P. 149.
14. Garkina, I.A. System: design, modification, evaluation criteria / I.A. Garkina, A.M. Danilov, Ya.I. Sukhov // *Current problems of science and education*. – 2015. – № 1–1. – P. 365.
15. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2. «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering»*. – 2017. – P. 012006.
16. Danilov, A.M. Approximate methods of analytical design of composite materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and engineering*. – 2019. – №1 (38). – P.24–29.
17. Garkina, I.A. Tasks of building materials from the viewpoint of control theory / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 737. – P. 578–582.
18. Garkina, I.A. Composite Materials: Identification, Control, Synthesis / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2019. – Vol.471. – P. 032005.

УДК 691.327:539.32

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Макридин Николай Иванович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»

Максимова Ирина Николаевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: maksimovain@mail.ru

Полубарова Юлия Владимировна,
аспирант

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Makridin Nikolai Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Technology of building materials
and woodworking»

Maksimova Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Management of quality
and technology of construction production»
E-mail: maksimovain@mail.ru

Polubarova Yulia Vladimirovna,
Postgraduate student

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ И СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КОНСТРУКЦИОННОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНА

Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Ю.В. Полубарова

Экспериментальное изучение механического поведения конструкционного материала позволяет судить о прочности, надежности и долговечности материала, получать условия оптимизации состояния по тем или иным параметрам конструкционной прочности и использовать их при расчетах и проектировании конструкций, в том числе в технологии производства конструкционного материала. Представлены результаты экспериментальной оценки механического поведения конструкционного керамзитобетона по продольным и поперечным деформациям на диаграмме осевого сжатия с однократной разгрузкой опытных образцов с уровня напряжения $0,6-0,7R_{пр}$ с целью определения гистерезиса кривых продольной и поперечной деформаций и работы разрушения опытных образцов по пластической составляющей этих деформаций. Приведен сравнительный анализ влияния условий предварительного нагружения и разгрузки конструкционного керамзитобетона на характер механического поведения на диаграмме осевого сжатия. Экспериментально показано влияние возраста на характер изменения прочности и начального модуля упругости керамзитобетона.

Ключевые слова: призмная прочность, структура, диаграмма деформирования, продольная и поперечная деформативность, остаточные деформации, работа разрушения, начальный модуль упругости, коэффициенты поперечной деформации, микротрещинообразование

PECULIARITIES OF MECHANICAL BEHAVIOR AND STRUCTURAL CHANGES OF CONSTRUCTION CERAMZIT CONCRETE

N.I. Makridin, I.N. Maksimova, Y.V. Polubarova

Experimental study of the mechanical behavior of a structural material makes it possible to consider the strength, reliability and durability of the material, to obtain conditions for optimizing the state of various structural strength parameters and use them in calculations and design of structures, including production technology of a structural material. The results of an experimental assessment of the mechanical behavior of structural claydite-concrete by longitudinal and transverse deformations on an axial compression diagram with a single unloading of experimental samples from a stress level of $0.6-0.7 R_{pr}$ are presented to determine the hysteresis of the longitudinal and transverse deformation curves and the fracture performance of experimental samples by plastic component deformations.

A comparative analysis of the effect of preloading and unloading of structural claydite-concrete on the mechanical behavior on the axial compression diagram is given. The effect of the age on the nature of the change in strength and the initial modulus of elasticity of expanded clay is experimentally shown.

Keywords: prism strength, structure, deformation diagram, longitudinal and transverse deformability, residual deformations, fracture work, initial modulus of elasticity, transverse deformation coefficients, microcrack formation

Современный зарубежный и отечественный опыт комплексного использования легких бетонов на пористых заполнителях типа керамзита при строительстве (особенно высотных зданий) обеспечивает заметное снижение материалоемкости и затрат на фундаменты, дает экономию арматуры и снижает стоимость строительства.

Однако механическое поведение конструкционного керамзитобетона как при кратковременном, так и длительном приложении внешней нагрузки все еще остается изученным не в полной мере.

Как известно, для описания механического поведения конструкционного материала постулируются определяющие или конституционные соотношения, позволяющие связать характеристики напряжений и деформаций, получаемых посредством эксперимента.

Экспериментальные исследования свойств материалов позволяют устанавливать количественные соотношения между напряжениями и деформациями, их скоростями, структурными изменениями, а также интегральными и дифференциальными характеристиками в упругом, упругопластическом и вязкоупругом состояниях. Опытные данные, с одной стороны, позволяют судить о прочности, надежности, долговечности материала при известных условиях внешней среды, получать условия оптимизации состояния по тем или иным параметрам конструкционного материала, а с другой – использовать их при расчетах и проектировании механических моделей и технологии их производства [1–6].

Целью нашего эксперимента являлось сравнительное изучение механического поведения конструкционного керамзитобетона на диаграмме осевого сжатия в зависимости от условий предварительного нагружения и разгрузки опытных образцов с позиций механики деформируемого твердого тела по методике ГОСТ 24452–80.

Опытные образцы-призмы керамзитобетона размером 10×10×40 см изготавливали в одиночных металлических формах, на боковых гранях которых в срединной части как по высоте, так и по ширине граней закрепляли закладные детали, которые после формования и распалубки образцов являлись стационарными реперами для установки и крепления индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 и 0,002 мм для замера соответственно продольных и поперечных деформаций на базе 200 и 60 мм на двух противоположных гранях образцов-призм.

Керамзитобетон приготавливали на вольском портландцементе активностью 40 МПа, сурском речном песке с модулем крупности, равным 1,7, керамзитовом гравии фракции 5–10 мм Пачелмского завода с прочностью в стальном цилиндре 3,12 МПа по ГОСТ 9758–2012. Расход компонентов на 1 м³ бетонной смеси составлял: цемента – 437 кг, кварцевого песка – 609 кг, керамзитового гравия марки 400 – 310 кг, что соответствовало коэффициенту насыщения керамзитом 0,39, и воды затворения – 230 л. Средняя плотность гранул керамзита в куске составляла 0,8 г/см³. Подвижность бетонной смеси составляла 10–15 с. После тепловлажностной обработки образцы-призмы хранили в обычных лабораторных условиях.

В возрасте керамзитобетона 28 суток на трех опытных образцах-призмах по методике ГОСТ 24452-80 определяли призмennую прочность, начальный модуль упругости на уровне $0,3 R_{np}$, предельную продольную и поперечную деформацию, а также коэффициенты поперечной деформации. Средние значения названных параметров составляли: $R_{np} = (17,7 \pm 2,1)$ МПа; $\varepsilon_1 = 2,005$ мм/м; $\varepsilon_2 = 0,729$ мм/м; $\nu = 0,290$ и $E = 11260$ МПа при средней плотности керамзитобетона 1570 кг/м³.

Для сравнительного анализа механического поведения керамзитобетона использовали три партии опытных образцов одинакового состава, отличающихся между собой предисторией нагружения и разгрузки. Образцы первой партии (контрольные) после

изготовления находились в обычных нормально-влажностных лабораторных условиях, на данных образцах контролировали деформацию усадки керамзитобетона. Образцы второй и третьей серий (рабочие) в возрасте 30 суток загружали в пружинные установки для изучения деформаций ползучести при интенсивности напряжения $0,4\text{--}0,5 R_{\text{пр}}$. После стабилизации деформаций ползучести, что наблюдали примерно через год, образцы-призмы второй и третьей серий разгружали и одну часть образцов подвергали сразу кратковременному статическому нагружению сжатия, а образцы третьей серии испытывали аналогично на седьмые сутки после разгрузки, то есть после семисуточного проявления деформаций последствия ползучести с целью определения влияния деформационных эффектов разгрузки рабочих серий образцов на кривой осевого сжатия при изучении механического поведения контрольных и рабочих серий образцов конструкционного керамзитобетона с позиций механики деформируемого твердого тела.

В данной работе представлены результаты экспериментальной оценки механического поведения конструкционного керамзитобетона по продольным и поперечным деформациям на диаграмме осевого сжатия с однократной разгрузкой опытных образцов с уровня напряжения $0,6\text{--}0,7 R_{\text{пр}}$ с целью определения гистерезиса кривых продольной и поперечной деформаций и работы разрушения опытных образцов по пластической составляющей этих деформаций.

Механическое поведение конструкционного керамзитобетона при кратковременном статическом нагружении до разрушения проводили в возрасте бетона опытных образцов 395–400 суток с использованием гидравлического пресса УММ-50. Нагружение образцов осуществляли ступенчато в $0,1 R_{\text{пр}}$ с пятиминутной выдержкой на каждом этапе для оценки упругой и проявившейся кратковременной пластичности продольных и поперечных деформаций по показаниям индикаторов часового типа.

На рис. 1–3 представлены диаграммы продольных деформаций осевого сжатия с однократной разгрузкой опытных образцов сравниваемых серий. Из анализа диаграмм сжатия следует отметить, что предельная сжимаемость образцов серий №№ 1–3 при уровне напряжения $0,9 R_{\text{пр}}$ составляла соответственно 2,349; 2,362 и 2,287 мм/м, то есть практически была одинаковой. При этом призматическая прочность образцов контрольной серии выросла до 25 МПа, а рабочих образцов серий №№ 2 и 3 – соответственно до 26,5 и 26 МПа, что соответствовало росту в 1,41 и 1,5 раза, а начальный модуль упругости сравниваемых серий №№ 1–3 соответственно составлял: 10790; 9640 и 9130 МПа, что было меньше значений начального модуля упругости керамзитобетона в возрасте 28 суток соответственно на 4,2; 14,4 и 19 %, что обусловлено, на наш взгляд, как высыханием керамзитобетона до плотности 1463; 1490 и 1490 кг/м³ за этот период времени, так и условиями предварительного нагружения и разгрузки сравниваемых образцов серий №№ 1–3.

Однократная разгрузка сравниваемых образцов с уровня напряжения $(0,6\text{--}0,7) R_{\text{пр}}$ с деформациями по сериям №№ 1–3 1,761; 1,587 и 1,631 мм/м показала остаточные продольные деформации – 0,0875; 0,0145 и 0,042 мм/м соответственно, что составляло 4,97; 0,91 и 2,58 % соответственно, то есть различие величин остаточных деформаций сравниваемых образцов достигало 1,93–5,46 раза.

Оценка работы разрушения ΔA сравниваемых серий образцов по остаточным продольным деформациям петли гистерезиса однократной разгрузки по формуле

$$\Delta A = \frac{1}{2} \sigma \cdot \varepsilon_1^{\text{ост}}$$
 составляла соответственно для образцов серий №№ 1–3: 765; 117 и 327 Дж/м³, что позволяет констатировать, в свою очередь, что макроструктура керамзитобетона контрольной серии подвержена большему разрушению, чем макроструктура рабочих серий образцов. При этом образцы, испытанные сразу после освобождения из пружинных установок, то есть образцы с запасом вязкоупругой составляющей деформации ползучести, показали более совершенную макроструктуру керамзитобетона с $\Delta A = 117$ Дж/м³.

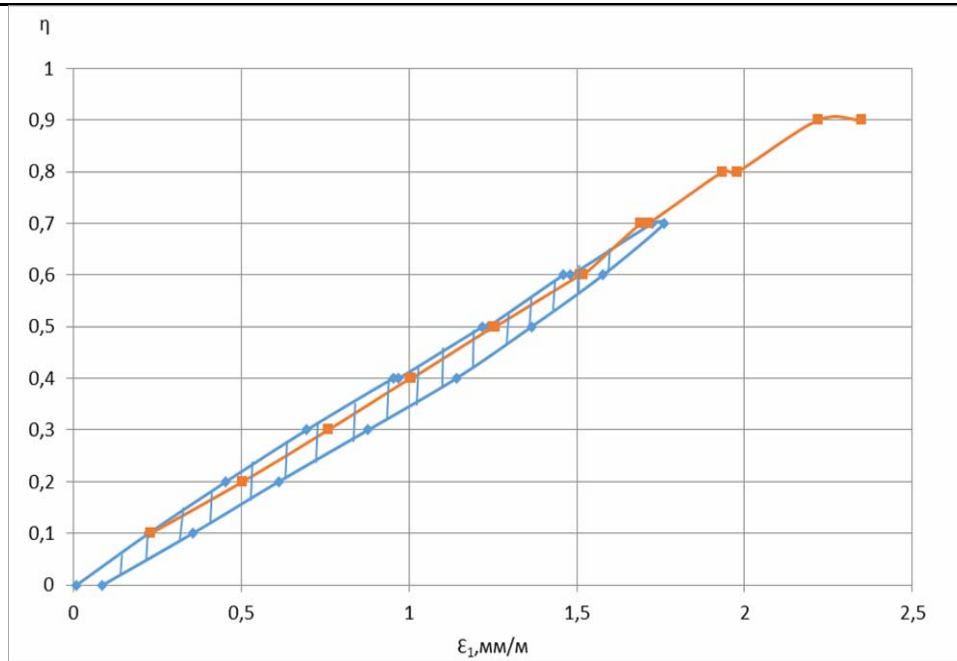


Рис. 1. Продольная деформативность керамзитобетона контрольной серии с однократной разгрузкой при осевом сжатии до разрушения. $R_{пр}=25$ МПа, $\rho=1463$ кг/м³

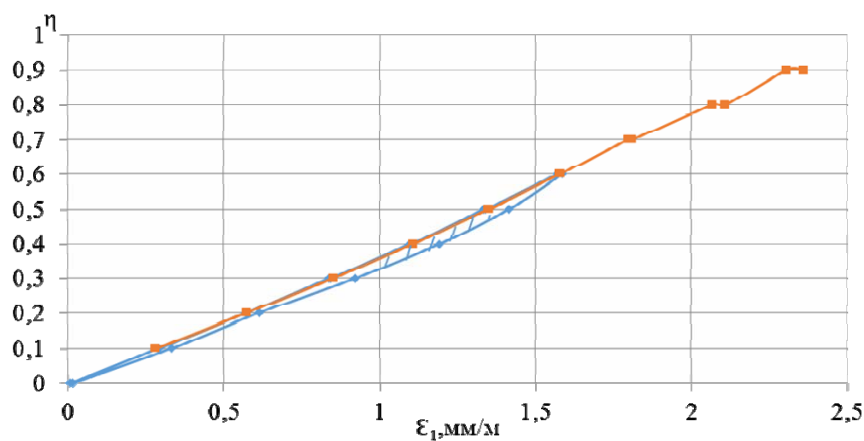


Рис. 2. Продольная деформативность керамзитобетона второй серии с однократной разгрузкой, испытанного сразу после разгрузки на ползучесть. $R_{пр}=26,5$ МПа, $\rho=1490$ кг/м³

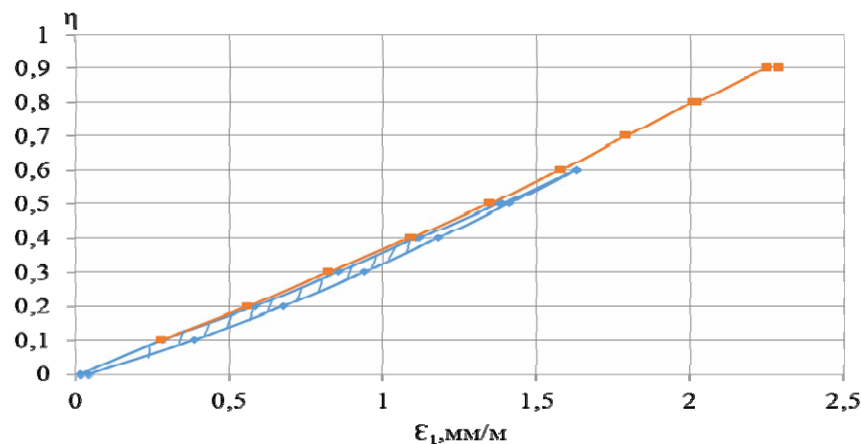


Рис. 3. Продольная деформативность керамзитобетона третьей серии с однократной разгрузкой, испытанного на седьмой день после разгрузки на ползучесть. $R_{пр}=26$ МПа, $\rho=1490$ кг/м³

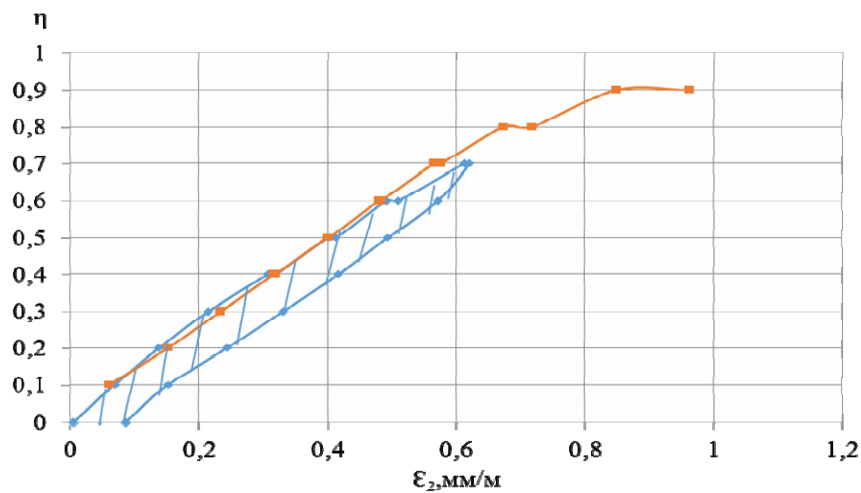


Рис. 4. Поперечная деформативность керамзитобетона контрольной серии с однократной разгрузкой при осевом сжатии после усадки. $R_{np}=25$ МПа, $\rho=1463$ кг/м³

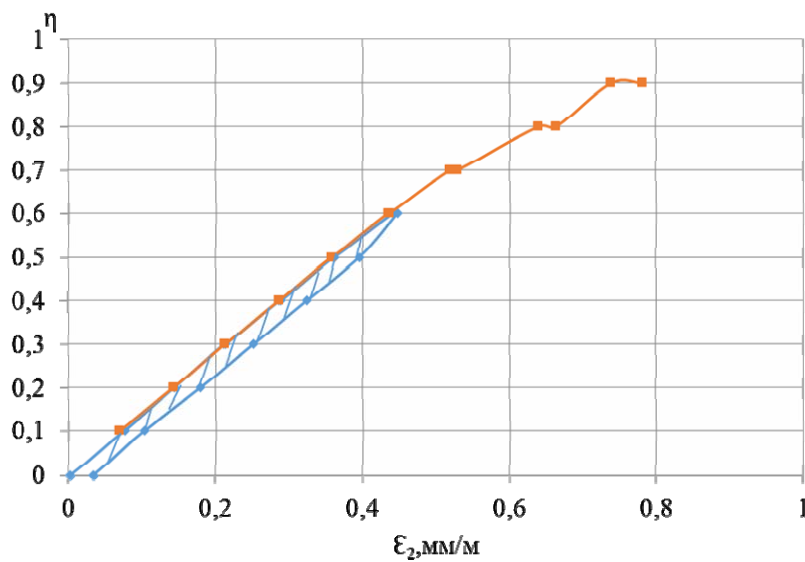


Рис. 5. Поперечная деформативность керамзитобетона второй серии с однократной разгрузкой, испытанного сразу после разгрузки на ползучесть. $R_{np}=26,5$ МПа, $\rho=1490$ кг/м³

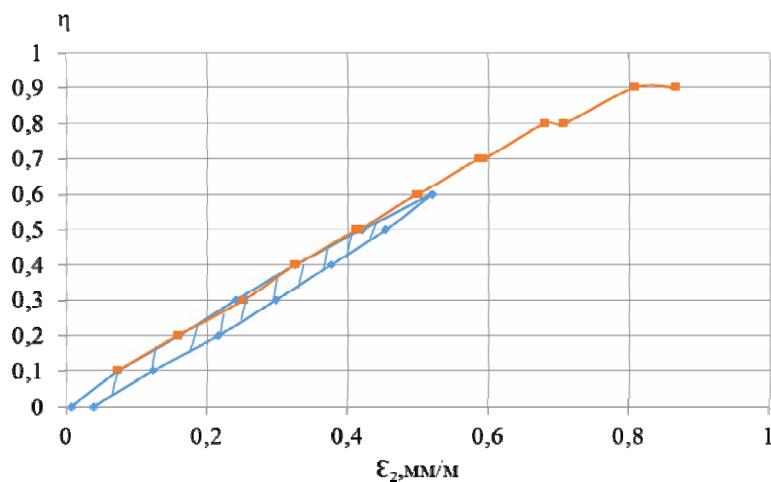


Рис. 6. Поперечная деформативность керамзитобетона третьей серии с однократной разгрузкой, испытанного на седьмой день после разгрузки на ползучесть. $R_{np}=26$ МПа, $\rho=1490$ кг/м³

На рис. 4–6 приведены графические зависимости поперечных деформаций сравниваемых серий керамзитобетона также с однократной разгрузкой диаграммы сжатия и оценкой деформационных особенностей петли гистерезиса поперечной деформации. Из анализа диаграмм сжатия, приведенных на рис. 4–6, прежде всего следует отметить, что предельная поперечная деформативность керамзитобетона сравниваемых серий оказалась разной в зависимости от предистории силового воздействия на контрольные и рабочие серии образцов и составляла 0,964; 0,782 и 0,866 мм/м соответственно для образцов серий №№ 1–3.

Однократная разгрузка сравниваемых образцов с уровня напряжения $(0,6–0,7) R_{np}$ с поперечными деформациями по сериям №№ 1–3: 0,621; 0,447 и 0,52 мм/м, показала остаточные поперечные деформации 0,0857; 0,034 и 0,039 мм/м соответственно, что составляло в процентах: 13,8; 7,6 и 7,5.

Сравнение процентных показателей остаточных продольных и поперечных деформаций однократной разгрузки сравниваемых серий образцов №№ 1–3 достаточно наглядно отражает определяющую роль деструктивного процесса поперечной деформации в снижении несущей способности конструкционного материала.

При этом следует отметить, что численные значения коэффициента поперечной деформации $\nu^{ост}$, вычисленные по остаточным деформациям $\epsilon_1^{ост}$ и $\epsilon_2^{ост}$ при однократной разгрузке опытных образцов серий №№ 1–3, достигли значений 0,98; 2,34 и 0,93 соответственно.

Оценка работы разрушения ΔA сравниваемых серий образцов по остаточным поперечным деформациям петли гистерезиса однократной разгрузки составляла соответственно для образцов серий №№ 1–3: 765; 275 и 304 кДж/м³, что находится в полном согласии с численными значениями работы разрушения керамзитобетона по остаточным деформациям продольного сжатия с приматом роли деструктивного процесса остаточных поперечных деформаций.

В соответствии с методическими рекомендациями [7] и публикациями [8–13] структурные изменения конструкционного керамзитобетона в результате его микротрещинообразования на диаграмме сжатия контролировали по продольным и поперечным деформациям, коэффициентам поперечных деформаций и времени прохождения через опытные образцы ультразвуковых импульсов.

Экспериментальная оценка уровня расположения второй параметрической точки микротрещинообразования R_T^v , при достижении которой дифференциальный коэффициент поперечной деформации $\Delta\nu = \Delta\epsilon_2/\Delta\epsilon_1$ становится равным значению 0,5, а время прохождения ультразвукового импульса через образец увеличивается для сравниваемых серий керамзитобетона №№ 1–3, показала следующие значения:

- образцы серии № 1 (контрольные) показали расположение точки R_T^v при пятиминутной выдержке на уровне нагружения $0,8 R_{np}$, а время распространения ультразвуковых импульсов через опытные образцы увеличилось на 1,6 %;
- на диаграмме сжатия образцов серии № 2 по деформациям ϵ_1 и ϵ_2 не удалось зафиксировать дифференциальный коэффициент поперечной деформации равным 0,5, а время прохождения ультразвуковых импульсов через опытные образцы этой серии практически оставалось постоянным;
- на образцах серии № 3 расположение точки R_T^v на диаграмме сжатия было получено также при пятиминутной выдержке на уровне нагружения $0,8 R_{np}$. При этом на всем диапазоне нагружения время прохождения ультразвуковых импульсов через опытные образцы оставалось практически неизменным.

Таким образом, проведенные исследования показали специфические деформационные особенности конструкционного керамзитобетона, обусловленные прежде всего тем, что в данном легком бетоне имеются две пористые структуры (матричная фаза и пористый заполнитель), взаимодействие и взаимовлияние которых в процессе структу-

рообразования способствует накоплению упругой деформации пористого заполнителя, что, в свою очередь, приводит к повышению его предельной растяжимости. Задачей технологии является создание наиболее благоприятного сочетания деформаций компонентов бетона при формировании его структуры, так как многовариантность совместных деформаций пористого заполнителя и цементного камня дает в руки технологам возможность выбора из числа многих вариантов лучшего для данного заполнителя и требуемых свойств легкого бетона. При этом комплексная оценка параметров конструкционной прочности и структурно-системный подход к анализу механического поведения керамзитобетона как композиционного материала позволяет более надежно выявлять синергетические эффекты взаимодействия или взаимовлияния структурных элементов композита и на этой основе устанавливать критерии предельного состояния, обладающие достаточной общностью для использования в современной практике проектирования.

Список литературы

1. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
2. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко; под ред. д-ра техн. наук, проф. О.Я. Берга. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.
3. Прочность, структурные изменения и деформации бетона / А.А. Гвоздев, А.В. Яшин, К.В. Петрова [и др.]; под ред. А.А. Гвоздева. – М.: Стройиздат, 1978. – 297 с.
4. Матченко, Н.М. Теория деформирования разнородных материалов. Определяющие соотношения / Н.М. Матченко, А.А. Трещев. – Тула: ТулГУ, 2000. – 149 с.
5. Пирадов, К.А. Механика разрушения и теория железобетона / К.А. Пирадов // Бетон и железобетон. – 2014. – № 4. – С. 23–25.
6. Карпенко, Н.И. К построению диаграмм деформирования бетона повторными нагрузками сжатия при постоянных уровнях напряжения / Н.И. Карпенко, В.А. Ерышев, Е.В. Латышева // Строительные материалы. – 2013. – № 6. – С. 48–51.
7. Методические рекомендации по определению прочностных и структурных характеристик бетона при кратковременном и длительном нагружении. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1976. – 56 с.
8. Макридин, Н.И. Механическое поведение конструкционного керамзитобетона при осевом сжатии / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Строительные материалы. – 2009. – № 1. – С. 51–53.
9. Макридин, Н.И. Прочностные параметры качества структуры бетона повышенной прочности / Н.И. Макридин, Е.В. Королёв, И.Н. Максимова, Ю.В. Овсянкова // Строительные материалы. – 2010. – № 3. – С. 99–101.
10. Макридин, Н.И. Сравнительный анализ механического поведения горных пород на диаграмме нагружения / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Е.А. Тамбовцева // Строительные материалы. – 2014. – № 10. – С. 34–38.
11. Максимова, И.Н. Технологические особенности формирования структуры и свойств конструкционных легких бетонов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 2. – С. 45–48.
12. Макридин, Н.И. Структура и свойства керамзитового гравия для бетонов повышенной прочности / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, М.В. Симаков // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 3. – С. 52–56.
13. Максимова, И.Н. Строительное материаловедение конструкционных легких бетонов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 204 с.

References

1. Akhverdov, I.N. Basics of concrete physics / I.N. Akhverdov. – M.: Stroiizdat, 1981. – 464 p.

2. Berg, O.Ya. High-strength concrete / O.Ya. Berg, E.N. Shcherbakov, G.N. Pisanko; Ed. Dr. techn. sciences, prof. O.Ya. Berg. – M.: Stroiizdat, 1971. – 208 p.
3. Strength, structural changes and deformations of concrete / A.A. Gvozdev, A.V. Yashin, K.V. Petrova [etc.]; ed. A.A. Gvozdev. – M.: Stroiizdat, 1978. – 297 p.
4. Matchenko, N.M. The theory of deformation of materials with different resistance. Determining relations / N.M. Matchenko, A.A. Treshchev. – Tula: TSU, 2000. – 149 p.
5. Piradov, K.A. Fracture mechanics and theory of reinforced concrete / K.A. Piradov // Concrete and reinforced concrete. – 2014. – № 4. – P. 23–25.
6. Karpenko, N.I. On the construction of concrete deformation diagrams by repeated compression loads at constant stress levels / N.I. Karpenko, V.A. Eryshev, E.V. Latysheva // Construction materials. – 2013. – № 6. – P. 48–51.
7. Methodical recommendations for determining the strength and structural characteristics of concrete under short-term and long-term loading. – M.: NIIZHB Gosstroy USSR, 1976. – 56 p.
8. Makridin, N.I. Mechanical behavior of structural claydite-concrete under axial compression / N.I. Makridin, I.N. Maksimova // Construction materials. – 2009. – № 1. – P. 51–53.
9. Makridin, N.I. Strength parameters of the quality structure of concrete of high strength / N.I. Makridin, E.V. Korolev, I.N. Maksimova, Yu.V. Ovsyukova // Construction materials. – 2010. – № 3. – P. 99–101.
10. Makridin, N.I. Comparative analysis of the mechanical behavior of rocks on the loading diagram / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, E.A. Tambovtseva // Construction materials. – 2014. – № 10. – P. 34–38.
11. Maksimova, I.N. Technological features of the formation of the structure and properties of structural light concretes / I.N. Maksimova, N.I. Makridin // Regional architecture and engineering. – 2012. – № 2. – P. 45–48.
12. Makridin, N.I. Structure and properties of expanded clay gravel for high-strength concrete / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, M.V. Simakov // Regional architecture and engineering. – 2012. – № 3. – P. 52–56.
13. Maksimova, I.N. Building materials constructional lightweight concrete / I.N. Maksimova, N.I. Makridin. – Penza: PGUAS, 2014. – 204 p.

УДК 691.4:691.554

*Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева*

Россия, 430000, г. Саранск,
ул. Советская, д. 24
тел.: (8342) 47-71-56

Низина Татьяна Анатольевна,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»,
советник РААСН
E-mail: nizinata@yandex.ru

Володин Владимир Владимирович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: volodinvv1994@gmail.com

Балыков Артемий Сергеевич,
инженер кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: artbalrun@yandex.ru

Ошкина Лариса Михайловна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Инженерная и компьютерная
графика»
E-mail: oshkinalm@yandex.ru

Коровкин Дмитрий Игоревич,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: asfkorovkin@yandex.ru

*Mordovian State University
named after N.P. Ogarev*

Russia, 430000, Saransk, 24,
Soviet St.,
tel.: (8342) 47-71-56

Nizina Tatyana Anatolevna,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Building structures»,
Adviser of the Russian Academy Of
Architecture and Construction Sciences
E-mail: nizinata@yandex.ru

Volodin Vladimir Vladimirovich,
Postgraduate student of the department
«Building structures»
E-mail: volodinvv1994@gmail.com

Balykov Artemy Sergeevich,
Department engineer «Building structures»
E-mail: artbalrun@yandex.ru

Oshkina Larisa Mihailovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Engineering and Computer
Graphics»
E-mail: oshkinalm@yandex.ru

Korovkin Dmitriy Igorevich,
Postgraduate student of the department
«Building structures»
E-mail: asfkorovkin@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ ОБОЖЖЁННОЙ ГЛИНЫ НА ПРОЧНОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННОГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ*

Т.А. Низина, В.В. Володин, А.С. Балыков, Л.М. Ошкина, Д.И. Коровкин

Приведены результаты использования обожженной глины Старошайговского месторождения республики Мордовия в качестве минеральной добавки к цементным композитам. Показана возможность получения цементных композитов с повышенными прочностными характеристиками как за счет введения добавки, так и за счет оптимизации режима обжига глины.

Ключевые слова: цементные композиты, минеральные добавки, глина, режим обжига, плотность, прочностные показатели

INFLUENCE OF THE ADDITIVES ON THE BASIS OF BURNT CLAY ON THE STRENGTH OF CEMENT STONE *

T.A. Nizina, V.V. Volodin, A.S. Balykov, L.M. Oshkina, D.I. Korovkin

The results of the usage of burnt clay from Staroshaigivsky deposit of Mordovia Republic as a mineral additive to concrete composites are given. The possibility of obtaining cement composites

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Мордовия в рамках научного проекта № 18-43-130008.

with increased strength characteristics, both by the introduction of additives and by optimizing the mode of clay burning is shown.

Keywords: cement composites, mineral additives, clay, firing mode, density, strength properties

Высокая механическая прочность композиционных цементных материалов, в частности бетона, является одним из важнейших их свойств. Она определяется водоцементным отношением и степенью уплотнения смеси. Влияние данных факторов в настоящее время достаточно изучено [1–3] и регулируется соответствующей нормативной документацией. Известно также, что высоких прочностных показателей бетона можно достичь при использовании органических и минеральных добавок. Применение добавок в бетоне позволяет [4–6]: улучшить удобоукладываемость, повысить устойчивость к водоотделению, уменьшить водопотребность и расход пластификаторов, увеличить прочность, снизить усадочные деформации, повысить долговечность, морозостойкость и стойкость к сульфатной, хлоридной, уксусной и щелочной коррозии, снизить расход цемента.

В последние годы в качестве активной минеральной добавки в портландцемент получило определённое распространение введение метакеолина [7–11], получаемого термической обработкой каолиновых глин при температурах в диапазоне 700–800 °С. Однако для широкомасштабного производства и применения метакеолина определённым препятствием является ограниченность месторождений и запасов каолиновых глин во многих странах, в том числе и в России. Так, на долю Российской Федерации, занимающей примерно 1/9 площади суши всего земного шара, приходится всего лишь 3 % от общемировых запасов каолина. Также в настоящее время в качестве минеральных добавок для цементных бетонов широко применяют доменный шлак, топливную золу и микрокремнезём. Однако данные добавки являются отходом промышленных производств, поэтому их объёмы ограничены и дальнейшее наращивание затруднено [12–14].

Ограниченностью сырьевой базы применяемых минеральных добавок объясняется активизация в последние годы исследований пуццоланической активности прокалённых глинистых минералов и получение на их основе эффективных добавок [15–18]. В работах [19–20] представлены результаты исследований пуццоланической эффективности прокалённых молотых глин Оренбургской, Челябинской областей и Республики Татарстан с различным содержанием каолинита и полным его отсутствием. Показано, что данные глины могут иметь пуццоланическую активность, не уступающую микрокремнезёму и метакеолину.

По результатам исследований [21] установлено, что пуццолановой активностью после термической обработки обладают не только каолиновые, но и монтмориллонитовые, мусковитовые и иллитовые глины. Полученные результаты свидетельствуют о том, что глины, являющиеся повсеместно распространённым, доступным и дешёвым материалом, представляют собой ценное сырьё для получения пуццоланов. Территория России богата запасами самых разных видов глин. Добыча обыкновенных (легкоплавких) глин в России производится практически повсеместно. Например, на территории Республики Мордовия расположено более пятидесяти месторождений глинистых пород, что позволяет отнести разработку активных минеральных добавок на основе глинистого сырья к перспективным задачам строительной индустрии, решение которых минимизирует ряд экономических, технологических и экологических проблем цементной промышленности как в самом регионе, так и в стране в целом.

При проведении экспериментальных исследований пуццоланической активности обожжённых глинистов была выбрана глина Старошайговского месторождения, расположенного в 2 км к юго-западу от с. Старое Шайгово Республики Мордовия, на II левобережной надпойменной террасе р. Сивинь. Фазовый состав глины представлен в табл. 1. В качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н производства АО «Серебряковцемент». Температура обжига глины составляла 400, 600 и 800 °С. Время обжига составляло 2, 3 и 4 часа. Прокалённые глины подвергались помолу в шаровой мельнице в течение 1 часа. Получаемые порошки вводились в состав цемент-

ного вяжущего в количестве от 2 до 18 % от массы портландцемента. Водотвёрдое отношение принято 0,3.

Т а б л и ц а 1

Фазовый состав глины Старошайговского месторождения

Фаза	Микроклин	Иллит	Альбит	Кварц	Кристобалит	Каолинит
Концентрация фаз, %	5,5	26,8	6,4	44	3	14,4

В ходе экспериментальных исследований было изучено изменение в зависимости от варьируемых факторов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе в возрасте 7 и 28 суток. Согласно основному плану эксперимента были изготовлены 16 составов. Составы №1–15 содержат от 2 до 18 % обожжённой глины, состав 16 представляет собой немодифицированный цементный композит [22].

По результатам исследований была осуществлена оптимизация составов модифицированных цементных вяжущих с установлением наиболее эффективных режимов обжига. Определение рациональных составов велось на основании анализа экспериментальных статистических моделей, описывающих изменение предела прочности при сжатии (1) и на растяжение при изгибе (2) цементных композитов (28 суток) на основе модифицированного обожжённого глинистого сырья:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{сж}} = & 67,29 + 3,23 \cdot x_1 + 0,18 \cdot x_2 - 3,99 \cdot x_3 + 1,36 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,81 \cdot x_1 \cdot x_3 - \\ & - 1,38 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,31 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - 7,55 \cdot x_1^2 - 4,35 \cdot x_2^2 + 4,48 \cdot x_3^2 - \\ & - 0,91 \cdot x_1^2 \cdot x_2 - 0,56 \cdot x_1 \cdot x_2^2 - 0,49 \cdot x_1^2 \cdot x_3 - 2,19 \cdot (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3)^2; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{раст}} = & 10,11 + 0,62 \cdot x_1 - 2,06 \cdot x_2 - 0,57 \cdot x_3 - 0,49 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,19 \cdot x_1 \cdot x_3 + \\ & + 0,14 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,09 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,57 \cdot x_1^2 + 0,43 \cdot x_2^2 + 0,12 \cdot x_3^2 + \\ & + 2,47 \cdot x_1^2 \cdot x_2 - 0,19 \cdot x_1 \cdot x_2^2 + 0,23 \cdot x_1^2 \cdot x_3 - 0,36 \cdot (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3)^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где x_1 – температура обжига; x_2 – время обжига; x_3 – доля добавки.

Все используемые в уравнениях (1) и (2) факторы варьировались в кодовых величинах (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Исследуемые факторы и уровни их варьирования

Уровни варьирования в кодированных величинах	Варьируемые факторы		
	Температура обжига, °С	Время обжига, час.	Доля добавки, % от массы цемента
-2	—	—	2
-1	400	2	6
0	600	3	10
+1	800	4	14
+2	—	—	8

Выявление оптимальных областей компромиссных решений по каждому фактору в отдельности осуществлялось с помощью полигонов частот, являющихся одним из наиболее наглядных способов графического представления плотности вероятности случайной величины [23]. Установлено, что ряд модифицированных цементных композитов достигают прочностных показателей при сжатии 70–80 МПа, что сопоставимо с контрольным составом №16 (рис. 1). Наиболее высокие прочностные показатели достигнуты в составах 2, 4, 6 и 13 с содержанием обожжённой глины в количестве от 2

до 6 % от массы цемента. Наибольший предел прочности на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток, достигающий 12,6 МПа, получен для состава 11 (рис. 2).



Рис. 1. Предел прочности при сжатии модифицированных цементных композитов в возрасте 7 и 28 суток

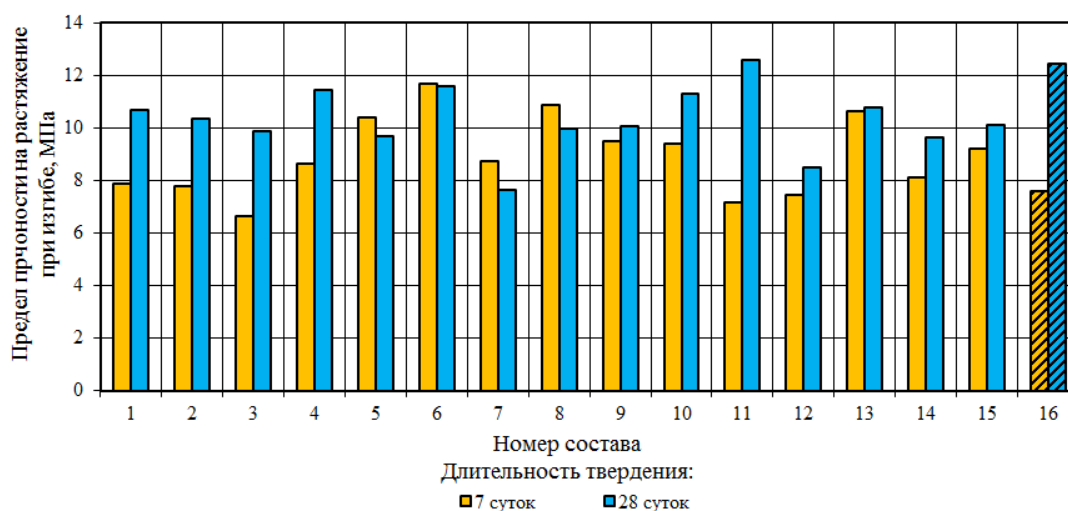
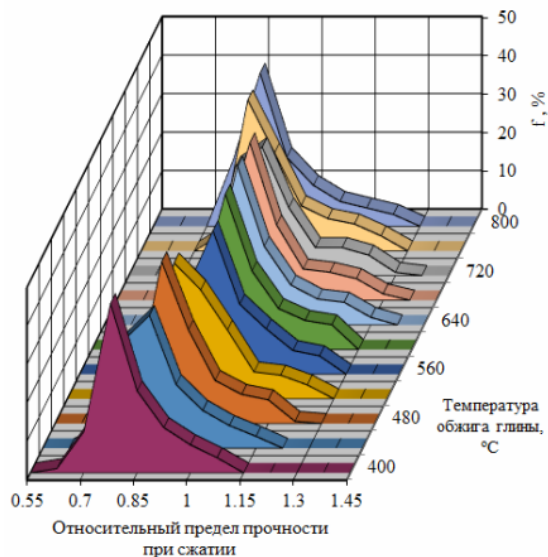


Рис. 2. Предел прочности на растяжение при изгибе модифицированных цементных композитов в возрасте 7 и 28 суток

Проведенный анализ ЭС-модели (1) на основе полигонов частот (рис. 3) показал, что предел прочности при сжатии, соответствующий контрольному составу, может быть обеспечен для цементных композитов с минеральной добавкой при любом исследуемом уровне температуры и длительности обжига глинистого сырья. При этом для принятых температурно-временных интервалов обжига минеральной добавки суммарная доля составов, обладающих повышенными или соответствующими контрольному композиту характеристиками, варьируется от 22 до 41 % в зависимости от длительности и от 11 до 45 % – от температуры обжига. Установлено, что увеличение времени обжига глины с 2 до 3–4 часов приводит к расширению диапазона относительных значений прочностных показателей модифицированных цементных композитов с 77,5–115 до 62,5–130 %. Повышение температуры обжига глинежей с 400 до 720°C позволяет изменить допустимый (достижимый) диапазон значений предела прочности при сжатии с 62,5–107,5 до 85–130 %, дальнейшее повышение температуры приводит

к некоторому снижению граничных значений относительного прочностного показателя до 77,5 (нижняя) и 122,5 % (верхняя граница) соответственно.

а



б

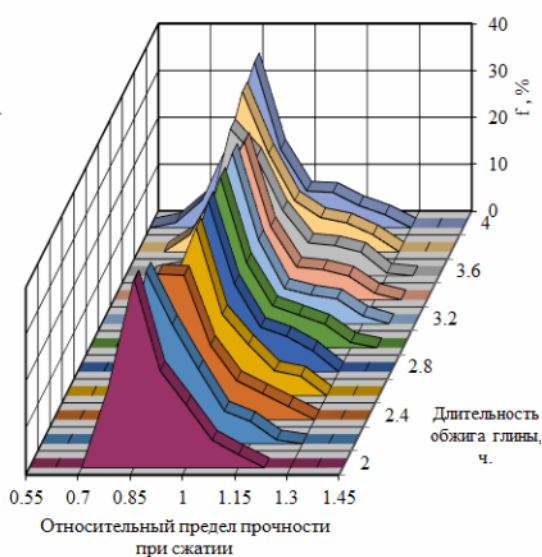
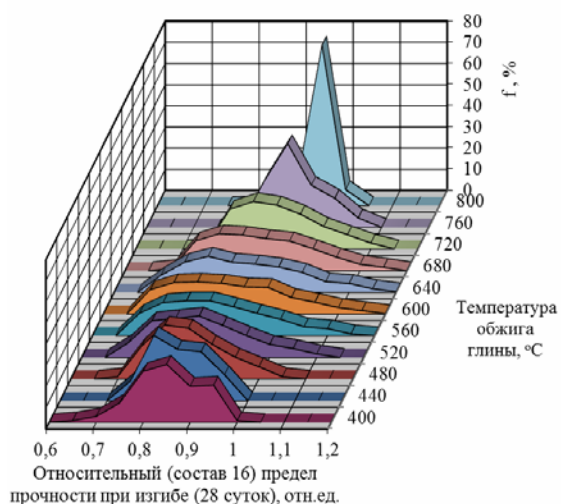


Рис. 3. Полигоны распределения относительного предела прочности при сжатии модифицированных цементных композитов в возрасте 28 суток:
а – от температуры обжига, б – от длительности обжига

Анализ полигонов частот распределения предела прочности на растяжение при изгибе (рис. 4), выполненный на основе ЭС-модели (2), показал, что увеличение температуры обжига с 400 до 680 °С позволяет изменить допустимый (достижимый) диапазон значений относительной прочности с 65–100 до 70–120 %. Дальнейшее повышение температуры приводит к сужению граничных значений относительного прочностного показателя до 85–104 %. Увеличение времени обжига глины с 2 до 4 часов приводит не только к сужению диапазона относительных значений прочностных показателей модифицированных цементных композитов, но и к снижению верхних граничных значений – с 120 % (при 2 часах) до 105 % (при 4 часах).

а



б

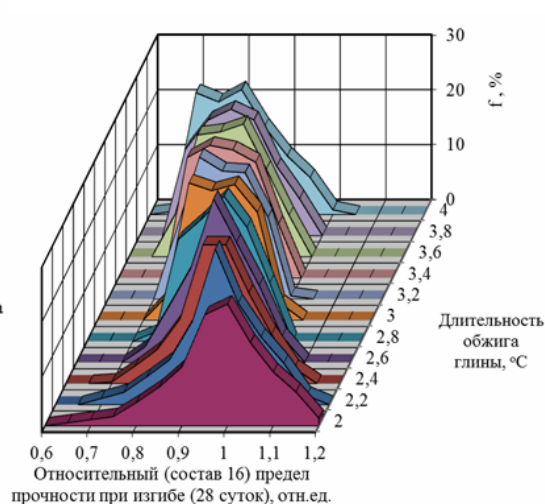


Рис. 4. Полигоны распределения относительного предела прочности на растяжение при изгибе модифицированных цементных композитов в возрасте 28 суток:
а – от температуры обжига; б – от длительности обжига

Дальнейший анализ результатов моделирования проводился на основе изучения областей допустимых решений, представленных на рис. 5 и 6. Выявлено, что предел прочности при сжатии, соответствующий контрольному образцу, может быть обеспечен при любом исследуемом уровне температуры и длительности обжига, а также доле обожженной глины не более 6 % от массы цемента. Требуемые характеристики предела прочности на растяжение при изгибе (не ниже контрольного немодифицированного состава №16) могут быть получены при температуре 480–780 °С, длительности обжига в течение 2–2,75 часов и введении обожженной глины от 2 до 11 % от массы цемента.

Наибольший эффект от применения термоактивированной глины на прочностные характеристики цементных композитов при сжатии и на растяжение при изгибе достигает соответственно 24 % (рис. 5) и 17 % (рис. 6). В первом случае (предел прочности при сжатии) данные показатели достигаются при температуре обжига 620–720 °С в течение 3–3,5 часов; во втором (предел прочности на растяжение при изгибе) – при температуре 600–650 °С и длительности обжига 2 часа.

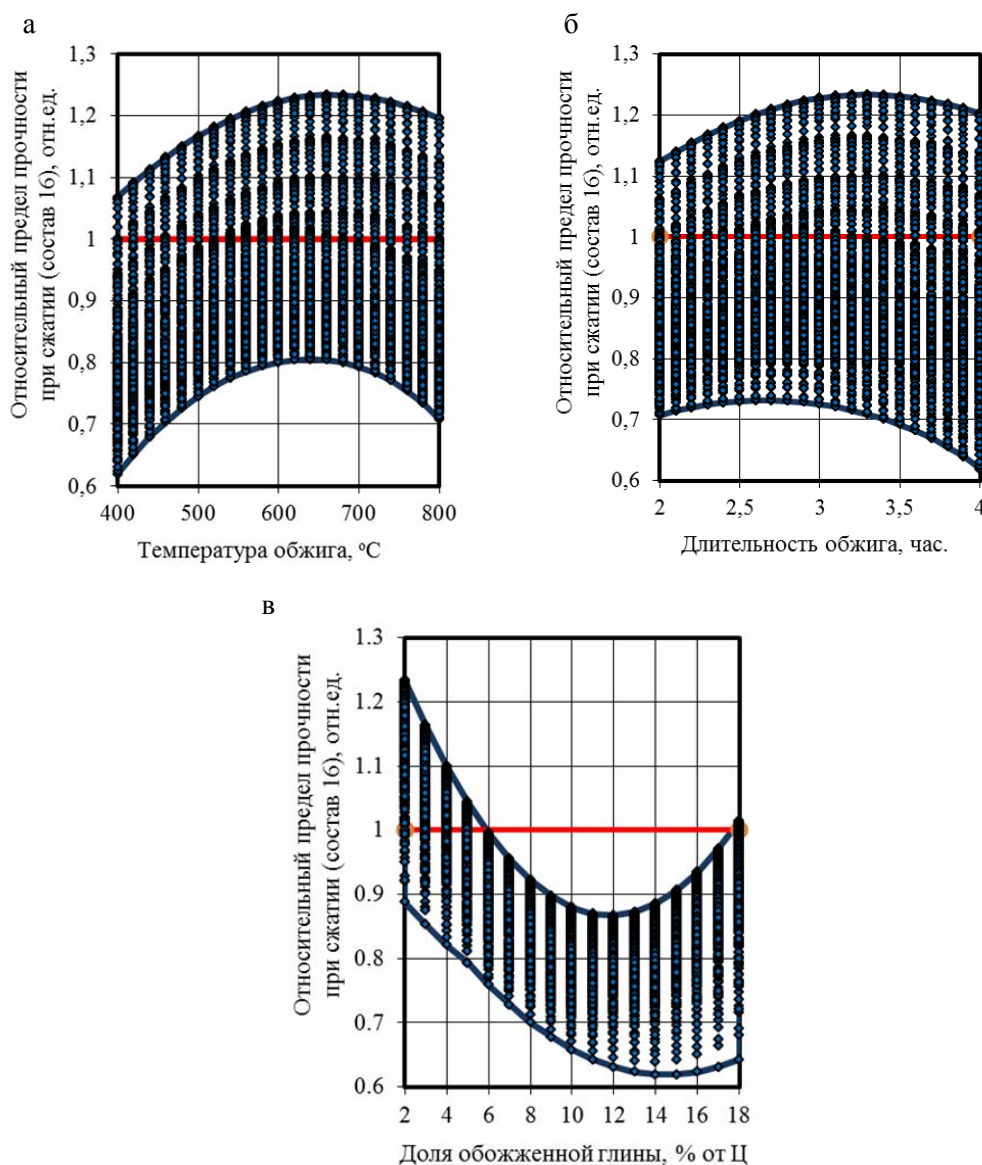


Рис. 5. Области допустимых значений изменения относительного предела прочности при сжатии модифицированных цементных композитов в зависимости от варьируемых факторов

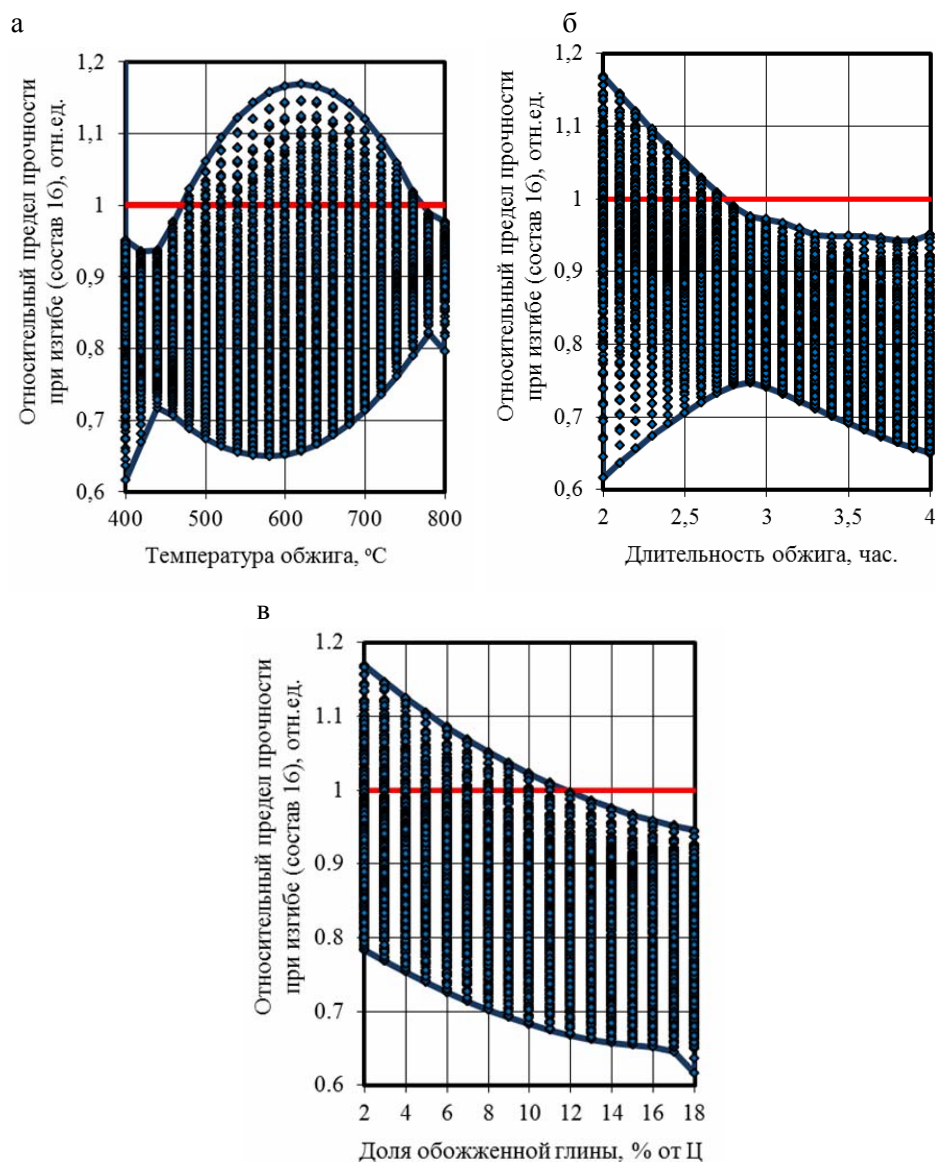


Рис. 6. Области допустимых значений изменения относительного предела прочности на растяжение при изгибе модифицированных цементных композитов в зависимости от варьируемых факторов

По результатам экспериментальных исследований произведена оценка эффективности применения минеральной добавки на основе обожжённой полиминеральной глины на прочностные показатели цементных композитов. Выявлено, что термическая активация глин с низким содержанием каолинита (14,4 %) позволяет увеличивать показатели предела прочности при сжатии и на растяжение при изгибе до 124 % и 117 %. Определены области допустимых решений, показывающие возможный диапазон и объём допустимой области показателей качества (пределов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе) в зависимости от технологии получения и процентного содержания применяемой минеральной добавки. Полученные данные свидетельствуют о перспективности и актуальности направления по разработке бетонов с модифицирующими добавками на основе термоактивированных полиминеральных глин, что позволяет расширить номенклатуру выпускаемых на сегодняшний день модифицированных цементных композитов за счёт более полного использования местной минеральной сырьевой базы.

Список литературы

1. Бондаренко, В.М. Физические основы прочности бетона / В.М. Бондаренко, В.П. Селяев, П.В. Селяев // Бетон и железобетон. – 2014. – № 4. – С. 2–5.
2. Фаликман, В.Р. Новые эффективные высокофункциональные бетоны / В.Р. Фаликман // Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии. – 2011. – № 2. – С. 78–84.
3. Калашников, В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего. Часть 1. Изменение составов и прочности бетонов / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2016. – №1–2. – С. 96–103.
4. Ушеров-Маршак, А.В. Бетоны нового поколения – бетоны с добавками / А.В. Ушеров-Маршак // Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии. – 2011. – № 1. – С. 78–81.
5. Калашников, В.И. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения / В.И. Калашников, О.В. Тараканов // Строительные материалы. – 2017. – № 1–2. – С. 62–67.
6. Низина, Т.А. Анализ комплексного влияния модифицирующих добавок и дисперсного армирования на физико-механические характеристики мелкозернистых бетонов / Т.А. Низина, А.С. Балыков // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №4. – С. 25–33.
7. Захаров, С.А. Высокоактивный метакраолин – современный активный минеральный модификатор цементных систем / С.А. Захаров, Б.С. Калачик // Строительные материалы. – 2007. – № 5. – С. 56–57.
8. Брыков, А.С. Метакраолин / А.С. Брыков // Цемент и его применение. – 2012. – №7–8. – С. 36–40.
9. Дворкин, Л.И. Метакраолин – эффективная минеральная добавка для бетонов / Л.И. Дворкин, В.В. Житковский, О.Л. Дворкин, А.Р. Разумовский // Технологии бетонов. – 2015. – №9–10 (110–111). – С. 21–24.
10. Низина, Т.А. Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны на основе комплексных модифицирующих добавок / Т.А. Низина, А.Н. Пономарев, А.С. Балыков // Строительные материалы. – 2016. – №7. – С. 68–72.
11. Siddigye, R. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete / R. Siddigye, I. Klaus // Applied Clay Science. – 2009. – Vol. 43, № 3–4. – P. 392–400.
12. Sriver, K.L. Hydration of cementation materials, present and future / K.L. Sriver // Cement and concrete research. – 2011. – Vol. 41. – P. 651–665.
13. Рахимова, Н.Р. Использование доменных шлаков и боя керамического кирпича в производстве шлакощелочных вяжущих / Н.Р. Рахимова, Р.З. Рахимов // Экология и промышленность России. – 2008. – №4. – С. 10–12.
14. Лесовик, В.С. Гранулированные шлаки в производстве композиционных вяжущих / В.С. Лесовик, М.С. Агеева, А.В. Иванов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – №3. – С. 29–32.
15. Schulze, S.E. Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementations materials / S.E. Schulze, R. Pierkes, J. Rickert // Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement. – Beijing, China, 2015. – 693 p.
16. Evolution of calcined clays soils as supplementary cementitious materials / L.R. Castello, H.J.F. Hernandez, K.L. Scrivener, M. Antonic // Proceedings of a XII International Congress of the chemistry of cement. Instituto de Ciencias de la Construcción «Eduardo torroja». – Madrid, 2011. – P. 117.
17. Шульце, С.Е. Свойства цементов с прокалёнными глинами в качестве основного компонента / С.Е. Шульце, Й. Рикерт // Цемент и его применение. – 2016. – №1. – С. 152–156.
18. Скибстед, Й. Термическая активация и пуццолановая активность кальцинированных глин для использования в портландцементных с добавками / Й. Скибстед, К.Е. Расмуссен, Н. Гарг // Цемент и его применение. – 2016. – №1. – С. 144–151.

19. Rakhimov, R.Z. Properties of Portland cement paste incorporated with loamy clay / R.Z. Rakhimov, N.R. Rakhimova, A.R. Gaifullin, V.P. Morozov // *Geosystem Engineering*. – 2017. – Vol. 20, №6. – P. 318–325.

20. Гайфулин, А.Р. Влияние добавок глинистых в портландцемент на прочность при сжатии цементного камня / А.Р. Гайфулин, Р.З. Рахимов, Н.Р. Рахимова // *Инженерно-строительный журнал*. – 2015. – № 7 (59). – С. 66–73.

21. Fernandez, R. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite / R. Fernandez, F. Martizena, K.L. Scrivener // *Cement and Concrete Research*. – 2011. – № 41. – P. 113–122.

22. Опыт применения обожжённой глины в качестве минеральной добавки к цементным композитам / В.В. Володин, Т.А. Низина, А.С. Балыков, Д.И. Коровкин, И.С. Козлятников, Д.С. Башкаев, А.А. Григорьева // *Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всеросс. науч.-техн. конф.* – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. – С. 36–42.

23. Ляшенко, Т.В. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении / Т.В. Ляшенко, В.А. Вознесенский. – Одесса: Астропринт, 2017. – 168 с.

References

1. Bondarenko, V.M. Physical basis of concrete strength / V.M. Bondarenko, V.P. Selyaev, P.V. Selyaev // *Concrete and reinforced concrete*. – 2014. – № 4. – P. 2–5.

2. Falikman, V.R. New effective high-performance concretes / V.R. Falikman // *Concrete and reinforced concrete. Equipment. Materials Technology*. – 2011. – № 2. – P. 78–84.

3. Kalashnikov, V.I. The evolution of the development of compositions and changes in the strength of concrete. Concrete present and future. Part 1. Changes in the composition and strength of concrete / V.I. Kalashnikov // *Construction materials*. – 2016. – № 1–2. – P. 96–103.

4. Usherov-Marshak, A.V. Concrete of a new generation – concrete with additives / A.V. Usherov-Marshak // *Concrete and reinforced concrete. Equipment. Materials Technology*. – 2011. – № 1. – P. 78–81.

5. Kalashnikov, V.I. On the use of complex additives in concretes of a new generation / V.I. Kalashnikov, O.V. Cockroaches // *Construction materials*. – 2017. – № 1–2. – P. 62–67.

6. Nizina, T.A. Analysis of the complex effect of modifying additives and disperse reinforcement on the physicomachanical characteristics of fine-grained concretes / T.A. Nizina, A.S. Balykov // *Regional architecture and construction*, 2015. – №4. – P. 25–33.

7. Zakharov, S.A. Highly active metakaolin – a modern active mineral modifier of cement systems / S.A. Zakharov, B.S. Kalachik // *Construction materials*. – 2007. – № 5. – P. 56–57.

8. Brykov, A.S. Metakaolin / A.S. Brykov // *Cement and its application*. – 2012. – №7–8. – P. 36–40.

9. Dvorkin, L.I. Metakaolin – effective mineral additive for concrete / L.I. Dvorkin, V.V. Zhitkovsky, O.L. Dvorkin, A.R. Razumovsky // *Concrete Technology*. – 2015. – №9. – 10 (110–111). – P. 21–24.

10. Nizina, T.A. Fine-grained dispersion-reinforced concrete based on complex modifying additives / T.A. Lowland. A.N. Ponomarev, A.S. Balykov // *Construction materials*. – 2016. – №7. – P. 68–72.

11. Siddigye, R. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete / R. Siddigye, I. Klaus // *Applied Clay Science*. – 2009. – Vol. 43, № 3–4. – P. 392–400.

12. Scrivener, K.L. Hydration of cementation materials, present and future / K.L. Scrivener // *Cement and concrete research*. – 2011. – Vol. 41. – P. 651–665.

13. Rakhimova, N.R. The use of blast-furnace slags and ceramic-brick waste in the production of slag binder / N.R. Rakhimova, R.Z. Rakhimov // *Ecology and Industry of Russia*. – 2008. – №4. – P. 10–12.

14. Lesovik, V.S. Granulated slags in the production of composite binder / V.S. Lesovik, M.S. Ageeva, A.V. Ivanov // Bulletin of Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. – 2011. – №3. – P. 29–32.
15. Schulze, S.E. Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementations materials / S.E. Schulze, R. Pierkes, J. Rickert // Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement. – Beijing, China, 2015. – 693 p.
16. Evolution of calcined clays soils as supplementary cementitious materials / L.R. Castello, H.J.F. Hernandez, K.L. Scrivener, M. Antonic // Proceedings of a XII International Congress of the chemistry of cement. Instituto de Ciencias de la Construcción «Eduardo torroja». – Madrid, 2011. – P. 117.
17. Schulze, S.E. Properties of cements with calcined clays as the main component / S.E. Schulze, J. Rickert // Cement and its application. – 2016. – №1. – P. 152–156.
18. Skibsted, Y. Thermal activation and pozzolanic activity of calcined clays for use in Portland cement with additives / J. Skibsted, K.E. Rasmussen, N. Garg // Cement and its application. – 2016. – №1. – P. 144–151.
19. Rakhimov, R.Z. Properties of Portland cement paste incorporated with loamy clay / R.Z. Rakhimov, N.R. Rakhimova, A.R. Gaifullin, V.P. Morozov // Geosystem Engineering. – 2017. – Vol. 20, №6. – P. 318–325.
20. Gaifulin, A.R. The effect of clay additives in Portland cement on the compressive strength of cement stone / A.R. Gaifulin, R.Z. Rakhimov, N.R. Rakhimova // Engineering and Construction Journal. – 2015. – № 7 (59). – P. 66–73.
21. Fernandez, R. The origin of the calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite / R. Fernandez, F. Martizena, K.L. Scrivener // Cement and Concrete Reserch. – 2011. – № 41. – P. 113–122.
22. Experience of using baked clay as a mineral additive to cement composites / V.V. Volodin, T.A. Nizina, A.S. Balykov, D.I. Korovkin, I.S. Kozlyatnikov, D.S. Bashkayev, A.A. Grigorieva // Long–Eternity of Building Materials, Products and Structures: Materials Vseross. scientific and technical conf. – Saransk: Publishing House Mordov. University, 2018. – P. 36–42.
23. Lyashenko, T.V. Methodology of prescription-technological fields in computer-aided materials science / T.V. Lyashenko, V.A. Woznesensky. – Odessa: Astroprint, 2017. – 168 p.

УДК 691.5

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77**Логанина Валентина Ивановна,**
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: loganin@mai.ru**Фокин Георгий Александрович,**
доктор технических наук, профессор
кафедры «Физика и химия»
E-mail phisik @ pguas. ru*Penza State University of Architecture
and Construction*Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77**Loganina Valentina Ivanovna,**
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Quality
management and construction technologies»
E-mail: loganin@mai.ru**Fokin Georgi Aleksandrovich,**
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Physics and Chemistry»
E-mail phisik @ pguas. ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ВНЕШНЕГО ВИДА ЗАЩИТНО-ДЕКОРАТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ

В.И. Логанина, Г.А. Фокин

Приведены сведения о применении статистических методов управления качеством продукции к анализу процесса получения лакокрасочных покрытий с заданными свойствами. Приведены примеры применения структурно-вероятностного анализа получения покрытий с заданным качеством внешнего вида в зависимости от реологических свойств краски, способа ее нанесения. Рассмотрена схема получения покрытий для каждого метода нанесения: краска с определенными реологическими свойствами – качество окрашиваемой цементной поверхности – защитно-декоративное покрытие. Рассмотрены способы нанесения красок кистью, наливом и пневмоспособом на подложки из цементно-песчаного раствора с пористостью 24 %, 28 %, 32 %. Оценен класс шероховатости поверхности покрытий в соответствии с ISO 1302. Получено соотношение между среднеквадратическими отклонениями для шероховатостей поверхности покрытий и поверхности, подлежащей окрашиванию, что дает возможность обеспечить требуемую вероятность достижения качества внешнего вида покрытий и позволяет выбрать более оптимальный режим окрашивания с целью получения меньшего разброса показателя шероховатости сформированного покрытия, а следовательно, обеспечения гарантированного уровня качества окрашенной поверхности.

Ключевые слова: краска, реологические свойства, качество внешнего вида покрытий, закон распределения

ENSURING THE QUALITY OF THE EXTERNAL TYPE OF VARNISH AND PAINT COATINGS OF CEMENT CONCRETE

V.I. Loganina, G.A. Fokin

The article provides information on the application of statistical methods of product quality management to the analysis of the process of obtaining paint coatings with desired properties. Examples of the use of structural-probabilistic analysis of obtaining coatings with a given appearance quality depending on the rheological properties of the paint and the method of its application are given. A scheme for obtaining coatings for each application method is considered: paint with specific rheological properties – the quality of the painted cement surface – a protective-decorative coating. Methods for applying paint by brush, in bulk and pneumatic on substrates of cement-sand mortar with a porosity of 24 %, 28 %, 32 % are considered. The class of surface roughness of coatings is evaluated in accordance with ISO 1302. The ratio between standard deviations for the roughness of the surface of the coating and the surface to be painted is obtained, which makes it possible to provide the required probability of achieving the quality of the appearance of the coatings and allows to

choose a more optimal staining mode roughness of the formed coating, and, therefore, ensuring a guaranteed quality level of colored surface.

Keywords: paint, rheological properties, the quality of coatings appearance, distribution law

Проведенные ранее исследования установили связь стойкости лакокрасочных покрытий с качеством их внешнего вида [1–3]. Анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что вопросы управления качеством покрытий на пористых цементных подложках еще не получили должного развития. Формирование качества внешнего вида покрытий зависит от реологических свойств краски, способа ее нанесения, качества окрашиваемой поверхности и т.д. [4, 5]. Цементная подложка характеризуется неравномерностью распределения пор по простиранию поверхности, что, несомненно, оказывает влияние на формирование качества внешнего вида покрытий.

Для оценки однородности распределения показателей качества внешнего вида покрытий по простиранию был проведен следующий эксперимент. Красочные составы наносились кистью, наливом и пневмоспособом на подложки пористостью 24 %, 28 %, 32 %. Для исследований применяли эмаль алкидную ПФ-115 вязкостью $\eta_1=0,001$ Па.с, масляную краску МА-15 вязкостью $\eta_1=0,0026$ Па.с, акриловую вододисперсионную вязкостью $\eta_1=0,0347$ Па.с. Качество внешнего вида покрытий оценивалось показателем шероховатости R_a с помощью профилографа TR-100. Всего было проведено по 50 измерений на каждой поверхности. Был оценен класс шероховатости поверхности покрытий в соответствии с ISO 1302 [6] Результаты статистической обработки полученных экспериментальных данных приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Статистические показатели обработки данных выборок

Вид краски	Пористость подложки, %	Среднеквадратическое отклонение σ / размах данных R		
		Способ нанесения		
		Кисть	Налив	Пневматическое
ПФ-115	24	4,11/12,81	1,95/7,33	2,88/10,94
		N6	N5	N6
	28	0,86/3,96	1,63/5,64	1,92/8,61
		N4	N5	N6
	32	1,74/6,96	1,97/7,66	3,32/11,21
		N5	N5	N6
МА-15	24	0,43/1,8	0,53/2,25	0,95/3,68
		N3	N3	N4
	28	1,65/5,95	1,6/6,9	2,94/10,12
		N 5	N 5	N 6
	32	1,23/4,34	1,86/7,41	2,6/10,31
		N4	N 5	N 5
	Ш.П.	2,12/8,12	1,27/5,37	5,61/10,1
		N 5	N 4	N6
	Ш.П.	0,78/2,96	1,19/3,68	1,21/4,52
		N 4	N 4	N 5
Вододисперсионная	24	2,15/7,45	2,52/10,63	-
		N 5	N 5	-
	28	1,81/7,78	2,17/7,7	-
		N 5	N 5	-
	32	2,11/9,56	2,63/10,39	-
		N 5	N 6	-
	Ш.П.	1,02/4,46	1,05/4,1	-
		N 4	N 4	-

П р и м е ч а н и е : Ш.П. – шпаклеванная подложка.

Установлено, что при нанесении краски ПФ-115 кистью на подложку с пористостью 24 % размах значений шероховатости R составляет до 12,81 мкм, а краски МА-15 – до 5,95 мкм [7, 8]. Размах между показателями шероховатости R_a поверхности покрытий на основе краски ПФ-115 на зашпаклеванной поверхности составляет в зависимости от способа нанесения 1,8–3,68 мкм. Класс шероховатости поверхности покрытий составляет N3–N6.

Такая неоднородность показателей шероховатости, несомненно, будет оказывать влияние на стойкость покрытий в процессе эксплуатации. С целью обеспечения качества внешнего вида покрытий предлагается подход, основанный на применении методов управления качеством на этапах выбора краски и ее нанесения [9–11].

Исходя из структурно-вероятностного анализа, рассматривается схема получения покрытий для каждого метода нанесения: краска с определенной вязкостью – качество окрашиваемой цементной поверхности – защитно-декоративное покрытие. Введем обозначения: событие A – на выходе будет получено покрытие, соответствующее требованиям по внешнему виду (шероховатость покрытия менее установленного критического предела); событие A_1 – обеспечиваются необходимые требования к реологическим свойствам краски, событие A_2 – обеспечивается требования к качеству поверхности, подлежащей окрашиванию (шероховатость поверхности, подлежащей окрашиванию, менее установленного критического предела).

В силу независимости событий A_1 и A_2 качество покрытия будет гарантировано при выполнении условия

$$P(A) = P(A_1)P(A_2) \geq \gamma, \quad (1)$$

где $P(A)$ – вероятность события A ; $P(A_1)$ – вероятность события A_1 ; $P(A_2)$ – вероятность события A_2 ; γ – заданный уровень надёжности покрытия по показателю «шероховатость».

На стадии проектирования все события принимаются равновероятными, т.е.

$$P(A_1) = P(A_2) = P, \quad (2)$$

что приводит к неравенству вида

$$P^2 \geq \gamma. \quad (3)$$

Из выражения (3) можно рассчитать минимально допустимую вероятность обеспечения требуемого уровня качества реологических свойств краски $P(A_1)$ и окрашиваемой подложки $P(A_2)$. Результаты расчета показывают, что при $\gamma=0,95$ $P(A_1)=P(A_2)=0,975$.

Учитывая, что в поле допуска параметры шероховатости поверхности покрытий распределяются по нормальному закону, и принимая во внимание трехсигмовые отклонения в поле допуска, можно получить соотношение между среднеквадратическими отклонениями для шероховатостей поверхности покрытий $\sigma_{\text{шер}}^{\text{покp}}$ и поверхности, подлежащей окрашиванию $\sigma_{\text{шер}}^{\text{подл}}$:

$$\sigma_{\text{шер}}^{\text{подл}} = \frac{6\sigma_{\text{шер}}^{\text{покp}}}{2u_p}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{шер}}^{\text{подл}}$ – среднеквадратическое отклонение шероховатости поверхности, подлежащей окрашиванию, мкм; $\sigma_{\text{шер}}^{\text{покp}}$ – среднеквадратическое отклонение шероховатости

поверхности покрытия, мкм; u_p – квантиль нормального распределения уровня $P(A_2)$;

В этом случае найденные величины $\sigma_{\text{шер}}^{\text{подл}}$ дают возможность обеспечить требуемую вероятность достижения качества внешнего вида покрытий.

В табл. 2 приведены результаты расчета значений среднеквадратического отклонения $\sigma_{\text{пор}}$ в соответствии с (4) и класс шероховатости поверхности подложки, обеспечивающий с заданной вероятностью $\gamma = 0,95$ класс шероховатости поверхности покрытий.

Установлено, что, например, класс шероховатости поверхности покрытия N8 не может быть обеспечен применением подложки с шероховатостью, характеризуемой классом выше N 9.

Т а б л и ц а 2

Зависимость класса шероховатости поверхности покрытий
от класса шероховатости поверхности подложки

Класс шероховатости для покрытия по ISO 1302	Среднеквадратическое отклонение шероховатости, мкм	Расчетное значение среднеквадратического отклонения шероховатости подложки, $\sigma_{\text{пор}}$, мкм	Класс шероховатости поверхности подложки, обеспечивающий с вероятностью 0,95 получение соответствующего класса поверхности покрытия по ISO 1302
N12	325	497,44	-
N11	162,5	248,72	N12
N10	81,25	124,36	N11
N 9	40,616	62,168	N 10
N 8	20,3	31,071	N 9
N 7	10,233	15,66	N 8
N 6	5,2	7,959	N 7
N 5	2,6	3,979	N 6
N 4	1,3	1,989	N 5
N 3	0,65	0,99489	N 4
N 2	0,325	0,497	N 3
N 1	0,1625	0,248	N 2

Приведенные в табл. 2 значения среднеквадратического отклонения шероховатости поверхности, подлежащей окрашиванию, позволяют выбрать более оптимальный режим окрашивания с целью получения меньшего разброса показателя шероховатости сформированного покрытия, а следовательно, обеспечения гарантированного уровня качества окрашенной поверхности.

Список литературы

1. Карякина, М.М. Лакокрасочные материалы для защиты сельскохозяйственной техники / М.М. Карякина. – М.: Химия, 1985. – 112 с.
2. Карякина, М.И. Физико-химические основы процессов формирования и старения покрытий / М.М. Карякина. – М.: Химия, 1980. – 216 с.
3. Сухарева, Л.А. Долговечность полимерных покрытий / Л.А. Сухарева. – М.: Химия, 1984. – 240 с.
4. Орентлихер, Л.П. Защитно-декоративные покрытия бетонных и каменных стен зданий / Л.П. Орентлихер, В.И. Логанина. – М.: Стройиздат, 1992.

5. Логанина, В.И. Оценка декоративных свойств лакокрасочных покрытий / В.И. Логанина, В.А. Смирнов, С.Н. Кислицына, О.А. Захаров, В.Г. Христолюбов // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2004. – № 8. – С. 10–12.
6. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
7. Ноулер, Л. Статистические методы контроля качества продукции / Л.Ноулер, Дж.Хауэлл, Д.Толд, Э.Коулмэт, О.Моун, В.Ноулер. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 95 с.
8. Статистические методы повышения качества: пер. с англ. / под ред. Х.Кумэ. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 304 с.
9. Шиндовский, Э. Статистические методы управления качеством / Э. Шиндовский, О. Шюрц. – М.: Мир, 1976.
10. Логанина, В.И. К вопросу о регулировании технологических процессов производства бетона / В.И. Логанина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 3–4 (603–604). – С. 42–45.
11. Логанина, В.И. К вопросу о системе контроля качества на предприятиях стройиндустрии / В.И. Логанина, Т.В. Учаева // Региональная архитектура и строительство. – 2010. – № 1. – С. 31–33.

References

1. Karyakina, M.M. Paints and varnishes for the protection of agricultural equipment / M.M Karyakina. – M.: Chemistry, 1985. – 112 p.
2. Karyakina, M.I. Physical and chemical bases of the processes of formation and aging of coatings / M.M Karyakina. – M.: Chemistry, 1980. – 216 p.
3. Suhareva, L.A. Durability of polymeric coatings / L.A. Suhareva. – M.: Chemistry, 1984. – 240 p.
4. Orentlikher, L.P. Protective and decorative coatings of concrete and stone walls of buildings. Reference manual / L.P. Orentlikher, V.I. Loganina. – M.: Stroyizdat, 1992.
5. Loganina, V.I. Evaluation of the decorative properties of paint coatings / V.I. Loganina, V.A. Smirnov, S.N. Kislitsyna, O.A. Zakharov, V.G. Khristolyubov // Paintwork materials and their application. – 2004. – № 8. – P. 10–12.
6. GOST 2789-73. Surface roughness. Parameters and characteristics.
7. Nowler, L. Statistical methods of product quality control / L.Nowler, J.Howell, D.Told, E.Coulmat, O.Mone, V.Nowler. – M.: Publishing house of standards. 1989. – 95 p.
8. Statistical methods of quality improvement: trans. from English / ed. H. Kume. – M.: Finance and Statistics, 1990. – 304 p.
9. Shindovsky, E. Statistical methods of quality management / E. Shindovsky, O.Shyurts. – M.: Mir, 1976.
10. Loganina, V.I. On the issue of regulation of technological processes of concrete production / V.I. Loganina // News of higher educational institutions. Building. – 2009. – No. 3–4 (603–604). – P. 42–45.
11. Loganina, V.I. On the issue of the quality control system in the construction industry enterprises / V.I. Loganina, T.V. Uchaeva // Regional architecture and engineering. – 2010. – No. 1. – P. 31–33.

УДК 691.5

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Логанина Валентина Ивановна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: loganin@mai.ru

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40

Аверин Игорь Александрович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Нано- и микроэлектроника»
E-mail: nano-micro@mail.ru

Карманов Андрей Андреевич,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Нано- и
микроэлектроника»
E-mail: nano-micro@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Loganina Valentina Ivanovna,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Quality
management and construction technologies»
E-mail: loganin@mai.ru

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.

Averin Igor Aleksandrovich,
Doctor of Technical Sciences, Professor of the
Department «Nano-and microelectronics»
E-mail: nano-micro@mail.ru

Karmanov Andrey Andreevich,
Candidate of Physics and Mathematics
Sciences, Associate Professor of the
Department «Nano-and microelectronics»
E-mail: nano-micro@mail.ru

ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СИЛИКОНОВОЙ СМОЛЫ

В.И. Логанина, И.А. Аверин, А.А. Карманов

Приведены результаты исследования структуры антиобледенительного покрытия на основе силиконовой смолы. Методом ИК-спектроскопии изучена химическая структура покрытий с применением гидрофобного наполнителя аэросила R-972. Показано, что взаимодействие силиконовой смолы и аэросила обусловлено физическим механизмом взаимодействия аэросила и связующего.

Ключевые слова: покрытие, супергидрофобность, краевой угол смачивания, инфракрасная спектроскопия

ESTIMATION OF THE STRUCTURE OF ANTI-EMERGENCY COATING ON THE BASIS OF SILICONE RESIN

V.I. Loganina, I.A. Averin, A.A. Karmanov

The results of the study of the structure of an anti-icing coating based on silicone resin are presented. The chemical structure of the coatings using the hydrophobic filler of aerosil R-972 was studied by IR spectroscopy. It is shown that the interaction of silicone resin and aerosil is due to the physical mechanism of interaction of aerosil and the binder.

Keywords: coating, superhydrophobicity, wetting angle, infrared spectroscopy

Введение. Одной из актуальных проблем жилищно-коммунального хозяйства является обледенение крыш жилых и общественных зданий. Один из путей решения этой проблемы – это применение антиобледенительной композиции [1–4]. На рынке антиобледенительных композиций представлены составы «ПРОЛ», НИВАСАР-300, ULTRA GUARD СТОПЛЕД, ОС – 12-03, «Slider», «Baltek-Antiice» и др. [5–7].

Несмотря на большое количество предлагаемых композиций, проблема борьбы с обледенением остается актуальной. В ряде случаев покрытия, обладающие супергидрофобным эффектом, после определенного срока эксплуатации теряют данный эффект

[8–10]. Проведенные нами исследования позволили рекомендовать состав для антиобледенительного покрытия, содержащий кремнийорганическую смолу SILRES® MSE 100 и аэросил марки R 972 [11]. Результаты проведенных исследований показали, что после смачивания в течение 72 часов покрытия на основе силиконовой смолы SILRES® MSE100 5 %-й и 10 %-й концентраций сохранили супергидрофобный эффект – краевой угол смачивания на растворной подложке составил более 150 град. Адгезия покрытий к подложке, оцененная методом решетчатого надреза в соответствии с ГОСТ 15140-78 «Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии», после увлажнения составила 1 балл.

После нанесения состава на профнастил МП-20 из оцинкованной стали с полимерным покрытием и его последующего отверждения было установлено, что капли воды легко скатываются с поверхности. Угол скатывания составляет 12 град. После увлажнения профнастила с антиобледенительным покрытием супергидрофобный эффект сохраняется.

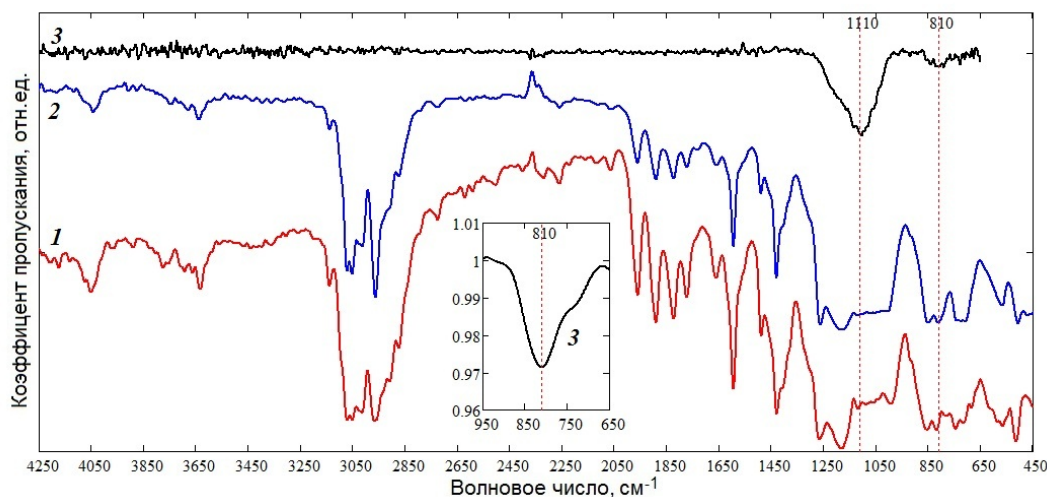
Методика исследования

В качестве пленкообразователя применяли силиконовую смолу SILRES® MSE 100, в качестве наполнителя – аэросил марки R 972 с плотностью $\rho=2360 \text{ кг/м}^3$, размерами частиц 16 нм и удельной поверхностью $S_{\text{уд}}=12000 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Степень гидрофобности оценивали по величине краевого угла смачивания (θ°) капли воды с покрытия (ϕ_0). Измерения проводились на ИК-Фурье-спектрометре ФСМ1201 (ООО «Инфраспек», Россия) с использованием приставки многократного нарушения полного внутреннего отражения МНПВО36 с призмой ZnSe и приставки зеркального отражения ПЗО10 [12] в спектральном диапазоне $650\text{--}3950 \text{ см}^{-1}$ с разрешением 4 см^{-1} . При этом осуществлялась подготовка образцов, заключающаяся в нанесении SILRES MSE 100 на подложки из алюминиевой фольги, которая выступала в качестве образца сравнения. Образцы аэросила, представляющие собой ультрадисперсный порошок, измерялась в рамках метода МНПВО в спектральном диапазоне $650\text{--}4250 \text{ см}^{-1}$ с разрешением 4 см^{-1} без дополнительной пробоподготовки.

Результаты исследований

На рисунке представлены результаты спектроскопических исследований кремнийорганического связующего типа SILRES MSE 100 с добавкой аэросила и без нее, а также для сопоставления отдельно приведен ИК-спектр пропускания аэросила.



ИК-спектры пропускания:

- 1 – кремнийорганического связующего SILRES MSE 100; 2 – кремнийорганического связующего с добавкой аэросила; 3 – аэросила

Анализ представленных ИК-спектров показывает, что порошок аэросила является химически чистым (в рамках разрешения метода) диоксидом кремния, для которого

характерно наличие колебательных мод при 810 и 1110 см^{-1} . Первая из мод отвечает скручивающим колебаниям Si_2O , а вторая может быть достоверно отнесена к валентным симметричным и ассиметричным колебаниям мостикового кислорода Si-O-Si связей.

По данным спектроскопических исследований, анализируемое связующее представляет собой смесь метиловых эфиров поликремниевых кислот, для которых характерно наличие большого числа полос и пиков поглощения, полная идентификация которых затруднена. Так, наблюдаемые в спектральном диапазоне 2780–3160 см^{-1} колебательные моды, с одной стороны, интерпретируются как отвечающие валентным симметричным и ассиметричным колебаниям CH_2 и CH_3 групп в углеродном скелете эфиров, а с другой – соответствуют Si-O- CH_3 группе, чувствительной к гидролизу. Наличие на ИК-спектрах полос поглощения при 1650 и 3640 см^{-1} , характеризующих деформационные и валентные колебания O-H групп соответственно, указывает на остаточное содержание в связующем воды и простых спиртов. Моды при 1780, 1830, 1900 и 1970 см^{-1} , характеризующие валентные колебания C=O связей, а также полоса поглощения при 1600 см^{-1} , отвечающая валентным колебаниям C=C связей, указывают на присутствие в структуре SILRES MSE 100 циклических ангидридов, выполняющих водоотнимающие функции. Обобщенные результаты анализа ИК-спектров представлены в таблице.

Интерпретация ИК-спектров кремнийорганического связующего SILRES MSE 100 с добавкой аэросила

Положение линий поглощения, см^{-1}	Интерпретация
510	Продольные валентные колебания мостикового кислорода Si-O-Si
570	Деформационные колебания O-C=O
740	Деформационные колебания R-O-H
810	Скручивающие колебания Si_2O , деформационные колебания Si-O- CH_3 группы, чувствительной к гидролизу
1010-1140	Валентные симметричные и ассиметричные колебания Si-O-Si
1190	Валентные колебания C-O
1270	Деформационные колебания C-O-H
1435, 1495	Деформационные ассиметричные колебания CH_3 , ножничные CH_2
1600	Валентные колебания C=C
1650	Деформационные колебания O-H
1780, 1830, 1900, 1970	Валентные симметричные и ассиметричные колебания C=O
2360	Атмосферный CO_2
2780-3160	Валентные симметричные и ассиметричные CH_2 и CH_3 , Si-O- CH_3 группы, чувствительной к гидролизу
3640, 3770	Валентные колебания O-H
4050	Валентные колебания Si-OH группы, чувствительной к гидролизу

Введение добавки аэросила в структуру кремнийорганического связующего SILRES MSE 100 не приводит к значительному изменению его качественного состава, о чем можно судить по практически идентичным ИК-спектрам пропускания (см. рисунок). При этом новые типы колебаний, отвечающие химическому связыванию SiO_2 и кремнийорганики, не наблюдаются, что, по всей видимости, обусловлено физическим механизмом взаимодействия аэросила и связующего. Однако наблюдаемое на ИК-спектрах уменьшение интенсивности пиков поглощения при 1650 и 3640 см^{-1} ,

а также в спектральном диапазоне 1750–2000 см⁻¹, позволяет сделать вывод о некотором влиянии аэросила на процесс конденсаций SILRES MSE 100, в частности на удаление из его структуры воды, простых спиртов, а также циклических ангидридов.

Список литературы

1. Шилова, О.А. Золь-гель синтез и гидрофобные свойства антифрикционных покрытий для использования в высокооборотных минитурбогенераторах / О.А. Шилова, О.И. Проскурина, В.Н. Антипов, Т.В. Хамова, Н.Е. Есипова, К.Э. Пугачев, Е.Ю. Ладилина, И.Ю. Кручинина // Физика и химия стекла. – 2014. – Т. 40, № 3. – С. 419–425.
2. Бойнович, Л.Б. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение / Л.Б. Бойнович, А.М. Емельяненко // Успехи химии. – 2008. – Т. 77, № 7. – С. 619–638.
3. Nosonovsky, M. Superhydrophobic Surfaces and Emerging Applications: Nonadhesion, Energy, Green Engineering / M. Nosonovsky, B. Bhushan // Current Opinions Coll. Interface Sci. – 2009. – No 14. – P. 270–280.
4. Venkateswara Rao, A. Preparation of MTMS based transparent superhydrophobic silica films by sol-gel method / A. Venkateswara Rao, S.S. Lathe, D.Y. Nadargi, H. Hirashima, V. Ganesan // J. Colloid Interf. Sci. – 200. – V. 332, No 2. – P. 484–490.
5. www.verholaz.net 2006-2015
6. <http://ultra-ever-dry.info/katalog/>
7. <https://www.r1812.ru/>
8. Rajiv, S. Long-term-durable anti-icing superhydrophobic composite coatings / S. Rajiv, S. Kumaran, M. Sathish // Journal Of Applied Polymer Science. – 2019. – Vol. 136, issue 7. – Номер статьи: 47059
9. Shunli, Zheng. Durable Waterborne Hydrophobic Bio-Epoxy Coating with Improved Anti-Icing and Self-Cleaning Performance / Shunli Zheng, Bellido-Aguilar, Daniel Angel; Wu Xinghua // ACS sustainable chemistry & engineering. – 2019. – Vol.7, issue 1. – P. 641–649
10. Qiu, RX (Qiu, Rongxian) Enhanced anti-icing and anti-corrosion properties of wear-resistant superhydrophobic surfaces based on Al alloys / Qiu RX (Qiu Rongxian)¹¹; Li ZX (Li Zhongxin)¹¹; Wu ZL (Wu Zhilin) // MATERIALS RESEARCH EXPRESS. – 2019. – Vol.6, issue 4. – Article 045059. – DOI: 10.1088/2053-1591/aatdf1
11. Логанина, В.И. Выбор концентрации полимера при разработке рецептуры состава для антиобледенительного покрытия / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, К.А. Сергеева // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2019. – № 1(8). – С.19–22.
12. Логанина, В.И. Состав полисиликатного связующего для силикатных красок / В.И. Логанина, И.А. Аверин, Е.Б. Мажитов А.А. Карманов // Академический Вестник УРАЛНИИПроект РААСН. – 2017. – №4. – С.69–72.

References

1. Shilova, O.A. Sol-gel synthesis and hydrophobic properties of anti-friction coatings for use in high-speed mini-turbine generators / O.A. Shilova, O.I. Proskurina, V.N. Antipov, T.V. Khamova, N.E. Esipova, K.E. Pugachev, E.Yu. Ladilina, I.Yu. Kruchinina // Physics and Chemistry of Glass. – 2014. – V. 40, No. 3. – P. 419–425.
2. Boynovich, L.B. Hydrophobic materials and coatings: principles of creation, properties and application / L.B. Boynovich, A.M. Emelianenko // Chemistry Advances. – 2008. – Vol. 77, No. 7. – P. 619–638.
3. Nosonovsky, M. Superhydrophobic Surfaces and Emerging Applications: Nonadhesion, Energy, Green Engineering / M. Nosonovsky, B. Bhushan // Current Opinions Coll. Interface Sci. – 2009. – No 14. – P. 270–280.

4. Venkateswara Rao, A. Preparation of MTMS based transparent superhydrophobic silica films by sol-gel method / A. Venkateswara Rao, S.S. Latthe, D.Y. Nadargi, H. Hirashima, V. Ganesan // J. Colloid Interf. Sci. – 200. – V. 332, No 2. – P. 484–490.
5. www.verholaz.net 2006-2015
6. <http://ultra-ever-dry.info/katalog/>
7. <https://www.rl812.ru/>
8. Rajiv, S. Long-term-durable anti-icing superhydrophobic composite coatings / S. Rajiv, S. Kumaran, M. Sathish // Journal Of Applied Polymer Science. – 2019. – Vol. 136, issue 7. – Номер статьи: 47059
9. Shunli, Zheng. Durable Waterborne Hydrophobic Bio-Epoxy Coating with Improved Anti-Icing and Self-Cleaning Performance / Shunli Zheng, Bellido-Aguilar, Daniel Angel; Wu Xinghua // ACS sustainable chemistry & engineering. – 2019. – Vol.7, issue 1. – P. 641–649
10. Qiu, RX (Qiu, Rongxian) Enhanced anti-icing and anti-corrosion properties of wear-resistant superhydrophobic surfaces based on Al alloys / Qiu RX (Qiu Rongxian)¹¹; Li ZX (Li Zhongxin)¹¹; Wu ZL (Wu Zhilin) // MATERIALS RESEARCH EXPRESS. – 2019. – Vol.6, issue 4. – Article 045059. – DOI: 10.1088/2053-1591/aatdfl
11. Loganina, V.I. The choice of polymer concentration in the development of a formulation for anti-icing coating / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, K.A. Sergeeva // Bulletin PGUAS: construction, science and education. – 2019. – № 1 (8). – P.19–22.
12. Loganina, V.I. Composition of polysilicate binder for silicate paints / V.I. Loganina, I.A. Averin, E.B. Mazhitov, A.A. Karmanov // Academic Bulletin URALNIIproekt RAACS. – 2017. – No.4. – P.69–72.

УДК 691.5

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8412) 48-74-77

Логанина Валентина Ивановна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: loganin@mai.ru

Фокин Георгий Александрович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Физика и химия»
E-mail phisik @ pguas. ru

Южная компания НПЗ, Басра,
Министерство нефти, Ирак

Аль Саиди Бассам Шариф Денеф,
кандидат технических наук, главный инженер
E-mail: alsaedibassam@yahoo.com

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Loganina Valentina Ivanovna,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Quality
management and construction technologies»
E-mail: loganin@mai.ru

Fokin Georgi Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Physics and Chemistry»
E-mail phisik @ pguas. ru

*South Refineries Company, Ministry of Oil,
Iraq*

Al Saedi Bassam Shareef Deneef,
Candidate of Sciences, Chief Engineer
E-mail: alsaedibassam@yahoo.com

ОРГАНОМИНЕРАЛЬНАЯ ДОБАВКА НА ОСНОВЕ ГЛИН С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ МОНТМОРИЛЛОНИТА

В.И. Логанина, Аль Саиди Бассам Шариф Денеф, Г.А. Фокин

Приведены сведения о технологии получения органоминеральной добавки, предназначенной для использования в лакокрасочных материалах, сухих строительных смесях, тампонажных растворах. Показано, что модифицированная глина имеет более тонкодисперсную структуру по сравнению с естественной глиной. Установлено, что модифицированная глина хорошо диспергируется в воде: увеличивается содержание мелких фракций и уменьшается содержание крупных фракций. Выявлено, что адсорбция органической добавки способствует гидрофилизации поверхности глины.

Ключевые слова: глина, органическая добавка, адсорбция, диспергируемость

ORGANOMINERAL ADDITIVE BASED ON CLAY WITH INCREASED CONTENT OF MONTMORILLONITE

V.I. Loganina, Al Saedi Bassam Shareef Deneef, G.A. Fokin

The article provides information on the technology of obtaining organomineral additives for paints, dry construction mixtures, cement slurries. It is shown that the modified clay has a more finely dispersed structure in comparison with natural clay. It is established that the modified clay is well dispersed in water: the content of fine fractions increases and the content of large fractions decreases. It is revealed that the adsorption of the organic additive contributes to the hydrophilization of the clay surface.

Keywords: clay, organic additive, adsorption, dispersibility

Для улучшения реологических и технологических свойств отделочных составов в их рецептуру вводятся тиксотропные добавки, одними из которых являются бентоны [1–3]. Единственным аналогом зарубежных бентонов является органобентонит [4]. В России органобентонит применяется в различных отраслях промышленности: в производстве лакокрасочных материалов, при добыче нефти и газа и т.д. [5–8]. Однако объем выпуска органобентонита в России является недостаточным из-за ограниченности запасов бентонитовых (монтмориллонитовых) глин. В 2000 году ООО «Консит-А» впервые в России организовало выпуск органобентонитов. Органобентонит является продуктом взаимодействия бентонита и четвертичной аммониевой соли.

В Поволжье имеются большие запасы глины, которые могут служить сырьем для производства органоминеральных добавок. При разработке органоминеральной добавки использовалась глина с повышенным содержанием монтмориллонита (месторождения Лягушовское, Камешкирское Пензенского региона) (табл. 1). Химический состав глин представлен в табл. 2.

Т а б л и ц а 1

Показатели дисперсности глин

Месторождение глины	Значение удельной поверхности, $S_{уд}$, м ² /кг	Средний диаметр частиц, мкм
Камешкирское	1200	1,96
Лягушовское	1288	1,83

Т а б л и ц а 2

Химический состав глин

Химическое соединение	Содержание химических соединений, %	
	Камешкирское	Лягушовское
SiO ₂	75,41	65,50
Al ₂ O ₃	11,04	9,54
Fe ₂ O ₃	6,61	7,72
Прочие	6,94	15,46

При разработке органоминеральной добавки в качестве органического компонента применялись добавки ОП-4, ОП-7, ОП-10, сульфанол, Melflux марки 1641 F, Melment марки F 15G [9, 10]. Концентрацию пластификатора устанавливали по изменению поверхностного натяжения раствора пластификатора, которое определяли капельным методом и вычисляли по формуле

$$\sigma_{p-ра} = \sigma_v \frac{n_v}{n}, \quad (1)$$

где σ_v – поверхностное натяжение воды, Дж/м²; n_v – количество капель воды в 1 мл; n – количество капель раствора в 1 мл.

В качестве эталонной жидкости использовалась дистиллированная вода с плотностью $\rho_m^{20^\circ C} = 0,9982$ г/см³ и поверхностным натяжением $\sigma^{20^\circ C} = 72,75$ мДж/м². Оптимальная концентрация пластификатора устанавливалась при $\sigma_{p-ра} = \text{const}$.

Установлено, что значение поверхностного натяжения остается постоянным при превышении концентрации добавок сульфанола более 0,2 %, ОП-10 и ОП-7 – более 0,5 %, ОП-4 – более 2 % и составляет соответственно $\sigma = 24,2$ Дж/м², $\sigma = 28,8$ Дж/м², $\sigma = 29,1$ Дж/м² и $\sigma = 27,0$ Дж/м², Melment F 15G $\sigma = 64,7$ Дж/м², Melflux 1641 F $\sigma = 60,2$ Дж/м² (рис. 1–3).

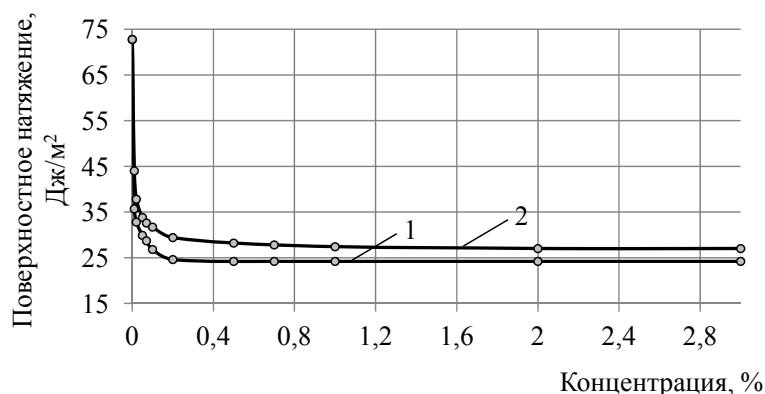


Рис. 1. Зависимость поверхностного натяжения раствора пластификатора от концентрации:
1 – сульфанола; 2 – ОП-4

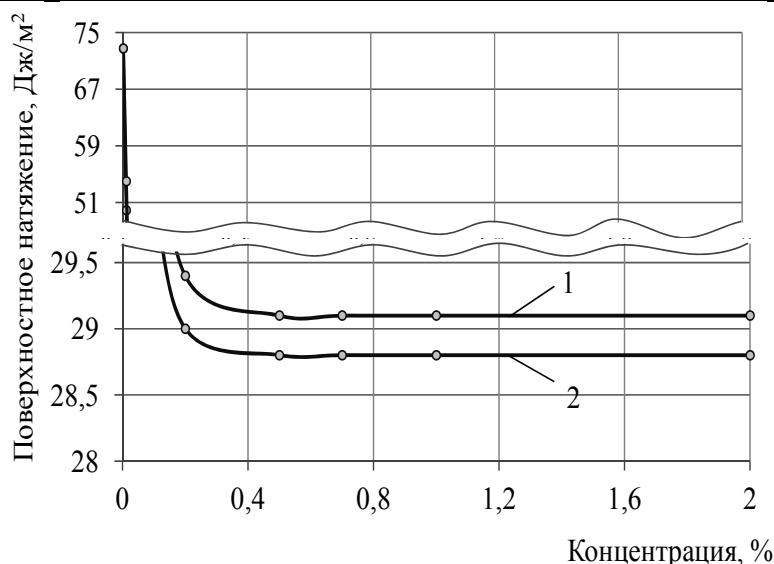


Рис. 2. Зависимость поверхностного натяжения раствора от концентрации добавок:
1 – ОП-7; 2 – ОП-10

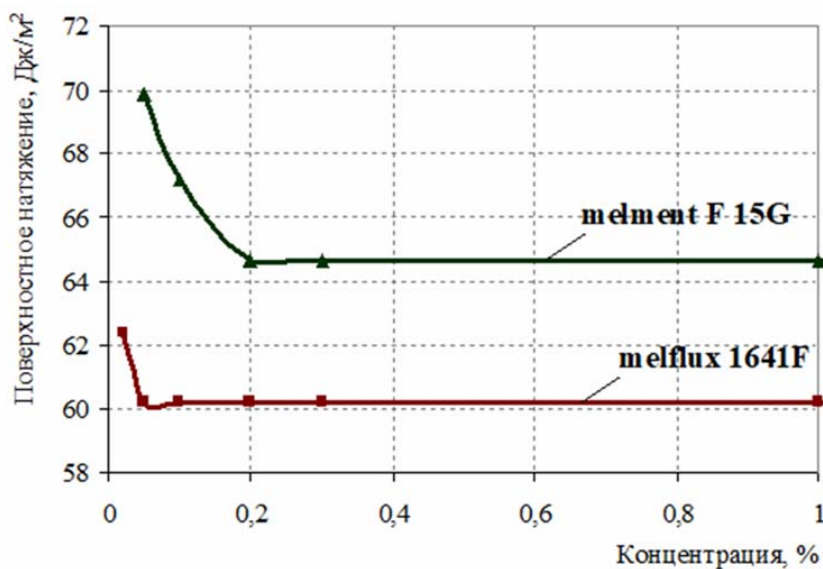


Рис. 3. Зависимости поверхностного натяжения от концентрации добавки в воде

Для определения величины адсорбции органического компонента на поверхности глины в раствор добавки вводилась глина. При адсорбционном равновесии значение адсорбции добавки сульфанола составляет $A = 0,733 \cdot 10^{-4}$ кг/м² при концентрации раствора 0,1 %, а при концентрации раствора 0,02 % $A = 0,158 \cdot 10^{-4}$ кг/м² [11]. Значение адсорбции добавки ОП-4 составляет $A = 5,375 \cdot 10^{-4}$ кг/м² при концентрации раствора ПАВ 0,7 %. Аналогичные результаты наблюдались при исследовании адсорбции на глинах добавок ОП-7 и ОП-10 (рис. 4–5). Установлено, что полная адсорбция добавок ОП-7 и ОП-10 на глинах наступает через 10 часов при 0,02 %-й концентрации растворов и через 48 часов – при 0,2 и 0,5 %-й концентрации.

Результаты исследований (см. рис. 4–5) свидетельствуют, что добавка ОП-10 по сравнению с добавкой ОП-7 обладает большей адсорбционной способностью. Так, значения адсорбции при концентрации растворов ОП-7 и ОП-10, равной 0,5 %, составили $A = 2,258 \cdot 10^{-4}$ кг/м² и $A = 2,517 \cdot 10^{-4}$ кг/м², для камешкирской глины $A = 2,442 \cdot 10^{-4}$ кг/м² и $A = 2,992 \cdot 10^{-4}$ кг/м², для лягушовской глины $A = 2,375 \cdot 10^{-4}$ кг/м² и $A = 2,817 \cdot 10^{-4}$ кг/м².

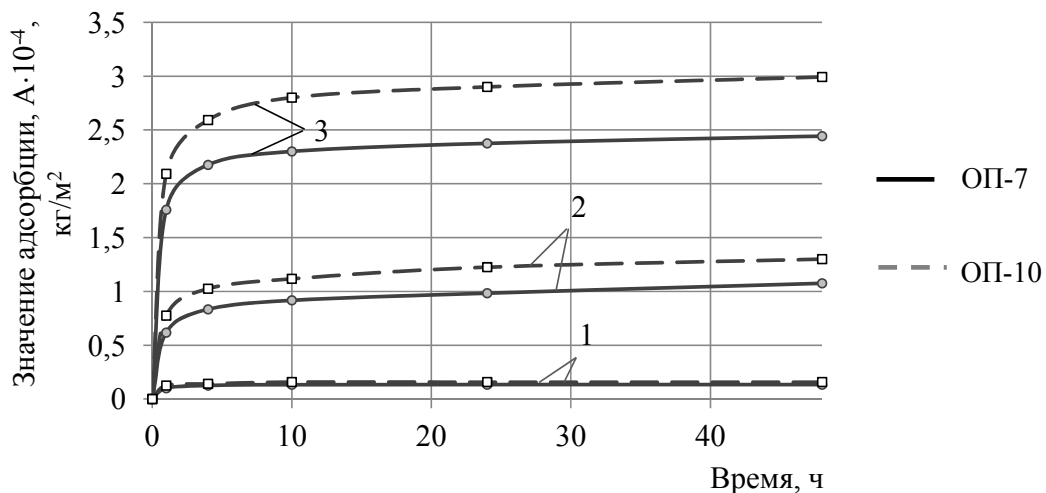


Рис. 4. Кинетика адсорбции на камешкирской глине ПАВ концентрации:
1 – 0,02 %; 2 – 0,2 %; 3 – 0,5 %

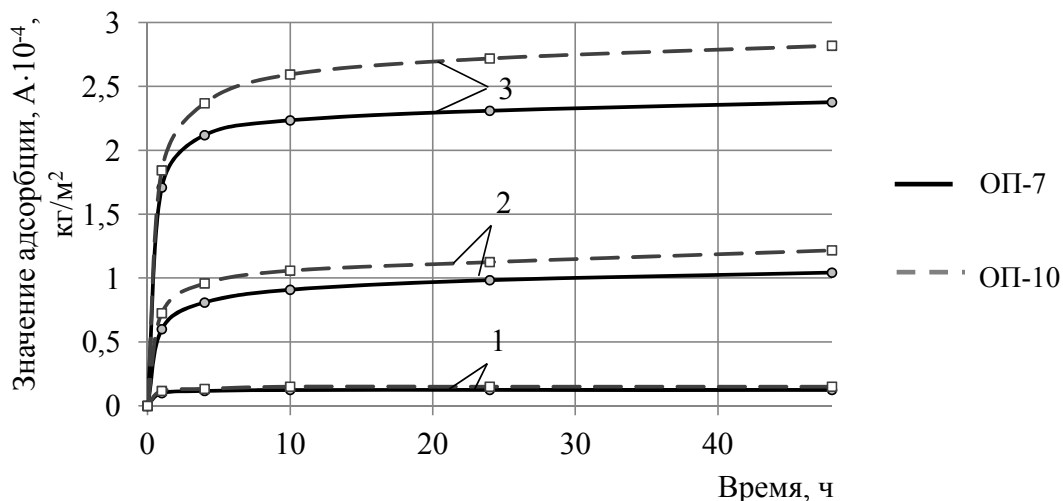


Рис. 5. Кинетика адсорбции на лягушовской глине ПАВ концентрации:
1 – 0,02 %; 2 – 0,2 %; 3 – 0,5 %

Монтмориλλονит характеризуется плотным сложением. Органические добавки оказывают разрыхляющее действие на кристаллическую решетку минералов слоистого строения, т.е. на развитие первичной пористости. Результаты исследований показывают, что органоглина хорошо диспергируется: увеличивается содержание мелких фракций и уменьшается содержание крупных фракций (рис. 6). Так, содержание частиц размером менее 0,001 мм в органоглине на основе Камешкирского месторождения составляет 46 %, фракций 0,01–0,005 мм – 16 %, а в контрольном составе – соответственно 27 и 36 %.

Адсорбция органической добавки на поверхности глины способствует ее гидрофиллизации, которую оценивали по теплоте смачивания и количеству связываемой воды. Количество связываемой воды (A , %) рассчитывалось по формуле

$$A = \frac{Q_{\text{см}} \rho h}{q} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $Q_{\text{см}}$ – теплота смачивания 1 г минерального порошка, Дж/г; ρ – плотность связанной воды, г/м³; h – толщина монослоя связанной воды, м; q – полная поверхностная энергия системы «вода – пар», Дж/м².

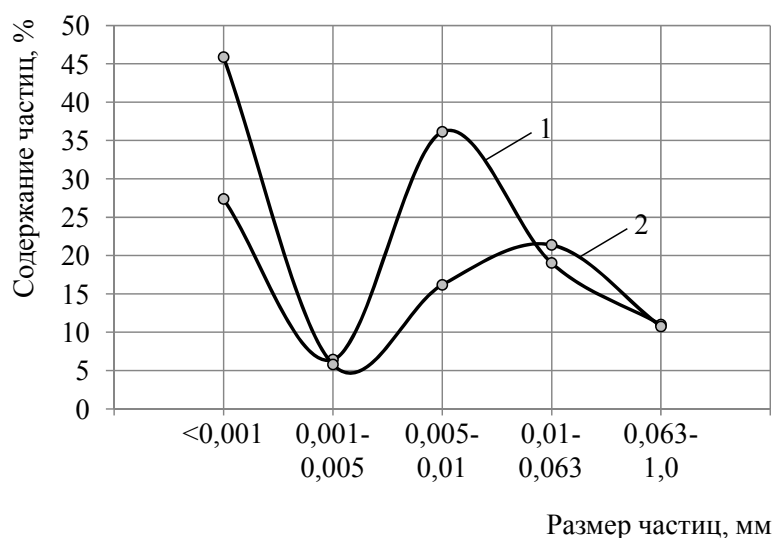


Рис. 6. Гранулометрические составы глин Камешкирского месторождения:
1 – немодифицированная глина; 2 – глина, модифицированная органической добавкой

В табл. 4 приведены значения количества связанной воды при адсорбции добавки сульфанола. Величину эффективной удельной поверхности твердой фазы $S_{уд.э}$ рассчитывали по формуле

$$S_{уд.э} = \frac{Q_{см}}{q}. \quad (4)$$

Т а б л и ц а 4

Показатели гидрофильности глины

Вид глины	Теплота смачивания, кДж/кг	Количество связанной воды, %	Эффективная удельная поверхность, $S \cdot 10^3$, м ² /кг
Глина с удельной поверхностью $S_{уд}=1264$ м ² /кг	70,00	18,49	603,4
Глина, модифицированная сульфанолам, удельная поверхность $S_{уд}=1278$ м ² /кг	96,67	25,55	833,6

Установлено, что удельная теплота смачивания поверхности модифицированной глины составляет $Q_{см} = 96,67$ кДж/кг, а необработанной глины – $Q_{см} = 70,00$ кДж/кг. Наблюдается увеличение количества связанной воды и эффективной удельной поверхности.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали возможность получения органоминеральной добавки на основе глины с повышенным содержанием монтмориллонита. Рекомендуется при получении органоминеральной добавки использовать неионогенные добавки ОП-7 и ОП-10 и анионную добавку сульфанола. Для получения 1 кг органоминеральной добавки потребуется 38 г добавки ОП-7, либо 45 г ОП-10, либо 46 г сульфанола.

Список литературы

1. Dubey, A. Influence of high reactivity metakaolin and silica fume on the flexural toughness of high performance steel fiber reinforced concrete / A. Dubey, N. Banthia // ACI Materials Journal. – 1998. – № 3. – P. 284.

2. Frias, M. Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement systems at 20°C / M. Frias, J. Cabrera // *Cement and Concrete Research*. – 2001. – Vol. 31, Issue 4. P. – 519–527.
3. Бродский, Ю.А. Буровые растворы на углеводородной основе с применением органобентонита / Ю.А. Бродский, И.З. Файнштейн, В. Заворотный // *Нефть и капитал*. – 2002. – № 12. – С. 41–43.
4. Бродский, Ю.А. Органобентонит – эффективная добавка при производстве лакокрасочных и других отделочных материалов / Ю.А. Бродский, И.З. Файнштейн // *Строительные материалы*. – 2000. – №10. – С. 44.
5. Кашников, А.М. Ноология приготовления и введения в лакокрасочные системы паст отечественного органобентонита / А.М. Кашников, Ю.А. Бродский, А.М. Файнштейн // *Лакокрасочные материалы и их применение*. – 2007. – № 1–2. – С. 56–59.
6. Логанина, В.И. Полистирольные краски, содержащие органоминеральные добавки / В.И. Логанина, Н.А. Петухова // *Лакокрасочные материалы и их применение*. – 2008. – № 4. – С. 25–29.
7. Логанина, В.И. Модификация рецептуры полистирольного красочного состава дисперсными частицами органоглины / В.И. Логанина, Н.А. Петухова // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2008. – № 8 (596). – С. 25–27.
8. Логанина, В.И. Полистирольные краски, содержащие органоминеральные добавки / В.И. Логанина, Н.А. Петухова // *Лакокрасочные материалы и их применение*. – 2008. – № 4. – С. 25–29.
9. Логанина, В.И. Разработка органоминеральной добавки для сухих строительных смесей / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, Э.Р. Акжигитова // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2011. – № 3. – С. 8–12.
10. Логанина, В.И. Эффективность применения в сухих строительных смесях органоминеральных добавок на основе смешанослойных глин / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, В.В. Черячукин, Э.Р. Акжигитова // *Региональная архитектура и строительство*. – 2012. – № 3. – С. 57–60.
11. Günster, E. Effect of cationic surfactant adsorption on the rheological and surface properties of bentonite dispersions / E. Günster, S. İşçi, N. Öztekin, F. B. Erim, Ö. I. Ece, N. Güngör // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2006. – Vol. 303, Issue 1. – P. 137–141.

References

1. Dubey, A. Influence of high reactivity metakaolin and silica fume on the flexural toughness of high performance steel fiber reinforced concrete / A. Dubey, N. Banthia // *ACI Materials Journal*. – 1998. – № 3. – P. 284.
2. Frias, M. Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement systems at 20°C / M. Frias, J. Cabrera // *Cement and Concrete Research*. – 2001. – Vol. 31, Issue 4. P. – 519–527.
3. Brodsky, Yu.A. Hydrocarbon based drilling fluids using organobentonite / Yu.A. Brodsky, I.Z. Fainshtein, V. Zavorotny // *Oil and Capital*. – 2002. – № 12. – P. 41–43.
4. Brodsky, Yu.A. Organobentonite – an effective additive in the production of paints and varnishes and other finishing materials / Yu.A. Brodsky, I.Z. Fainshtein // *Building materials*. – 2000. – №10. – P. 44.
5. Kashnikov, A.M. Noology of preparation and introduction to the paint systems of pastes of domestic organobentonite / A.M. Kashnikov, Yu.A. Brodsky, A.M. Feinstein // *Paintwork materials and their application*. – 2007. – № 1–2. – P. 56–59.
6. Loganina, V.I. Polystyrene paints containing organo-mineral additives / V.I. Loganina, N.A. Petukhova // *Paints and varnishes and their use*. – 2008. – No. 4. – P. 25–29.
7. Loganina, V.I. Modification of the formulation of polystyrene paint composition by dispersed particles of organic clay / V.I. Loganina, N.A. Petukhova // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Building*. – 2008. – No. 8 (596). – P. 25–27.

-
8. Loganina, V.I. Polystyrene paints containing organo-mineral additives / V.I. Loganina, N.A. Petukhova // *Paints and varnishes and their use*. – 2008. – No. 4. – P. 25–29.
 9. Loganina, V.I. Development of an organic-mineral additive for dry building mixes / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, E.R. Akzhigitova // *Bulletin of Belgorod State Technological University*. V.G. Shukhov. – 2011. – № 3. – P. 8–12.
 10. Loganina, V.I. Efficiency of application in dry construction mixtures of organic-mineral additives based on mixed-layer clays / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, V.V. Cheryachukin, E.R. Akzhigitova // *Regional architecture and engineering*. – 2012. – № 3. – P. 57–60.
 11. Günister, E. Effect of cationic surfactant adsorption on the rheological and surface properties of bentonite dispersions / E. Günister, S. İşçi, N. Öztekin, F. B. Erim, Ö. I. Ece, N. Güngör // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2006. – Vol. 303, Issue 1. – P. 137–141.

УДК 532.77

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Очкина Наталья Александровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Физика и химия»
E-mail: ochkina.natalya@mail.ru

Penza State University of Architecture
and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Ochkina Natalia Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Physics and Chemistry»
E-mail: ochkina.natalya@mail.ru

УСАДКА, ВНУТРЕННИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ КОМПОЗИТОВ С ВЫСОКОПЛОТНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Н.А. Очкина

Описано влияние рецептурных факторов на величину усадки композитов на основе глиноземистого цемента с высокоплотным заполнителем (полиминеральным отходом производства). Определены внутренние напряжения, возникающие в композитах в процессе структурообразования. Показано, что наименьшие напряжения ($\sigma_r = 0,9...1,56$ МПа и $\sigma_t = -7,09...-12,5$ МПа) возникают в композитах при степени наполнения $\vartheta_f = 0,66$, модифицированных оптимальными дозировками добавок: карбамидной смолы, технического лигносульфоната натрия или суперпластификатора С-3. Проведена оценка трещиностойкости композитов по результатам экспериментального исследования образцов.

Ключевые слова: композит, высокоплотный заполнитель, глиноземистый цемент, усадка, внутренние напряжения, трещиностойкость, степень наполнения, водоцементное отношение, модифицирующие добавки

SHRINKAGE, INTERNAL STRESSES AND CRACK RESISTANCE OF HIGH-DENSITY FILLER COMPOSITES

N.A. Ochkina

The influence of prescription factors on the amount of shrinkage of composites based on alumina cement with high-density filler (polymineral production waste) was investigated. The internal stresses arising in composites in the process of structure formation are determined. It is shown that the lowest voltages ($\sigma_r = 0,9...1,56$ MPa and $\sigma_t = -7,09...-12,5$ MPa) occur in composites with the degree of filling modified by optimal dosages of additives: carbamide resin, technical sodium lignosulfonate or superplasticizer C-3. The crack resistance of composites was estimated according to the results of experimental study of the samples.

Keywords: composite, high-density filler, alumina cement, shrinkage, internal stresses, crack resistance, degree of filling, water-cement ratio, modifying additives

Процесс твердения цементных композитов сопровождается объемными изменениями, в результате которых возникают деформации усадки, обусловленные характером физико-химических процессов, протекающих в сложной гетерогенной капиллярно-пористой структуре цементного камня. Известно, что деформации усадки зависят от влагопотерь материала, но эта зависимость носит достаточно сложный характер. В неблагоприятных условиях твердения в результате развития усадочных напряжений происходит образование микротрещин, которые снижают прочность цементных композитов (особенно при растяжении), водонепроницаемость, стойкость в агрессивных средах, морозостойкость и др. Величина усадки зависит от многих факторов: минералогического состава и тонкости помола цемента, водоцементного отношения

(В/Ц), вида заполнителей и их объемного содержания, условий и продолжительности твердения композита.

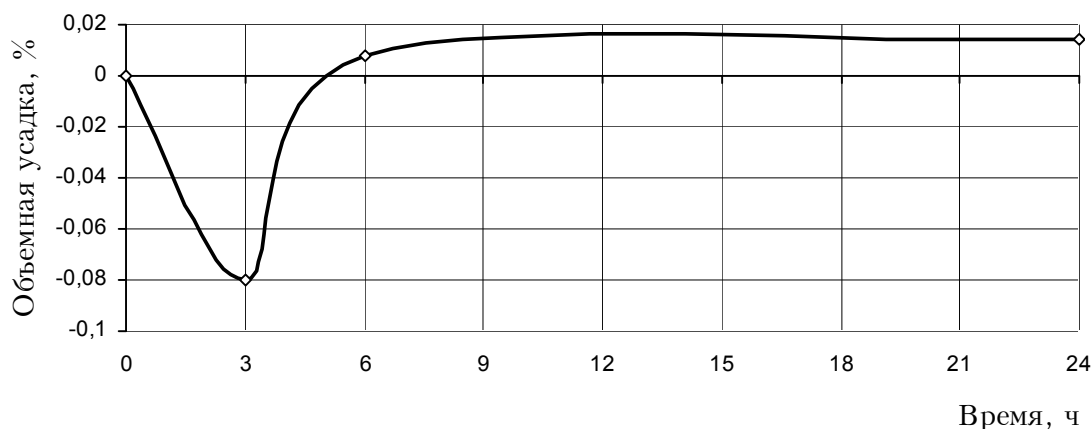
Для особо тяжелых композитов с плотной структурой актуально определение зависимости величины усадки от степени наполнения, которое проводили на композитах, изготовленных на глиноземистом цементе. Образцы-призмы размерами 20×30×180 мм распубливали на второй день после формования и в течение 2 сут хранили в нормальных условиях, затем в воздушно-сухой среде с относительной влажностью 60±5 % и температурой 20±220 °С. Разработанные композиты имели среднюю плотность 3900–4200 кг/м³. Величины усадки (%) композитов через 28 суток твердения при различных объемных долях заполнителя и В/Ц приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Объемное содержание заполнителя, ϑ_f	Водоцементное отношение, В/Ц		
	0,5	0,55	0,6
0,59	0,132	0,157	0,180
0,66	0,098	0,116	0,128
0,7	0,074	0,107	0,114

Как видно из табл. 1, в исследуемом диапазоне изменения В/Ц увеличение степени наполнения композитов приводит к снижению усадочных деформаций. Увеличение содержания высокомодульного заполнителя, особенно если наблюдается аутогезионный контакт, сопровождается ухудшением удобоукладываемости и, следовательно, уменьшением средней плотности и прочности материала. Кроме того, при эксплуатации таких материалов в сухой среде даже небольшая усадка может вызвать напряженное состояние, способное привести к образованию трещин.

Исследование кинетики усадки немодифицированных композитов с различной степенью наполнения показало, что начальный период гидратации сопровождается расширением, которое при В/Ц=0,5 начинается непосредственно после затворения. В процессе гидратации это увеличение объема через некоторое время (~3 ч) прекращается и начинается усадка, продолжающаяся до образования прочной структуры цементного камня. Подобное изменение объемных деформаций в процессе гидратации цементов вызывается возникновением и развитием осмотического давления: начальное расширение цементного теста объясняется образованием и набуханием гелеобразных оболочек вокруг частиц цемента, а последующая усадка – прекращением действия осмотического давления вследствие разрыва гелевидных оболочек в период формирования кристаллической структуры, способной зафиксировать начальное расширение, вызванное набуханием контактирующих фаз [1]. Наиболее интенсивно усадка протекает в первые 8–10 сут, а после 14 сут твердения наблюдается ее стабилизация (рис. 1).

Рис. 1. Объемная усадка смеси при $\vartheta_f = 0,66$ и В/Ц = 0,5

На рис. 2 и 3 приведены зависимости усадки и потери массы в результате испарения влаги из образцов, изготовленных на основе глиноземистого цемента (ГЦ) и портландцемента (ПЦ) при $B/C=0,5$ и $\vartheta_f = 0,66$.

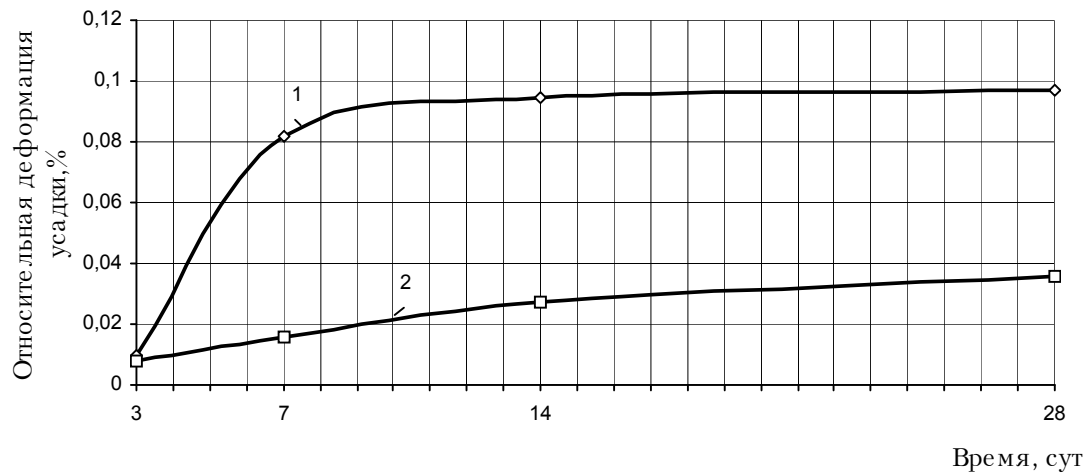


Рис. 2. Усадка композитов:
1 – образец, изготовленный на основе ГЦ;
2 – то же на основе портландцемента

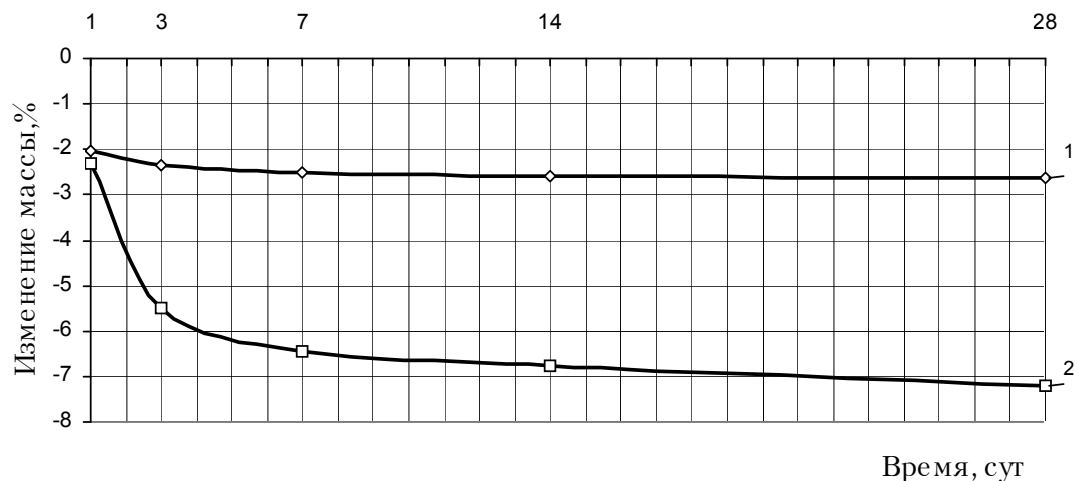


Рис. 3. Влагопотери композитов:
1 – образец, изготовленный на основе ВГЦ;
2 – то же на основе портландцемента

Из рис. 2 и 3 видно, что усадка композитов на основе ГЦ, определенная в первые 28 сут, больше и происходит с большей скоростью, чем у композитов на ПЦ. По влагопотерям наблюдается обратная зависимость (см. рис. 3).

Величину усадочных деформаций можно регулировать с помощью модифицирующих добавок. Экспериментальные исследования проводили на смесях одинаковой подвижности. Добавки вводили в оптимальных дозировках: суперпластификатор СЗ – 0,5 %, лигносульфонат кальция (ЛСТ) – 0,15 %, карбамидная смола (КС) – 1 %, лимонная кислота (ЛК) – 0,1 % и сульфосалициловая кислота (ССК) – 0,2 % от массы цемента. Объемное содержание заполнителя составляло $\vartheta_f = 0,66$. Величины начального расширения и усадки композитов с добавками через 28 сут представлены в табл. 2 и 3 соответственно. Кинетика усадки показана на рис. 4 и 5.

Т а б л и ц а 2

Вид и дозировка добавки (% от массы цемента)	Продолжительность твердения					
	3 ч	6 ч	12 ч	1 сут	2 сут	3 сут
Без добавки	0,026	0,0015	–	–	–	–
ЛСТ – 0,15 %	0,0074	0,0083	0,0046	–	–	–
Лимонная кислота – 0,1 %	0,0012	0,0008	–	–	–	–
ССК – 0,2 %	0,0017	0,0026	0,0020	–	–	–
С-3 – 0,5 %	0,0009	0,00013	–	–	–	–
Карбамидная смола – 1 %	0,082	0,076	0,065	0,058	0,046	0,038

Т а б л и ц а 3

Вид добавки	Дозировка добавки (в % от массы цемента)	В/Ц	Усадка в возрасте 28 сут, %
Без добавки	–	0,5	0,097
ССК	0,2	0,45	0,072
Карбамидная смола	1	0,47	0,038
ЛСТ	0,15	0,45	0,062
С-3	0,5	0,43	0,067
Лимонная кислота	0,1	0,45	0,070

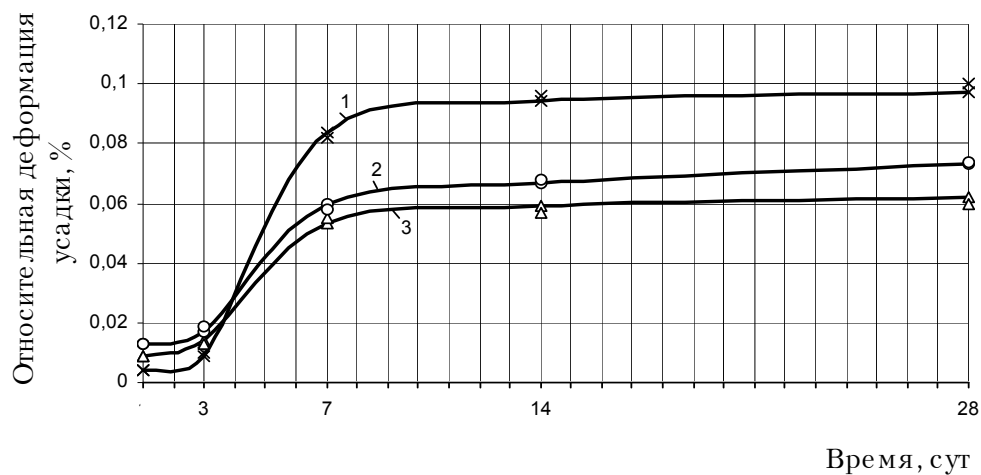


Рис. 4. Усадка композитов с добавками:
1 – без добавок; 2 – ЛСТ (0,15 %); 3 – лимонная кислота (0,1 %)

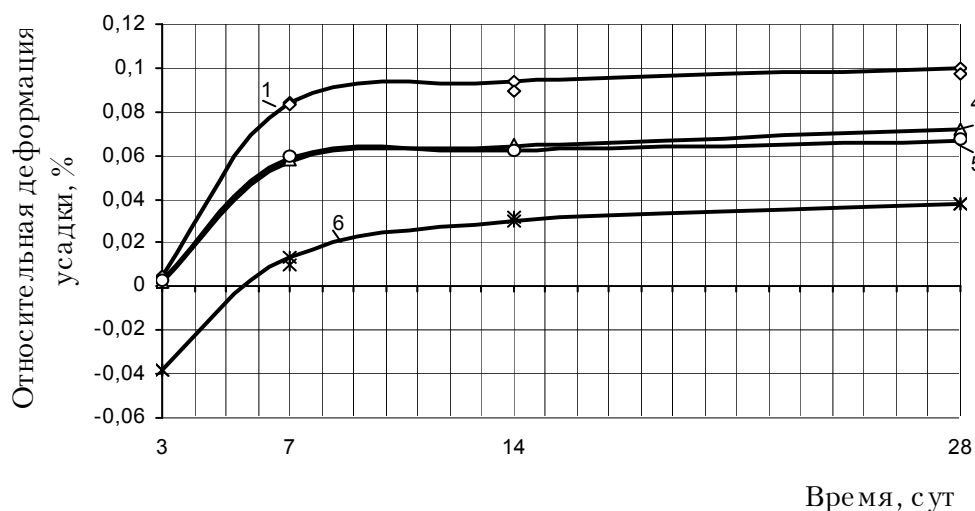


Рис. 5. Усадка композитов с добавками:
1 – без добавок; 2 – ССК (0,2 %); 3 – С-3 (0,5 %); 4 – карбамидная смола (1 %); 5 – карбамидная смола (1 %); 6 – карбамидная смола (1 %)

Модифицирующие добавки стабилизируют начальное расширение (см. табл. 2), значительно снижая его величину. Через 28 сут образцы с добавками имеют меньшую усадку, чем без добавки, тогда как в возрасте 1 и 3 сут усадка образцов с добавками ЛСТ и ЛК была несколько выше, чем без добавки (см. рис. 4). КС (1 %) вызывает значительное увеличение начального расширения до 0,082 %, которое постепенно уменьшается по величине и фиксируется в возрасте 5 сут (см. рис. 5). Затем наблюдается усадка, которая практически стабилизируется к 14 сут, достигая 84 % максимального значения. Образцы с добавкой карбамидной смолы имеют наименьшую усадку.

Усадочные деформации являются основным источником возникновения внутренних напряжений, которые, суммируясь с напряжениями от внешних воздействий, приводят к нежелательному растрескиванию материала. Нами был применен расчетный метод определения внутренних напряжений. С целью приближения расчета к реальному материалу композит моделировался упругим телом, структурная ячейка которого представляет собой сферическое зерно включения (частица заполнителя), окруженное слоем цементного камня постоянной толщины [2, 3]. Результаты расчетов влияния объемного содержания заполнителя и водоцементного отношения на усадочные внутренние напряжения в оболочке цементного камня представлены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Напряжения, МПа	Объемное содержание заполнителя			
	$\vartheta_f = 0,55$	$\vartheta_f = 0,6$	$\vartheta_f = 0,65$	$\vartheta_f = 0,7$
В/Ц=0,5				
σ_r	4,6	3,7	2,42	1,62
σ_t	-24,6	-24,1	-18,2	-13,83
В/Ц=0,55				
σ_r	5,65	4,57	2,98	1,96
σ_t	-33,4	-29,2	-21,9	-16,72
В/Ц=0,6				
σ_r	6,34	5,13	3,34	2,21
σ_t	-36,86	-32,26	-24,19	-18,48

П р и м е ч а н и е : σ_r и σ_t – напряжения (МПа) в оболочке цементного камня в радиальном и тангенциальном направлениях соответственно.

Из табл. 4 видно, что величины напряжений от усадки имеют достаточно высокие значения. Однако при увеличении объемной степени наполнения усадочные напряжения уменьшаются. Тангенциальные растягивающие напряжения при объемной степени наполнения $\vartheta_f = 0,7$ больше соответствующих сжимающих напряжений в 8,48 раза, а при степени наполнения $\vartheta_f = 0,6$ – только в 6,35 раза. Наоборот, радиальные сжимающие напряжения, возникающие в заполнителе вследствие усадки цементного камня, с увеличением содержания цемента в растворе увеличиваются. При увеличении В/Ц наблюдается рост внутренних напряжений, так как при больших В/Ц усадка композитов значительно возрастает. Модифицирующие добавки уменьшают усадочные напряжения (табл. 5).

В присутствии ЛСТ радиальные сжимающие напряжения уменьшаются на 40,3 %, а тангенциальные растягивающие – на 36 %. Карбамидная смола снижает внутренние напряжения в 2,55–2,76 раза. Добавки ССК и С-3 уменьшают усадочные напряжения в среднем на 31 %. Уменьшение величины усадочных напряжений при введении добавок можно объяснить снижением В/Ц, необходимого для получения подвижной смеси и, соответственно, усадки.

Т а б л и ц а 5

Вид добавки	Дозировка добавки, % от массы цемента	В/Ц	ε , %	$(\delta_t)_{\max}$, МПа	$(\delta_r)_{\max}$, МПа	$\frac{(\delta_t)_{\max}}{(\delta_r)_{\max}}$
Без добавки	–	0,5	0,097	-18,10	2,48	7,30
КС	1	0,47	0,038	-7,09	0,90	7,88
ЛСТ	0,15	0,45	0,062	-11,57	1,48	7,82
ССК	0,2	0,45	0,072	-13,44	1,72	7,81
С-3	0,5	0,43	0,067	-12,50	1,56	8,01
ЛК	0,1	0,45	0,070	-13,06	1,68	7,78

П р и м е ч а н и е : ε – относительная деформация, $\vartheta_f = 0,66$.

Для определения трещиностойкости композитов на основе глиноземистого цемента был использован традиционный метод МИИТ [4]. Составы исследуемых растворов приведены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

№ состава	В/Ц	Вид добавки	Дозировка добавки (% от массы цемента)	Наполнитель
1	0,5	Без добавки	–	Высокоплотный заполнитель
2	0,47	КС	1	То же
3	0,45	ЛСТ	0,2	То же
4	0,43	С-3	0,5	То же
5	0,45	ССК	0,2	То же
6	0,45	ЛК	0,1	То же
7	0,5	Без добавки	–	Кварцевый песок

П р и м е ч а н и е : во всех составах расход цемента 418 кг на 1 м³ смеси. Объемная доля заполнителя $\vartheta_f = 0,66$.

Расход модификатора выбирали из условия получения высокопрочного материала. Были изготовлены две серии образцов-близнецов. В возрасте 28 сут все образцы выдерживали в воде до полного водонасыщения. Первая серия образцов была испытана в водонасыщенном состоянии. Были определены пределы прочности при сжатии и изгибе (R'). Вторую серию образцов испытывали на сжатие после выдерживания в воздушно-сухих условиях при относительной влажности воздуха 40–60 % (R''). Оценку трещиностойкости композитов проводили по результатам испытаний образцов на изгиб по величине $K = \frac{R''}{R'}$, так как относительное снижение прочности под действием усадки и других факторов связано с образованием различного рода локальных трещин. Испытание на сжатие оказалось нечувствительным к дефектам, которые возникают при высыхании образцов вследствие усадки. Результаты испытаний приведены в табл. 7.

Как видно, наибольшую трещиностойкость имеют композиты с добавками ЛСТ, С-3 и КС. Эти образцы имеют наименьшие значения усадки и внутренних напряжений.

Т а б л и ц а 7

Показатели	Номера составов						
	1	2	3	4	5	6	7
Предел прочности при изгибе водонасыщенных образцов R' , МПа	7,89	9,72	6,73	8,68	7,80	8,09	6,88
Предел прочности при изгибе воздушно-сухих образцов R'' , МПа	6,24	8,46	6,34	8,29	6,17	6,47	5,30
Критерий трещиностойкости $K = \frac{R''}{R'}$	0,79	0,87	0,94	0,96	0,79	0,80	0,77

Несмотря на большие по величине внутренние напряжения, критерий трещиностойкости композитов на высокоплотном заполнителе оказался достаточно высоким и появления трещин в образцах не наблюдалось. Это можно объяснить тем, что в композитах на глиноземистом цементе наряду с развитием деформаций усадки интенсивно увеличивается прочность при растяжении. Динамика этих двух противоположно направленных процессов такова, что создаются неблагоприятные условия для образования трещин.

Список литературы

1. Кузнецова, Т.В. Состав, свойства и применение специальных цементов / Т.В. Кузнецова, Ю.Р. Кривоборожов // Технологии бетонов. – 2014. – № 2. – С. 8–12.
2. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: МГСУ, 2012. – 432 с.
3. Королев, Е.В. Строительные материалы вариативно-каркасной структуры: монография / Е.В. Королев, Ю.М. Баженов, В.А. Смирнов. – М.: МГСУ, 2011. – 304 с.
4. Лещинский, М.Ю. Испытание бетона / М.Ю. Лещинский. – М.: Стройиздат, 1980. – 360 с.

References

1. Kuznetsova, T.V. Composition, properties and application of special cements / T.V. Kuznetsova, Yu.R. Krivoborodov // Concrete Technologies. – 2014. – № 2. – P. 8–12.
2. Bazhenov, Yu.M. Systems analysis in construction materials science: monograph / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – M.: MGSU, 2012. – 432 p.
3. Korolev, E.V. Building materials varitrane-frame structure: monograph / E.V. Korolev, Yu.M. Bazhenov, V.A. Smirnov. – M.: MGSU, 2011. – 304 p.
4. Leshchinsky, M.Yu. Concrete Testing / M.Yu. Leshchinsky. – M.: Stroyizdat, 1980. – 360 p.

УДК 691.175.2

*Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева)*

Россия, 430005, г. Саранск,
ул. Большевикская, д. 68
тел. (8342) 47-71-56

Ерофеев Владимир Трофимович,
доктор технических наук, профессор,
академик РААСН, декан архитектурно-
строительного факультета, директор НИИ
«Материаловедение», зав. кафедрой
«Строительные материалы и технологии»
E-mail: al_rodin@mail.ru

*Тамбовский государственный технический
университет*

Россия, 392000, г. Тамбов,
ул. Советская, д. 106
тел.: (4752) 63-04-39

Ельчишева Татьяна Федоровна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Архитектура и строительство
зданий»
E-mail: elschevat@mail.ru

Преображенская Екатерина Михайловна,
ассистент кафедры «Архитектура
и строительство зданий»
E-mail: kiki198608@yandex.ru

Макарчук Максим Валерьевич,
кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры
«Материалы и технология»
E-mail: energ-lab@yandex.ru

*National Research Ogarev Mordovia State
University (MRSU)*

Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.,
tel.: (8342) 47-71-56

Yerofeev Vladimir Trofymovich,
Doctor of Sciences, Professor, Academician
of the RAACSN, Dean of the Faculty of
Architecture and Construction, Director of the
Research Institute «Materials Science», Head
of the department «Building materials and
technology»
E-mail: al_rodin@mail.ru

Tambov state technical university

Russia, 392000, Tambov, 106,
Sovetskaya St.,
tel.: +7 (4752) 63-40-39

Elchishcheva Tatiana Fedorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Architecture and
construction of buildings»
E-mail: elschevat@mail.ru

Preobrazhenskaya Ekaterina Mikhailovna,
Assistant of the department «Architecture and
construction of buildings»
E-mail: kiki198608@yandex.ru

Makarchuk Maxim Valerievich,
Candidate of Sciences, Senior Lecturer
of the department «Materials and technology»
E-mail: energ-lab@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИЛАКТИДА В АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ*

В.Т. Ерофеев, Т.Ф. Ельчишева, Е.М. Преображенская, М.В. Макарчук

Проведены исследования прочностных характеристик изделий, изготовленных из полилактида методом FDM-печати. Даны рекомендации по выбору процента заполнения ячеистой структуры в зависимости от требуемой прочности прототипа, что существенно экономит материал и время изготовления прототипа методом 3D-печати.

Ключевые слова: аддитивные технологии, промышленный дизайн, прочностные характеристики

* Публикуется при поддержке гранта РФФИ РМ № 18-48-130013 "Комплексное исследование физико-химических процессов в композиционных материалах на основе эпоксидных смол и других синтетических полимеров, перспективных для применения в строительстве".

STUDY OF PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF POLYLACTIDE SAMPLES IN ADDITIVE TECHNOLOGY

V.T. Erofeev, T.F. Elchishcheva, E.M. Preobrazhenskaya, M.V. Makarchuk

Study of strength characteristics of products made of polylactide by FDM-printing was carried out. Recommendations on the choice of the percentage of filling of the cellular structure depending on the required strength of the prototype are given, which will significantly save the material and the time of manufacturing the prototype by 3D-printing.

Keywords: additive technologies, industrial design, strength characteristics

Введение

Применение аддитивных технологий при прототипировании в промышленном дизайне получило широкое распространение. Эта технология подразумевает использование 3D-печати методом FDM (Fused Deposition Modeling) – послойной заливки экструдруемым расплавом полимера. К использованию в 3D-печати производителями предлагается большое разнообразие материалов, их обзор приведен в табл. 1. Представленные материалы отличаются потребительскими и физико-механическими свойствами и используются в зависимости от требований к прототипу. Взаимосвязь технологий и прочностных характеристик рассматривается в немногочисленных публикациях [1–4].

Т а б л и ц а 1

Популярные материалы, используемые в 3D-печати

Международное обозначение материала	Наименование материала	Предел прочности при растяжении, МПа	Температура экструдера, °C
ABS	Акрилонитрилбутадиенстирол	22,00	220–260
ASA	Акрилонитрил-стирол-акрил	35,80	270–280
HIPS	Ударопрочный полистирол	62,00	220–260
NYLON	Синтетический полиамид	65,99	250–270
PP	Полипропилен	25,50	254
PET	Лавсан, полиэстер, майлар	50,00	120–160
PLA	Полилактид	57,80	210–240
POM	Полиформальдегид	75,00	210–250
SBS	Стирол-бутадиен сополимер	24,00	240
TPU	Термопластичный полиуретан	40,00	180–220

При изготовлении прототипа из выбранного материала методом FDM-печати пользователи опираются на прочностные характеристики, заявленные для данного пластика производителем. Однако прочностные характеристики изготовленных деталей не всегда соответствуют свойствам материала нитей (filaments), из которых они изготовлены. Структура детали, получаемой при послойном нанесении экструдруемого расплава, может отличаться по свойствам от неэкструдированного филамента.

Еще одним немаловажным фактором, влияющим на прочностные характеристики прототипа, является особенность технологии при его «выращивании». Внутренний объем изделия для экономии материала и сокращения времени печати заполняется полимером в виде ячеистой структуры. В случае минимального заполнения внутрен-

него объема прототипа можно получить лишь его оболочку с пустым (незаполненным) объемом внутри. Такой прототип будет иметь низкие прочностные характеристики и даже может деформироваться в результате внутренних напряжений в его конструкции или значительной массы прототипа.

Перед пользователем аддитивной технологии стоит сложный выбор. При экономии количества затраченного материала и времени печати получается прототип с меньшими показателями прочности. Другим вариантом является изготовление прототипа с большей прочностью, но при этом будет израсходовано большее количество материала и затрачено больше времени.

Выбор оборудования для 3D-печати также представляется весьма неоднозначной задачей. Можно предположить, что образцы с ячеистой структурой из полилактида (PLA), напечатанные с рекомендованными производителем настройками на принтере MakerBot Replicator 5 Gen, с внутренним заполнением объема 10 % при испытании на разрыв продемонстрируют значения показателя прочности в несколько раз меньше, чем образцы полилактида с заполнением объема ячеек на 100 %. То же самое утверждение, очевидно, справедливо для образцов, имеющих такую же ячеистость, но изготовленных на принтере MakerBot Replicator Z18.

Результаты исследований вышеперечисленных задач могут быть использованы для создания карты, демонстрирующей зависимость прочностных характеристик прототипа от степени (процента) ячеистости конструкции, используемого типа пластика и других параметров 3D-печати, а в конечном счете – для выбора технологии изготовления и вида материала при создании прототипа в промышленном дизайне.

Очевидно, что при создании прототипов необходимо индивидуально подбирать параметры 3D-печати в зависимости от целей и задач дизайнеров и инженеров, а также с учетом экономии материала и снижения массы получаемого прототипа.

Таким образом, актуальным является исследование прочностных свойств изделия, выполненного по аддитивной технологии с разным заполнением ячеистой структуры.

Материалы и методы исследования

Образцы для исследования прочностных характеристик изготавливались по аддитивной технологии на двух 3D-принтерах: MakerBot Replicator Z18 и MakerBot Replicator 5 Gen. На каждом из принтеров образцы изготавливались партиями по шесть штук в каждой партии с заполнением внутренней ячеистой структуры образцов от 10 до 100 % при назначенном шаге заполнения 10 %. Всего было изготовлено 120 образцов. При выращивании образцов применялись настройки печати, рекомендованные производителем оборудования. В качестве материала для печати использовался полимер полилактид (PLA), полиэфир молочной (2-гидроксипропионовой) кислоты $\text{CH}_3\text{-CH}(\text{OH})\text{-COOH}$.

Геометрические размеры образцов выполнялись согласно ГОСТ 33693-2015: общая длина 150 мм, расстояние между широкими частями с параллельными сторонами 108 мм, длина узкой части с параллельными сторонами 60 мм, радиус головки 60 мм, ширина широкой части 20 мм, ширина узкой части с параллельными сторонами 10 мм, толщина 4 мм [5].

Исследования прочностных характеристик образцов проводились на разрывной машине МР-0,5-1.

Результаты исследования и их обсуждение

Прочностные характеристики образцов из полилактида с различным процентом заполнения ячеистой структуры испытывались на разрывной машине МР-0,5-1.

С использованием оптической микроскопии были изучены изломы всех образцов, подвергшихся испытаниям на разрыв. Характерный вид изломов образцов с заполнением ячеистой структуры на 10 %, 50 % и 100 % представлен на рис. 1.

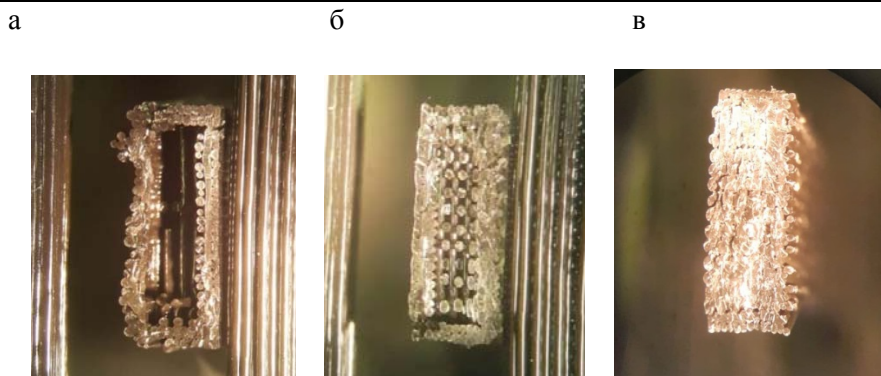


Рис. 1. Излом образцов с 10 % (а), 50 % (б) и 100 % (в) заполнением ячеистой структуры

Поверхность излома всех полученных образцов имеет пористую структуру, хорошо просматриваются нити внутри образцов. По степени пластической деформации образцы являются хрупкими. Излом образцов при воздействии приложенной нагрузки – плоский со скосами.

Ячеистая структура образуется во внутреннем объеме образца, а внешняя его поверхность заливается полимером на 100 % (рис. 1, а, б). Анализ образцов, изготовленных на 3D-принтере MakerBot Replicator 5 Gen, показал, что образец без заполнения внутренней ячеистой структуры имеет массу в среднем 5,66 г, а при 100 %-м заполнении масса образца в среднем составляет 10 г. Таким образом, в изменении процента заполнения ячеистой структуры образцов от 10 до 100 % участвует примерно 4,34 г из общей массы образца. Для образцов, изготовленных на принтере MakerBot Replicator Z18, значение массы, изменяемой при заполнении ячеистой структуры образца от 10 до 100 % составляет 4,16 г. Полученные данные показывают, что прототипы, изготовленные по аддитивной технологии на используемых принтерах, будут обладать минимальной массой и минимальной пороговой прочностью, характерными для конкретного принтера.

Результаты испытания характеристик образцов, изготовленных из полилактида в зависимости от степени заполнения (%) при заполнении ячеистой структуры от 10 до 100 %, на разрывной машине МР-0,5-1 сведены в табл. 2, где m – масса образцов, г; Δ – удлинение образцов, мм; F – сила, требующаяся для разрыва образцов, МПа.

Т а б л и ц а 2

Результаты испытания прочностных характеристик образцов, изготовленных на 3D-принтерах MakerBot Replicator Z18 и MakerBot Replicator 5 Gen

% заполнения	Maker Bot Z18				Maker Bot G5		
	№ образца	m , г	Δ , мм	F , МПа	m , г	Δ , мм	F , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8
10	1	5,56	5	9,69	6,18	9	13,056
	2	5,62	5	10,557	6,18	9,5	12,852
	3	5,64	6	10,812	6,18	7	13,77
	4	5,62	5,5	10,404	6,14	9	13,056
	5	5,24	7	9,69	6,18	7,5	10,71
	6	5,56	6	9,69	6,16	8	12,852
20	1	6,24	5,5	6,63	6,64	7	12,036
	2	6,18	4	5,61	6,67	6	12,648
	3	6,14	6	8,67	6,62	5,5	10,71
	4	6,18	4	5,61	6,62	6	10,098
	5	6,16	4	4,386	6,62	7	8,67
	6	6,16	3,5	4,896	6,6	4	9,18

1	2	3	4	5	6	7	8
30	1	6,6	5,5	11,526	7,1	8	14,076
	2	6,6	5,5	11,118	7,1	6,5	10,608
	3	6,6	5	9,69	7,1	7	13,26
	4	6,6	6	11,628	7,1	4	13,26
	5	6,6	4,5	9,18	7,2	5	11,974
	6	6,6	3,5	12,342	7,1	5	12,056
40	1	7,06	6	9,078	7,6	7	11,73
	2	7,06	5,5	7,548	7,55	6	11,016
	3	7,04	4	5,814	7,3	6,5	11,526
	4	7,08	5,5	7,65	7,45	6	10,2
	5	7,08	6,5	8,772	7,31	5	8,67
	6	7,08	5	6,324	7,52	6	9,18
50	1	7,58	8	13,974	8,1	9	13,056
	2	7,53	8	13,056	8,1	8	14,688
	3	7,55	8	14,076	8,2	8	13,872
	4	7,53	8	12,648	8,1	8	16,32
	5	7,56	7	12,24	8,2	8	14,076
	6	7,53	8	12,852	8,1	8	14,28
60	1	8	5	7,446	8,64	7	11,832
	2	8	8	11,22	8,6	7,5	11,628
	3	8	5	7,548	8,62	5	8,67
	4	8	6	8,67	8,64	7	11,73
	5	8	5	7,446	8,52	7	12,75
	6	7,96	6	9,996	8,56	7	12,648
70	1	8,46	9	15,912	9,2	8,5	17,238
	2	8,42	8	14,994	9,14	8	18,462
	3	8,44	8,5	15,3	9,22	8,5	16,32
	4	8,46	11	16,83	9,22	10,5	18,564
	5	8,44	8	14,688	9,24	10	18,87
	6	8,44	8	15,912	9,18	8,5	19,89
80	1	8,76	9	16,524	9,42	8	19,482
	2	8,78	8	16,932	9,48	9,5	20,706
	3	8,82	7	17,85	9,44	8	19,074
	4	8,76	7	17,34	9,5	12	16,116
	5	8,76	6,5	18,054	9,48	10,5	18,258
	6	8,78	9	18,513	9,48	9	19,686
90	1	9,35	6	10,914	9,5	9	18,054
	2	9,3	8	16,014	9,72	8,5	18,564
	3	9,3	7	13,77	9,64	9	14,79
	4	9,3	6	11,526	9,58	9	17,34
	5	9,3	7	15,3	9,78	8,5	17,136
	6	9,2	8	16,83	9,74	9	18,36
100	1	9,65	15	21,573	9,7	7	22,95
	2	9,68	14	22,236	9,8	7	21,114
	3	9,65	11	22,185	10,2	8	20,91
	4	10,04	15	21,522	10,06	8	23,46
	5	9,78	9	19,125	10	8	21,93
	6	9,66	12	20,4	9,9	7	22,44

По результатам испытаний каждой партии из шести образцов построены графики зависимости для средних показателей массы (рис. 2), удлинения (рис. 3) и прочности (рис. 4) образцов от процента заполнения ячеистой структуры.

Масса образцов, изготовленных на принтере Maker Bot G5, в среднем больше на 0,55 г (на 8 отн. %) массы образцов, изготовленных на принтере Maker Bot Z18. Изменение массы происходит пропорционально изменению заполнения ячеистой структуры и в среднем составляет: для образцов, изготовленных на принтере Maker Bot G5, – 0,38 г, для образцов, изготовленных на принтере Maker Bot Z18, – 0,41 г. Следует заметить, что изменение массы в каждой партии образцов происходило однородно, без значительного разброса значений (см. табл. 2).

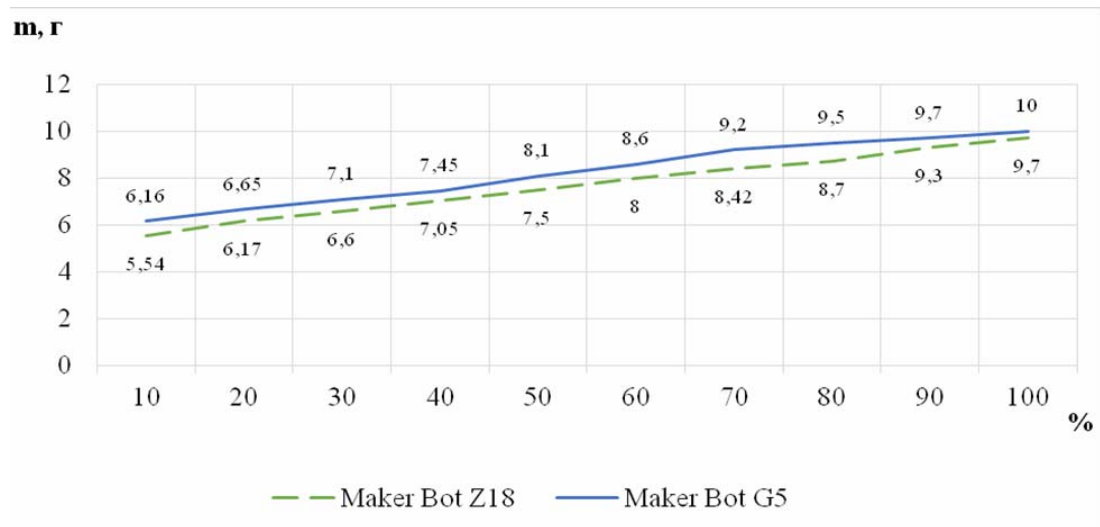


Рис. 2. Зависимость средней массы образцов, изготовленных на принтерах Maker Bot Z18 и Maker Bot G5, от процента заполнения ячеек

Удлинение образцов, изготовленных на принтерах Maker Bot Z18 и Maker Bot G5, происходит нелинейно (см. рис. 3). Характер изменения кривых удлинения образцов коррелируется с характером изменения кривых предела их прочности (см. рис. 4). В партиях образцов с одинаковым заполнением ячеек наблюдается разброс результатов измерения (см. табл. 2), что может быть связано с режимами печати и алгоритмом укладки полилактида при печати.

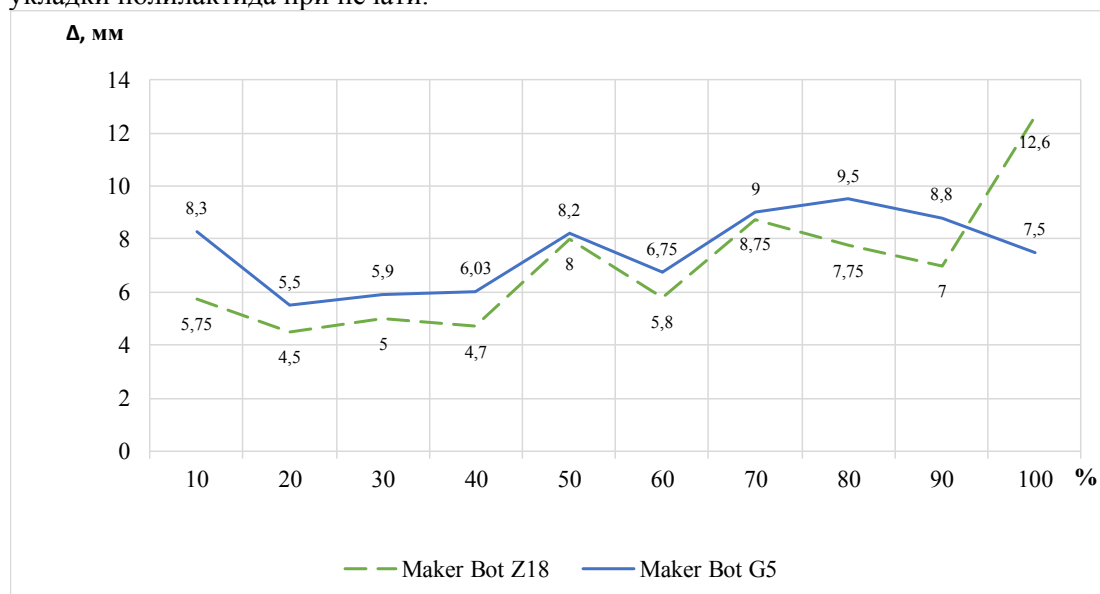


Рис. 3. Зависимость среднего удлинения образцов до момента разрыва от процента заполнения ячеек

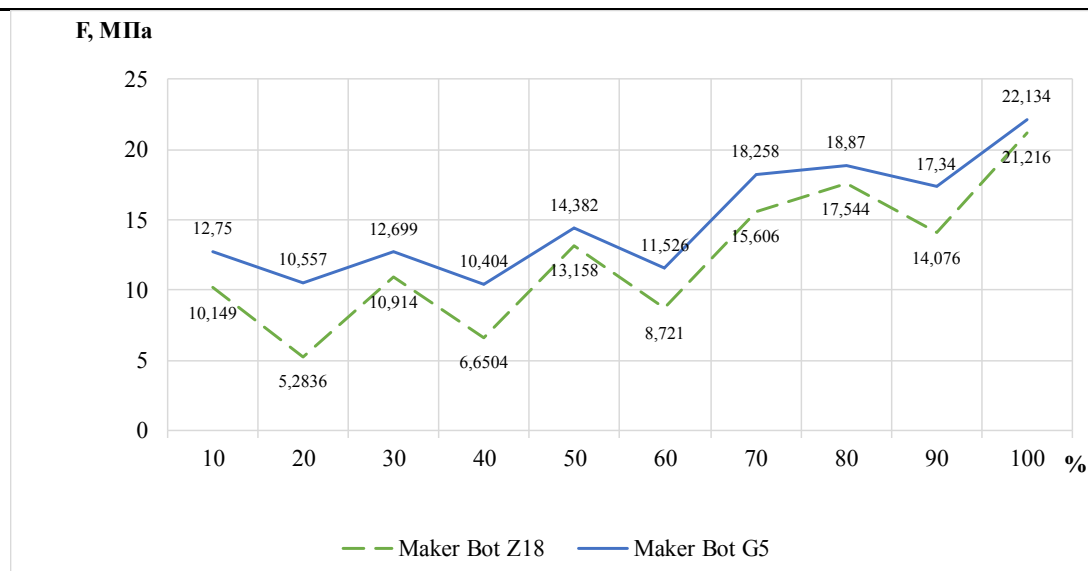


Рис. 4. Зависимость среднего значения силы, примененной для разрыва образцов, от процента заполнения ячеек

Характер изменения предела прочности образцов, изготовленных на принтерах Maker Bot Z18 и Maker Bot G5, аналогичен (см. рис. 4). Характерными являются значения предела прочности для значений заполнения ячеистой структуры образцов в 10 %, 50 % и 100 %.

Для всех исследованных образцов в интервале заполнения ячеистой структуры выше 10 % и ниже 50 % наблюдается падение предела прочности в сравнении с прочностью образцов с заполнением 10 %. Поэтому изготовление прототипов с заполнением ячеистой структуры 20 %, 30 % и 40 % является нерациональным.

В интервале заполнения ячеистой структуры выше 50 % и ниже 100 % наблюдается падение предела прочности для значения заполнения 60 %. Величина прочности оказывается ниже прочности образцов с заполнением ячеистой структуры 50 %. Также падение предела прочности наблюдается при значении заполнения 90 % по сравнению с заполнением образцов на 70 %, 80 % и 100 %. При заполнении ячеистой структуры 20 %, 30 %, 40 %, 60 % и 90 % происходит значительное падение предела прочности исследованных образцов.

Для анализа рабочих параметров принтеров построен график зависимости изменения показателей (в отн. %) – массы, удлинения и примененной силы для разрыва – образцов, изготовленных на принтере Maker Bot G5, по сравнению с образцами, изготовленными на принтере Maker Bot Z18 (рис. 5). В зависимости от показателя, который принимается за основу при исследовании (масса, удлинение, сила разрыва), и требуемого уровня заполнения образцов возможен различный подход в выборе принтера для 3D-печати, что показано ниже.

При сравнении показателей образцов, полученных при печати на принтере Maker Bot G5, с показателями образцов, напечатанных на принтере Maker Bot Z18, установлено, что наибольшее различие в массе образцов наблюдается при 10 % заполнении ячеек и составляет +11,2 %, наименьшее – при 90 % заполнении ячеек и составляет +3,9 %. Принтер Maker Bot G5 на всех уровнях заполнения ячеек демонстрирует большую массу образцов по сравнению с принтером Maker Bot Z18. Среднее увеличение массы образцов на всех уровнях заполнения ячеек на принтере Maker Bot G5 составляет +6,9 %. Поэтому при изготовлении прототипа без особых требований к его удлинению и прочности, но с максимальными требованиями к экономии полимера целесообразно использовать принтер Maker Bot Z18 на всех уровнях заполнения ячеек.

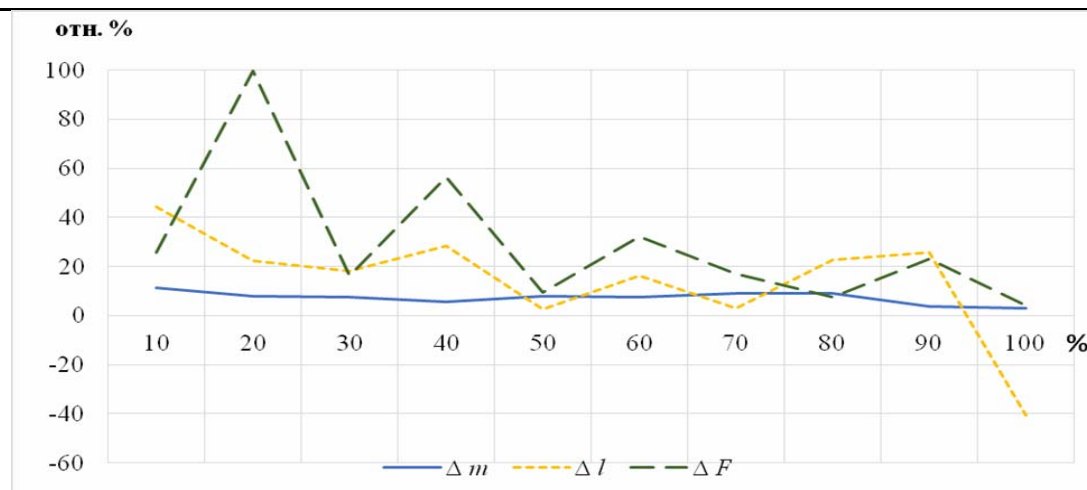


Рис. 5. Зависимость изменения относительных показателей образцов от процентного заполнения ячеек для принтеров Maker Bot Z18 и Maker Bot G5

Сравнение принтеров по показателю удлинения образцов до момента разрыва показало, что наибольшее различие в удлинении образцов наблюдается при 10 % заполнении ячеек и составляет +44,3 %, а также при 100 % заполнении ячеек и составляет минус 40,5 %. При этом принтер Maker Bot G5 на уровнях заполнения ячеек от 10 до 90 % демонстрирует более высокие показатели удлинения образцов по сравнению с принтером Maker Bot Z18. Однако с уровня заполнения 80 % до уровня заполнения 100 % показатель удлинения образцов принтера Maker Bot G5 снижается. При этом показатель удлинения образцов Maker Bot Z18 повышается с уровня заполнения ячеек 90 % до уровня заполнения ячеек 100 %. Таким образом, при изготовлении прототипа с заполнением ячеек свыше 90 % целесообразно организовать печать образцов на принтере Maker Bot Z18. Наименьшее различие в удлинении образцов, изготовленных на разных принтерах, наблюдается при 50 % и 70 % заполнении ячеек и составляет, соответственно, +2,5 % и +2,9 %. Поэтому при заполнении ячеек 50 % и 70 % возможно использование для печати образцов принтеров Z18 и Maker Bot G5.

Сравнение принтеров по показателю примененной силы для разрыва образцов показало, что наибольшее различие в величине приложенной силы наблюдается при 20 % заполнении ячеек и составляет +99,8 %, а также при 40 % заполнении ячеек и составляет +56,4 %. Принтер Maker Bot G5 на всех уровнях заполнения ячеек имеет более высокие показатели примененной силы для разрыва образцов по сравнению с принтером Maker Bot Z18. Наименьшее различие в величине примененной силы для разрыва образцов, изготовленных на разных принтерах, наблюдается при 50 %, 80 % и 100 % заполнении ячеек и составляет, соответственно, +9,3 %, +7,6 % и +4,3 %. Таким образом, при изготовлении прототипа с требованиями по заполнению ячеек 50 %, 80 % и 100 % возможна организация печати образцов как на принтере Maker Bot G5, так и на принтере Maker Bot Z18. При других уровнях заполнения целесообразна печать на принтере Maker Bot G5.

Выводы

Для определения прочностных характеристик изделий из полилактида, выращенных на оборудовании для 3D-печати, были изготовлены образцы с заполнением внутренней ячеистой структуры образцов от 10 до 100 %. Образцы были взвешены и подвергнуты испытаниям на разрыв. Результаты экспериментов занесены в таблицу, а также выражены графически. Анализ полученных данных показал следующее:

- прототипы, изготовленные по аддитивной технологии, для каждого типа принтера обладают минимальной пороговой прочностью;
- изменение массы в каждой партии образцов однородное без значительного разброса значений;

- характер изменения кривых удлинения образцов похож на характер изменения кривых предела прочности тех же образцов. По партиям образцов наблюдаются значительные перепады результатов измерения. Причину таких перепадов установить не удалось, данная нестабильность может быть связана с режимами и алгоритмом укладки материала. Анализ этих наблюдений является перспективным для проведения дальнейших исследований;

- в интервале заполнения ячеистой структуры свыше 10 %, но ниже 50 % наблюдается падение предела прочности для всех исследованных образцов в сравнении с прочностью образцов с заполнением 10 %. Поэтому изготовление прототипов с заполнением ячеистой структуры 20 %, 30 % и 40 % является нерациональным;

- при 20 %, 30 %, 40 %, 60 % и 90 % заполнении ячеистой структуры происходит значительное падение предела прочности исследованных образцов.

Анализ относительных показателей для двух принтеров показал эффективность их использования в следующих случаях:

- при изготовлении прототипа без особенных требований к его удлинению и прочности, но с максимальными требованиями к экономии полимера целесообразно использовать принтер Maker Bot Z18 на всех уровнях заполнения ячеек;

- наименьшее различие в удлинении образцов, изготовленных на разных принтерах, наблюдается при 50 % и 70 % заполнении ячеек, поэтому на этих уровнях возможно использование для печати образцов обоих принтеров;

- наименьшее различие в величине примененной силы для разрыва образцов, изготовленных на разных принтерах, наблюдается при 50 %, 80 % и 100 % заполнении ячеек. Для таких уровней заполнения ячеек возможна печать образцов на обоих принтерах. При других уровнях целесообразна печать на принтере Maker Bot G5.

Список литературы

1. Chen, X. Direct Slicing from Power SHAPE Models for Rapid Prototyping / X. Chen, C. Wang, X. Ye, Y. Xiao, S. Huang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2001. – Vol. 17, No. 7. – P. 543–547. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s001700170156>.
2. Pham, D.T. A Comparison of Rapid Prototyping Technologies / D.T. Pham, R.S. Gault // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1998. – Vol. 38, Iss. 10–11. – P. 1257–1287. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5).
3. Pandey, P.M. Optimal part deposition orientation in FDM by using a multi-criteria genetic algorithm / P.M. Pandey, K. Thrimurthulu, N. Venkata Reddy // International Journal of Production Research. – 2004. – Vol. 42, Iss. 19. – P. 4069–4089. – DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540410001708470>.
4. Santhakumar, J. Investigation on the Effect of Tensile Strength on Fdm Build Parts Using Taguchi-Grey Relational Based Multi-Response Optimization / J. Santhakumar, U. Mohammed Iqbal, M. Prakash // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – 2017. – Vol. 8, Iss. 12. – P. 53–60. DOI: IJMET_08_12_006.
5. ГОСТ 33693-2015 (ISO 20753:2008). Пластмассы. Образцы для испытания. – М.: Стандартинформ, 2016. – 16 с.

References

1. Chen, X. Direct Slicing from Power SHAPE Models for Rapid Prototyping / X. Chen, C. Wang, X. Ye, Y. Xiao, S. Huang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2001. – Vol. 17, No. 7. – P. 543–547. – DOI: [tps://doi.org/10.1007/s001700170156](https://doi.org/10.1007/s001700170156).
2. Pham, D.T. A Comparison of Rapid Prototyping Technologies / D.T. Pham, R.S. Gault // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1998. – Vol. 38, Iss. 10–11. – P. 1257–1287. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5).

3. Pandey, P.M. Optimal part deposition orientation in FDM by using a multi-criteria genetic algorithm / P.M. Pandey, K. Thrimurthulu, N. Venkata Reddy // International Journal of Production Research. – 2004. – Vol. 42, Iss. 19. – P. 4069–4089. – DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540410001708470>.
4. Santhakumar, J. Investigation on the Effect of Tensile Strength on Fdm Build Parts Using Taguchi-Grey Relational Based Multi-Response Optimization / J. Santhakumar, U. Mohammed Iqbal, M. Prakash // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – 2017. – Vol. 8, Iss. 12. – P. 53–60. DOI: IJMET_08_12_006.
5. GOST 33693-2015 (ISO 20753:2008). Plastics. Test specimens. – M.: Standardinform, 2016. – 16 p.

УДК 666.3

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Береговой Виталий Александрович,
доктор технических наук, зав. кафедрой
«Технологии строительных материалов
и деревообработки»
E-mail: vabereg@rambler.ru

Снадин Евгений Валерьевич,
аспирант
E-mail: techbeton@pguas.ru

Волков Павел Витальевич,
студент
E-mail: techbeton@pguas.ru

Фокин Георгий Александрович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Физика и химия»
E-mail phisik @ pguas. ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Beregovoy Vitaliy Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Head of the department
«Technology of building materials and wood
processing»
E-mail: vabereg@rambler.ru

Snadin Evgeny Valerevich,
Postgraduate of the department «Technology
of building materials and wood processing»
E-mail: techbeton@pguas.ru

Volkov Pavel Vitalievich,
student
E-mail: techbeton@pguas.ru

Fokin Georgi Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Physics and Chemistry»
E-mail phisik @ pguas. ru

ВЛИЯНИЕ РАЗЖИЖАЮЩИХ ДОБАВОК НА ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ СИЛИЦИТОВОГО ШЛИКЕРА

В.А. Береговой, Е.В. Снадин, П.В. Волков, Г.А. Фокин

Методом седиментационного анализа проведена оценка влияния натрийсодержащих разжижающих добавок на фракционный состав шликера для изготовления силицитовой газокерамики. Показана перспективность применения Na_2CO_3 и $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ в качестве дефлокулянтов природных силицитов на этапе подготовки сырьевых масс. Определено оптимальное количество добавок, обеспечивающее повышение седиментационной устойчивости и улучшение однородности керамического шликера.

Ключевые слова: керамика, природные силициты, разжижающие добавки, шликер, фракционный состав

THE INFLUENCE OF THINNING ADDITIVES ON THE FRACTIONAL STRUCTURE OF SILICIT SLIKER

V.A. Beregovoi, E.V. Snadin, P.V. Volkov, G.A. Fokin

By the method of sedimentation analysis the influence of thinning substances containing salts of sodium, fractional composition of slurry for the manufacture of silicicolous cellular ceramic was assessed. The prospects of using Na_2CO_3 , $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ as a dispersant of natural silicites aggregates at the stage of preparation of raw materials are shown. The optimal amount of the additive providing the increase of sedimentation stability and the improvement of uniformity of the ceramic slurry is determined.

Keywords: ceramics, natural silicites, thinning additives, slip, fractional composition

Введение. Цель увеличения объемов производства и номенклатуры пористых стеновых керамических материалов в условиях конкуренции с технологически развитыми зарубежными производителями требует разработки оригинальных технологических решений, обеспечивающих существенное снижение издержек производства за счет экономии энергетических и материальных затрат.

В производстве ячеистой керамики используют шликеры из высококонцентрированных суспензий различного минералогического состава, получаемые совмещением предварительно подготовленных сырьевых компонентов. Качество таких суспензий во многом определяется возможностью по минимизации их влагосодержания, обеспечивающей их достаточную подвижность и стабильность, что повышает производительность и сокращает энергозатраты [1].

В работе исследовалось влияние понизителей вязкости (разжижителей) на фракционный состав и реологические свойства шликеров, используемых в производстве керамических пористых материалов на основе природного силицитового сырья.

Основная часть. Для приготовления шликера использовали трепеловидные и кремнистые разновидности опок. Они характеризуются высоким содержанием аморфного кремнезема SiO_2 (60...75 %), а также кристаллическими рентгеноидентифицируемыми компонентами – β -кварц и γ -тридимит (34...40 %).

Для приготовления шликера применяли метод раздельного помола сухих компонентов в шаровой мельнице до порошкообразного состояния с удельной поверхностью частиц 600...700 $\text{м}^2/\text{кг}$ с последующим смешиванием в лабораторном смесителе.

Анализ результатов опубликованных работ показал, что в качестве понизителей вязкости керамических шликеров используют различные неорганические и органические соединения, а также смеси на их основе [1, 2]. Из фосфатосодержащих добавок этого типа наиболее распространенным дефлокулянт является триполифосфат натрия ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$) [3]. Его недостатком является относительно высокая стоимость [1]. При проведении исследований в этом качестве применяли следующие соединения: Na_2CO_3 ; $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; NaF ; $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$.

Помимо наличия флюсующих добавок, основными технологическими факторами, влияющими на скорость процесса спекания частиц при обжиге керамики, являются их размер и плотность упаковки, которая зависит от влагосодержания сырьевого шликера. По Стрелову К.К. продолжительность процесса формирования мест спекания выражается уравнением:

$$\tau_2 = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^\gamma \cdot \tau_1, \quad (1)$$

где τ_2 – время спекания частиц размера r_2 ; τ_1 – время спекания частиц размера r_1 ; γ – коэффициент, учитывающий тип процесса спекания.

Для оценки влияния разжижителей на изменение фракционного состава силицитовых частиц использовали метод седиментационного анализа. Опочные суспензии относятся к микрогетерогенным кинетически неустойчивым системам со средней или грубой дисперсностью. В исследованиях суспензии минеральных частиц с радиусом до 5 мкм рассматривали как переходную систему, к которой применим механизм агрегативной и седиментационной устойчивости, разработанный для коллоидов.

На примере пирофосфата натрия и соды определено влияние добавок дефлокулянтов на коэффициенты крупности (K) опочных суспензий (рис. 1). Величину K для исследуемых минеральных систем определяли по зависимости

$$K = \frac{A_{(\max-1)} + \dots + A_{(\min-1)}}{100}, \quad (2)$$

где A_i – полные остатки, %,

$$A_i = a_{26} + \dots + a_4, \quad (3)$$

где a_i – частные остатки, %,

$$a_i = \frac{m_i}{m_{\text{общ}}} \cdot 100; \quad (4)$$

здесь m_i – масса навески i -й фракции, мг; $m_{\text{общ}}$ – общая масса навески за весь период проведения эксперимента, мг.

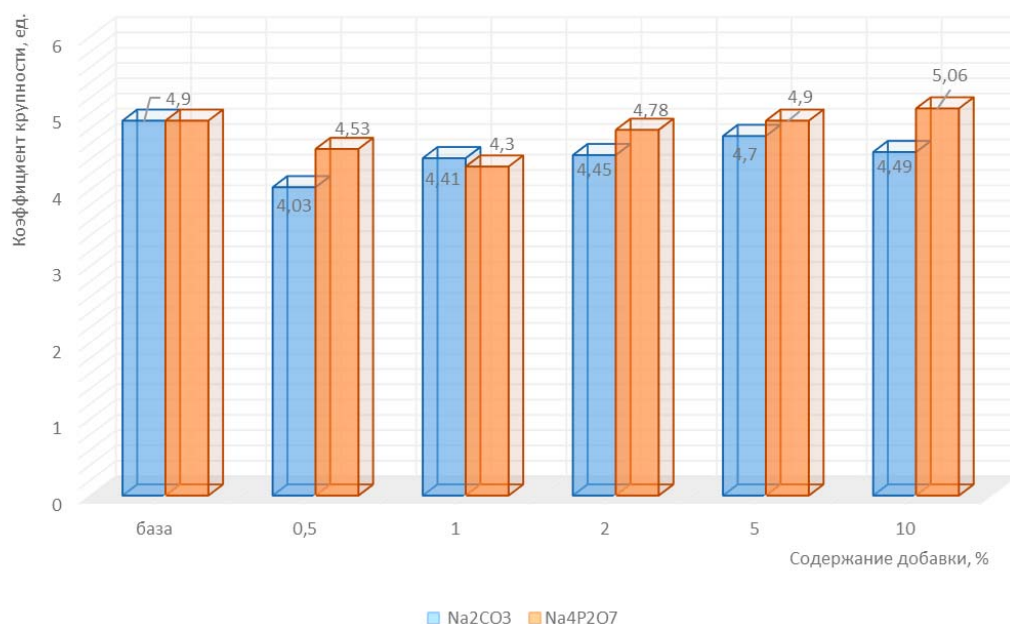


Рис. 1. Коэффициент крупности опочных суспензий

При проведении анализа полученных зависимостей учитывали возникновение двойного электрического слоя на частицах кремнезема. Поверхность кристаллов SiO₂, составляющих основную часть рентгеноидентифицируемых компонентов опочного сырья, гидратируется, образуя кремниевую кислоту. Последняя частично ионизируется по схеме



Ионы HSiO_3^- , «родственные» SiO₂, избирательно адсорбируются на поверхности опочных частиц, придавая им отрицательный заряд, а ионы водорода переходят в раствор.

Как показано на рис. 1, введение Na₄P₂O₇ и Na₂CO₃ приводит к росту относительного содержания частиц мелких фракций за счет пептизации крупных агрегатов. Дополнительный фактор, усиливающий действие механизма дефлокуляции, обусловлен образованием на поверхности частиц более растворимых соединений. При этом увеличивается их взаимодействие с водой и уменьшается величина поверхностного натяжения на границе фаз «опочная частица – вода», в результате усиливается тенденция к разукрупнению агрегатов.

Увеличение количества введенных добавок – свыше 1 % для Na₄P₂O₇ и 2 % для Na₂CO₃ – приводит к обратному эффекту – агрегатированию частиц. В рассматриваемом случае рост концентрации добавок в диффузном слое сопровождается его утончением, так как часть ионов Na⁺ переходит за границу скольжения в адсорбционный слой, снижая тем самым величину ζ-потенциала.

Полученные данные хорошо согласуются с зависимостями, представленными на рис. 2, и подтверждают механизм пластификации суспензий силицитовых частиц под действием электролитов за счет сегментации крупных частиц и высвобождения части иммобилизованной воды [4, 5].

Из рис. 2 следует, что увеличение содержания добавок Na₄P₂O₇·12H₂O, NaOH, Na₂SiO₃, Na₂CO₃ и Na₂B₄O₇ до 1 % значительно повышает подвижность суспензии опоки. Механизм процесса разжижения реализуется за счет дефлокуляции опочных мицелл путем обмена двухвалентных катионов их сольватного слоя (Ca²⁺, Mg²⁺) на одновалентные (Na⁺) и сопровождается увеличением ζ-потенциала и высвобождением связанной воды.

Определяющим образом на достигаемый эффект влияет анионная часть добавки, которая связывает двухвалентные катионы в малорастворимые соли и формирует движущую силу процесса. На это указывает отсутствие разжижающего эффекта при добавлении хлорида натрия.

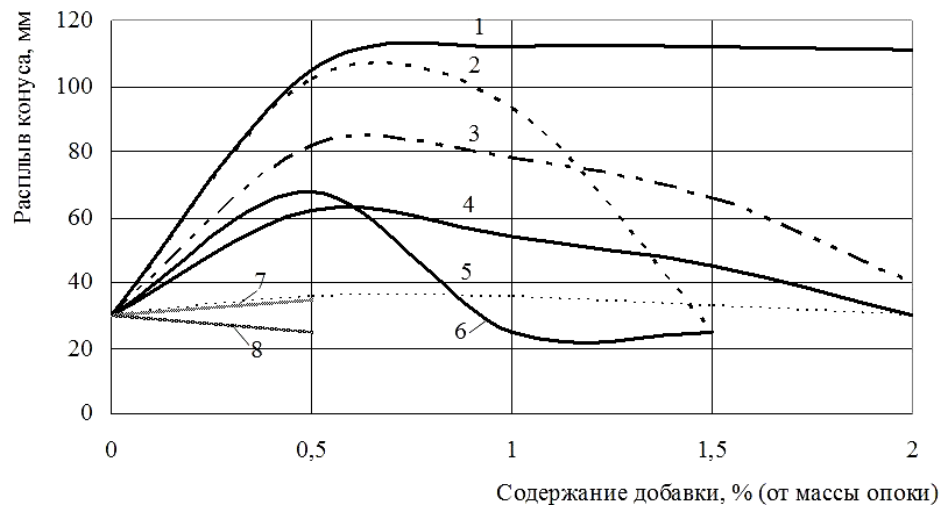
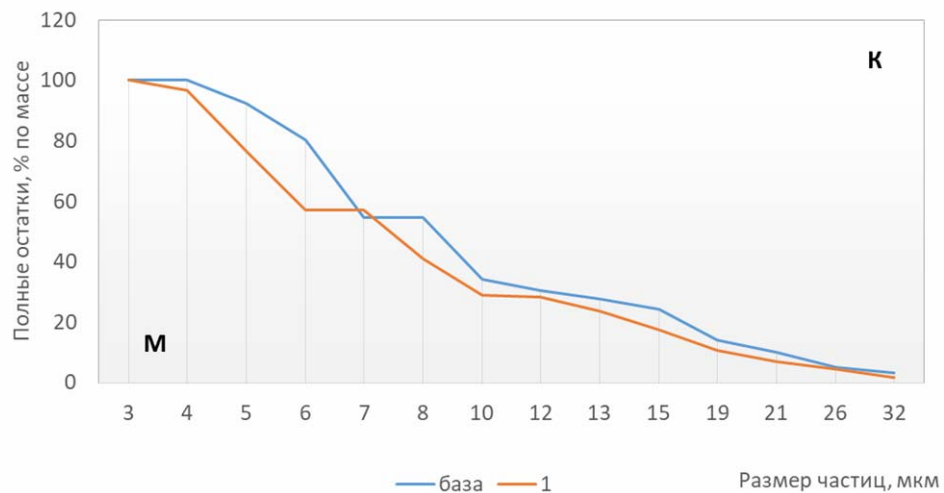


Рис. 2. Влияние Na-содержащей добавки на подвижность шликера:
 1 – $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$; 2 – NaOH ; 3 – Na_2SiO_3 ; 4 – Na_2CO_3 ; 5 – NaF ;
 6 – $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$; 7 – $\text{Na}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$; 8 – NaCl

Для количественной оценки влияния добавок на степень дефлокуляции опочных агрегатов были определены массы полных остатков седиментированных частиц на чаше торсионных весов (рис. 3).

а



б

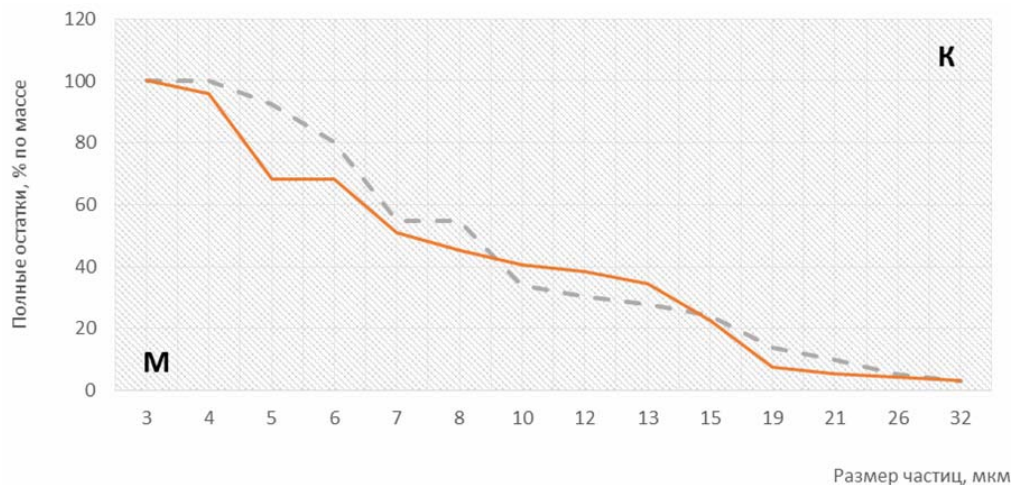


Рис. 3. Полные остатки частиц в суспензии, содержащей 1,0 % добавки:
 а – $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$; б – Na_2CO_3

Содержание добавок-дефлокулянтов в количестве 1 % по массе приводит к увеличению на 15...20 % относительного содержания опочных частиц мелких фракций с размерами 4...7 мкм в составе опочно-водной суспензии (см. рис. 3).

Выводы

1. Введение в сырьевые силицитовые суспензии специально подобранных натрийсодержащих солей сопровождается эффектами разжижения и дефлокуляции минеральных агрегатов, что повышает седиментационную устойчивость шликера и ускоряет процесс последующего обжига керамики.

2. По показателю фракционного состава оптимальное содержание добавок-дефлокулянтов варьируется от 1,0 (для $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) до 2 % (для Na_2CO_3) и приводит к увеличению относительного содержания частиц мелких фракций (4...7 мкм) в опочно-водной суспензии на 15...20 %.

3. Фактором, формирующим механизм пластификации силицитовых суспензий при введении дефлокулянтов $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ и Na_2CO_3 , является высвобождение иммобилизованной воды.

Список литературы

1. Pishch, I.V. Flow properties of slip for producing ceramic sanitary ware / I.V. Pishch, Y. A. Klimosh, E.I. Gapanovich // Glass and Ceramics. – 2006. – V. 63, N 7. – P. 259–261.
2. Rheology applied to ceramics (theory and practice) / L. Boscardin [et al.]. – Modena, 2006. – 473 p.
3. Пищ, И.В. Влияние разжижающих добавок на реологические свойства керамических шликеров / И.В. Пищ, Ю.А. Климош, Е.В. Габалов // Труды БГТУ Химия и технология неорганических веществ. – 2013. – №3. – С. 106–109.
4. Береговой, В.А. Улучшение прочностных показателей пенокерамического сырца / В.А. Береговой, Е.В. Снадин // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 4. – С. 80–84.
5. Береговой, В.А. Облегченная керамика повышенной прочности для энергоэффективных ограждающих конструкций / В.А. Береговой, Е.В. Снадин // Региональная архитектура и строительство». – 2017. – № 4. – С. 54–60.

References

1. Pishch, I.V. Flow properties of slip for producing ceramic sanitary ware / I.V. Pishch, Y. A. Klimosh, E.I. Gapanovich // Glass and Ceramics. – 2006. – V. 63, N 7. – P. 259–261.
2. Rheology applied to ceramics (theory and practice)/ L. Boscardin. – Modena, 2006. – 473 p.
3. Pish, I.V. Effect of diluent supplementation on rheological properties of ceramic slurries / I.V. Pish, J.A. Klimosh, E.V. Shabalov // Proceedings of BSTU Chemistry and technology of inorganic substances. – 2013. – №3. – P. 106–109.
4. Beregovoi, V.A. Improvement of strength parameters of raw foam ceramic / V.A. Beregovoi, E.V. Snadin // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 4 – P. 80–84.
5. Beregovoi, V.A. Lightweight ceramics of increased strength for energy-efficient enclosing structures / V.A. Beregovoi, E.V. Snadin // Regional architecture and engineering. – 2017. – № 4. – P. 54–60.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624.131.524.4

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Глухов Вячеслав Сергеевич,
кандидат технических наук,
профессор кафедры «Геотехника
и дорожное строительство»
E-mail: info@academproekt.ru

Вишнякова Юлия Сергеевна,
аспирант
E-mail: Yuliya_galova@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Glukhov Vyacheslav Sergeevich,
Candidate of Sciences,
Professor of the department «Geotechnics
and Road Construction»
E-mail: info@academproekt.ru

Vishnyakova Yuliya Sergeevna,
Graduate student
E-mail: yuliya_galova@mail.ru

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙ ПРИ ПОГРУЖЕНИИ ВДАВЛИВАНИЕМ

В.С. Глухов, Ю.С. Вишнякова

Предложен метод и даны рекомендации по определению несущей способности свай по результатам вдавливания с учетом процесса фильтрационной консолидации в водонасыщенных глинистых грунтах. Представлены результаты натурных испытаний свай и выявлены зависимости осадок свай от статической вдавливающей нагрузки в условиях водонасыщенного основания. Приведен практический опыт корректировки свайного поля жилого здания с учетом результатов испытаний.

Ключевые слова: фундаменты зданий, корректировка свайного поля, схема испытания, погружение вдавливанием, уплотненная зона, водно-коллоидная оболочка, грунтовая вода, стабилизация, околосвайное пространство, реология, фильтрационная консолидация, наследственная ползучесть

RECOMMENDATIONS ON THE DETERMINATION OF THE CARRYING ABILITY OF PILES DIVING UNDER PRESSURE

V.S. Glukhov, Y.S. Vishnyakova

A method has been developed and recommendations have been proposed for determining the bearing capacity of piles according to the results of indentation taking into account the process of filtration consolidation in water-saturated clay soils. The results of field tests of piles and their

dependence on the static pressing load in the conditions of a water-saturated base are given. The practice of adjusting the pile field for the construction of a residential building is described.

Keywords: building foundations, pile field adjustment, test pattern, indentation, compacted zone, colloidal shell, ground water, stabilization, near-lava space, rheology, filtration consolidation, hereditary creep

В классических методах расчета свайных фундаментов не в полной мере учитываются многие характерные реологические особенности площадок строительства (процесс фильтрационной консолидации, наследственная ползучесть, релаксация напряжений уплотненного грунтового массива и т.д.). Геометрические параметры свай определяются диапазоном нагрузок на фундаменты и инженерно-геологическими условиями площадки строительства. Так, при проектировании 16-этажного жилого дома в водонасыщенных грунтах, характерных для г. Самары, был принят вариант фундаментов из составных призматических свай длиной 14–16 м и сечением 300×300 мм.

По инженерно-геологическим изысканиям в качестве несущего слоя свай служит суглинок тугопластичный (ИГЭ-2) со следующими характеристиками:

- удельный вес – 20,2 кН/м³;
- удельное сцепление – 31 кПа;
- угол внутреннего трения – 16°;
- модуль деформации – 12 Мпа;
- показатель текучести – 0,67.

Известно, что несущая способность свай в водонасыщенных глинистых грунтах на момент погружения и по истечении некоторого времени может существенно отличаться в сторону увеличения. Последнее обусловлено процессом фильтрационной консолидации. Авторами указанный эффект исследован при технологии погружения свай вдавливанием. В процессе погружения вдоль граней формируется водно-коллоидная оболочка, выполняющая роль смазки и существенно снижающая сопротивление грунта вдоль боковой поверхности сваи. Имеет место вытеснение грунта и формирование уплотненной зоны вокруг ствола сваи. По мере вдавливания находящаяся в грунте вода медленно отжимается из указанной зоны. На завершающем этапе вдавливания и с течением времени грунтовая вода отжимается из уплотненной зоны. В зависимости от способности к фильтрации уменьшается влияние водно-коллоидной оболочки на трение и контакт происходит между телом сваи и минеральными частицами грунта. Принято считать, что через 6–7 суток в значительной степени завершается процесс фильтрационной консолидации околоствайного пространства. Исследования показывают, что заметное увеличение усилия вдавливания наблюдается через 2–3 часа после прекращения вдавливания.

В практике проектирования свайных фундаментов, устраиваемых по технологии вдавливания, для обеспечения требуемой несущей способности свай необходимо достичь на завершающем этапе погружения величины контролируемого усилия N_k . Последнее должно превышать расчетно-допускаемую нагрузку на сваю не менее чем на 25 %, то есть коэффициент вдавливания должен составлять $K_v=1,25$.

На площадке строительства данного объекта проведены статические испытания шести свай с целью подбора длины и контролируемого усилия на завершающем этапе погружения вдавливанием.

При проектировании расчетно-допускаемая нагрузка принята равной $N_{p.d.}=640$ кН для призматических составных свай сечением 30×30 см и длиной 16,0 м. Контролируемое усилие при вдавливании должно быть не менее 800,0 кН. Фактически при погружении шести опытных свай указанное усилие составляло $N_k \approx 840–960$ кН.

При испытаниях опытных свай нагружение осуществлялось гидравлическими домкратами грузоподъемностью 100 т и производилось путем упора домкрата в грузовую платформу, а контроль за перемещением опытного фундамента велся с помощью двух прогибомеров с ценой деления 0,01 мм. Величина ступеней загрузки 130 кН, первые ступени были приняты равными 260 кН. Переход к последующему этапу на-

гружения производился после достижения условной стабилизации (осадка фундамента при постоянной нагрузке не превышает 0,1 мм за час наблюдений).

Согласно ГОСТ 5686-2012 «Грунты, методы полевых испытаний сваями» испытания свай необходимо вести до нагрузки, превышающей расчетно-допустимую в 1,5 раза, или общей осадки сваи свыше 40 мм. При меньших осадках продолжительность выдержки сваи под нагрузкой на последней ступени нагружения, даже в случае достижения принятой условной стабилизации, должна составить 5 ч.

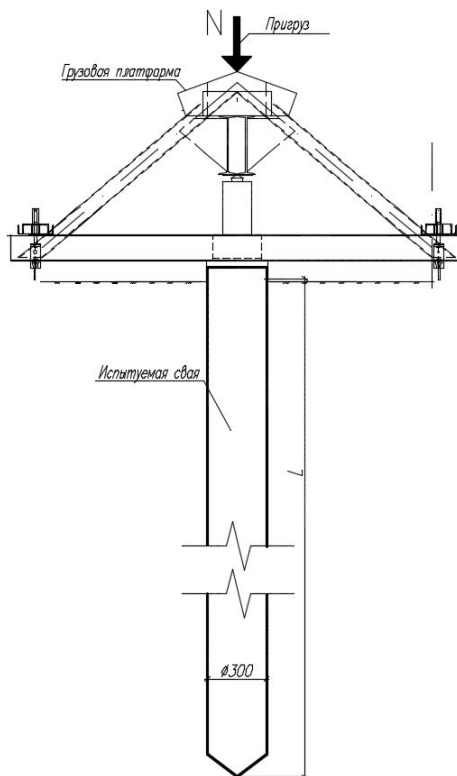


Рис. 1. Схема испытания свай статической нагрузкой

Результаты испытаний сводились в таблицы наблюдений за перемещениями испытываемых свай относительно двух неподвижных реперов. По данным этих таблиц построены графики зависимости осадки сваи S , мм, от нагрузки F , кН.

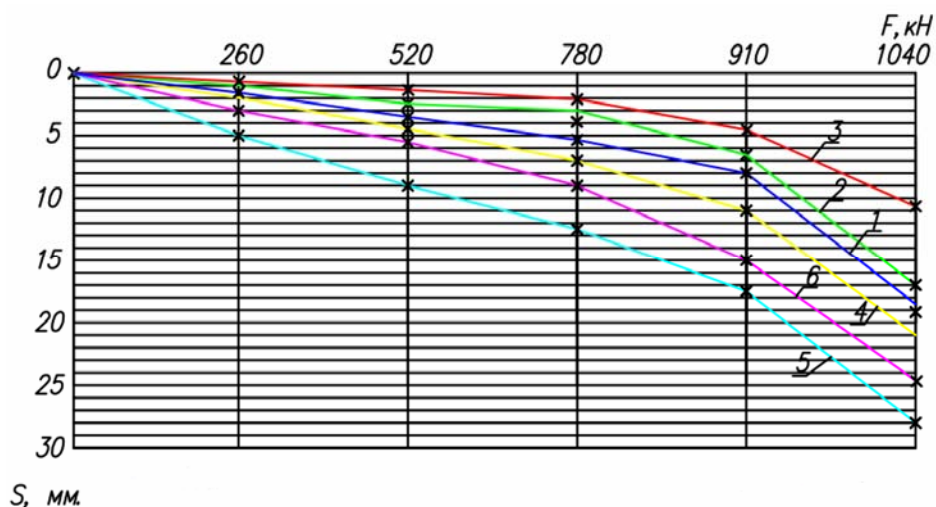


Рис. 2. Зависимость осадки свай S , мм, от нагрузки F , кН:

1 – свая №1; 2 – свая №2; 3 – свая №3; 4 – свая №4; 5 – свая №5; 6 – свая №6

За частное значение предельного сопротивления сваи F_u вдавливающей нагрузке принимаем нагрузку, под воздействием которой фундамент получит осадку S , равную

$$S = \xi \cdot S_{u, \text{мл}},$$

где $S_{u, \text{мл}}$ – предельно допускаемая осадка для данного типа здания, принимаемая согласно СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция» и равная 150,0 мм; ξ – реологический коэффициент, учитывающий отличие условий кратковременных испытаний от условий работы фундамента в процессе эксплуатации и составляющий 0,2 (согласно п. 7.3.5. СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты. Актуализированная редакция»).

$$S = 0,2 \cdot 150 = 30,0 \text{ мм.}$$

Расчетно-допускаемая нагрузка на фундамент по грунту основания определяется по формуле (7.2) п. 7.1.11 СП 24.13330.2011

$$N_{\text{р.д}} = \frac{\gamma_o \cdot F_u}{\gamma_n \cdot \gamma_k},$$

где F_u – частное значение предельного сопротивления фундамента, равное 1040,0 кН; γ_o – коэффициент, учитывающий условия работы при повышении однородности грунта при погружении свай и равный при кустовом расположении свай 1,15; γ_n – коэффициент надежности в зависимости от класса ответственности сооружения и в данном случае равный 1,15; γ_k – коэффициент надежности по грунту, равный 1,2, если несущая способность F_d определена по результатам статических испытаний.

При проведении испытаний максимальная нагрузка на сваи составила 1040,0 кН. Достигнутая величина нагрузки в 1,6 раза превышает расчетно-допускаемую нагрузку $N_{\text{р.д}}=640,0$ кН. При достижении указанной максимальной нагрузки испытания считались завершенными.

Следовательно, расчетно-допускаемая нагрузка на фундамент составила

$$N_{\text{р.д}} = \frac{1,15 \cdot 1040}{1,15 \cdot 1,2} = 866,0 \text{ кН.}$$

В проекте расчетная нагрузка на сваи принята из условия $N_{\text{р.д}} = 640,0$ кН, что меньше допускаемой нагрузки, определенной по результатам данных испытаний, в 1,35 раза. Исходя из опыта, авторами выполнена корректировка свайного поля с уменьшением длины свай на 3–4 м, до 12,0 м при расчетно-допускаемой нагрузке $N_{\text{р.д.}}=640,0$ кН.

Исходя из результатов испытаний шести свай для данного вида грунтов наибольшее значение коэффициента вдавливания составляет порядка

$$K_v = N_k / N_{\text{р.д}} = 960 / 866 = 1,10.$$

Для указанной $N_{\text{р.д}}=640,0$ кН контролируемое усилие вдавливания в практике принято $N_k \approx 705,0$ кН. Если на момент завершения вдавливания указанное усилие не достигнуто, то следует повторно осуществить проверку через два часа, а далее – через сутки. При отрицательном результате рекомендовано проведение стандартных статических испытаний данной сваи и при необходимости устройство дополнительной сваи-дублера.

Выводы:

1. Приведена методика определения фактической несущей способности свай, погруженных вдавливанием, с учетом процесса фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов.
2. Даны рекомендации по определению коэффициента вдавливания на основании результатов статических испытаний.
3. Предлагается технологическая последовательность оценки контролируемого усилия.

4. Рекомендуется применять описанную схему испытаний свайных фундаментов во времени для аналогичных грунтовых условий при строительстве зданий и сооружений.

5. Предложенная методика определения несущей способности свай по результатам натурных испытаний апробирована при строительстве 16-этажного жилого дома.

Список литературы

1. Глухов, В.С. Фундаменты 17-этажного жилого дома по ул. Азовской в г. Ульяновске / В.С. Глухов, М.В. Глухова, А.В. Богомолова // Актуальные проблемы современного фундаментостроения с учетом энергосберегающих технологий: материалы V Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: ПГУАС, 2014. – С. 15–19.
2. Глухов, В.С. Выравнивание осадок свай с учетом взаимовлияния / В.С. Глухов, М.В. Глухова, Т.А. Исаева // Актуальные проблемы современного фундаментостроения с учетом энергосберегающих технологий: материалы IV Международной научно-практической конференции. – Пенза: ПГУАС, 2014. – С. 32–37.
3. Глухова, М.В. Исследование влияния плиты ростверка на осадку свай с уширением / М.В. Глухова, Ю.С. Галова, В.С. Глухов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – №5–2(38). – С. 360–363.
4. Глухов, В.С. Статические испытания свайных фундаментов в пробитых скважинах с уширением на объекте: многоквартирный жилой дом по ул. Карбышева, г. Ульяновск / В.С. Глухов, Ю.С. Вишнякова, Е.С. Кяльгина // Актуальные проблемы современного фундаментостроения с учетом энергосберегающих технологий: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: ПГУАС, 2016. – С. 20–24.
5. Глухов, В.С. Вдавливание свай с наголовником / В.С. Глухов, Ю.С. Галова, И.В. Дубова // Актуальные проблемы современного фундаментостроения с учетом энергосберегающих технологий: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: ПГУАС, 2014. – С. 29–32.
6. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. – М.: Минрегион России, 2011.
7. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. – М.: Минрегион России, 2011.

References

1. Glukhov, V.S. Foundation of 17-storey building on Azovskaya st. in Ulyanovsk // V.S. Glukhov, M.V. Glukhova, A.V. Bogomolova / Current problems of modern foundation engineering taking into account energy saving technologies: materials V of the All-Russian scientific and practical conference. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2014. – P. 15–19.
2. Glukhov, V.S. The settlement equalization from pile-to-pile influence / V.S. Glukhov, M.V. Glukhova, T.A. Isaeva // Current problems of modern foundation engineering taking into account energy saving technologies: materials IV of the All-Russian scientific and practical. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2014. – P. 32–37.
3. Glukhova, M.V. Research of raft foundation's plate influence on the settlement of piles with widening / M.V. Glukhova, Y.S. Galova, V.S. Glukhov // News of southwest state University. – 2011. – №5–2(38). – P. 360–363.
4. Glukhov, V.S. Static tests of pile foundations in a penetration wells with the broadening of object: «Dwelling house on the street Karbysheva, Ulyanovsk» / V.S. Glukhov, Y.S. Vishnyakova, E.S. Kyalgina // Current problems of modern foundation engineering taking into account energy saving technologies: materials VII of the All-Russian

scientific and practical. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2016. – С. 20-24.

5. Glukhov, V.S. Cave-in of piles / V.S. Glukhov, Y.S. Galova, I.V. Dubova // Current problems of modern foundation engineering taking into account energy saving technologies: materials VII of the All-Russian scientific and practical. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2014. – P. 29–32.

6. SP 22.13330.2011 The buildings base. Updated version of SNiP 2.02.01-83* / Approved by the Ministry of Regional Development of the Russian Federation. – 2011.

7. SP 24.13330.2011 Pile foundations. Updated version of SNiP 2.02.03-85 / Approved by the Ministry of Regional Development of the Russian Federation. – 2011.

УДК 69

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Гучкин Игорь Сергеевич,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Ласьков Николай Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Строительные конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Жуков Александр Николаевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Guchkin Igor Sergeevich,
Candidate of Sciences, Professor
of the department «Building structures»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Laskov Nikolay Nikolaevich,
Doctor of Sciences, Professor, Head
of the department «Building structures»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Zhukov Alexander Nikolaevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Building constructions»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

УСИЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ КИРПИЧНОЙ СТЕНЫ, ОСЛАБЛЕННОЙ НАКЛОННОЙ МАГИСТРАЛЬНОЙ ТРЕЩИНОЙ

И.С. Гучкин, Н.Н. Ласьков, А.Н. Жуков

Приводится опыт усиления стены кирпичного здания стальным поясом. Анализируется напряженно-деформированное состояние стены и грунта в основании фундамента при образовании магистральной трещины. Предлагается алгоритм расчета конструкции усиления стены стальным поясом. Рассматривается конструкция пояса и стабилизатора напряжений, включенного в его цепь. Дается последовательность монтажа элементов усиления стены.

Ключевые слова: кирпичная стена, магистральная трещина, усиление, стальной пояс, стабилизатор напряжений, расчет

REINFORCEMENT OF A BEARING BRICK WALL WEAKENED BY AN INCLINED MAIN CRACK

I.S. Guchkin, N.N. Laskov, A.N. Zhukov

The experience of designing reinforcement of a brick building wall with a steel belt is reported. The stress-strain state of the wall and the soil in the foundation at the formation of the main crack is analyzed. An algorithm for calculating the structure of the wall reinforcement by a steel belt is given. The construction of the belt and the stress stabilizer within its circuit is considered. The sequence of mounting the wall reinforcement elements is given.

Keywords: brick wall, main crack. reinforcement, steel belt, stress stabilizer, calculation

Магистральные трещины распространяются на всю высоту стены, разделяя ее на отдельные части (рис. 1), предрасположенные к взаимному сдвигу и внезапному обрушению. Причиной образования трещин может быть неравномерная осадка фундаментов, например, из-за неоднородной структуры грунта, его морозного пучения или незаконченной фильтрационной консолидации водонасыщенного слоя.

При проектировании конструкции усиления стены, отвечающем требованиям надежности и экономической целесообразности, ставилась задача, при решении которой требовалось учесть не только неравномерность осадки фундаментов, но и разность температурных деформаций стального пояса и материала стены, а также возможность среза участка стены по горизонтальному шву кирпичной кладки [1, 2].

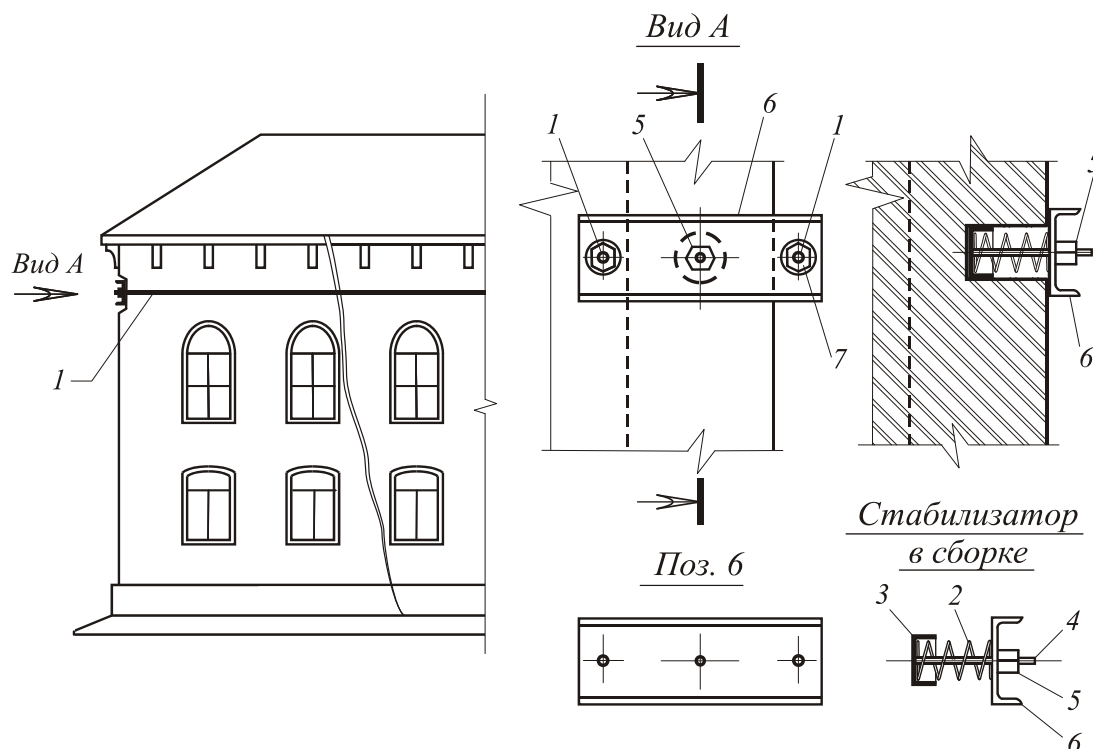


Рис. 1. Усиление кирпичной стены стальным поясом со стабилизирующим устройством СНТ:
1 – тяж (стержень); 2 – спиральная пружина; 3 – стальная чашка; 4 – шток; 5 – гайка штока;
6 – траверса; 7 – гайка тяжа

Традиционным способом усиления стены с магистральной трещиной является установка на уровне междуэтажного перекрытия здания стального напряженного пояса, состоящего из тяжей и траверс прокатного профиля, препятствующего раскрытию трещины и внезапному обрушению (см. рис. 1).

Предлагается алгоритм расчета тяжей стального пояса применительно к кирпичной стене здания с ленточным фундаментом, в теле которого образовалась магистральная трещина с вершиной у подошвы фундамента, разделяющая стену на два блока (рис.2). Причиной образования трещины явилось локальное замачивание грунта основания фундамента утечками из водонесущих коммуникаций и соответствующее снижение модуля деформации грунта E на участке $A-B$.

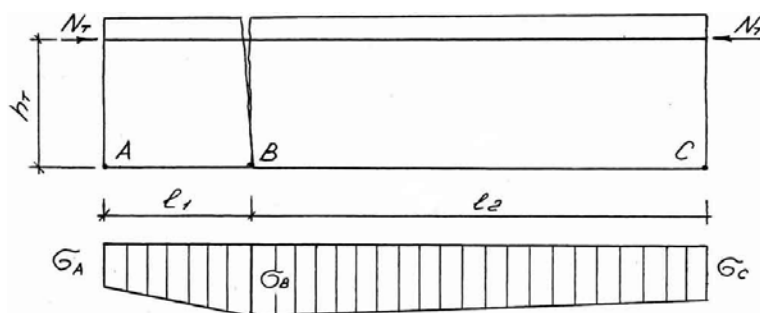


Рис.2. Расчетная схема стены, усиленной стальным поясом

Предположим, что блоки являются абсолютно жесткими и перемещаются относительно друг друга в результате поворота вокруг точки B .

При усилении стены поясом в некоторый момент последний будет выполнять роль дополнительной связи, препятствующей дальнейшим взаимным перемещениям блоков. Однако с течением времени под воздействием релаксации напряжений грунта на

участке $A-B$ будет происходить постепенное перераспределение усилий, а именно: напряжения в точках A и C уменьшатся до расчетных величин σ_a и σ_c , а напряжения в точке B возрастут до σ_b . Усилия в тяжах пояса также будут увеличиваться от 0 до N_T . Будем считать, что напряжения под подошвой фундамента σ на участках l_1 и l_2 меняются по линейному закону.

Запишем условия равновесия здания, усиленного тяжами. Из проекции всех усилий на вертикальную ось получаем:

$$\frac{\sigma_a + \sigma_b}{2} \cdot l_1 + \frac{\sigma_b + \sigma_c}{2} \cdot l_2 = \sigma_0 (l_1 + l_2). \quad (1)$$

Приравняем нулю моменты, действующие на левый блок, относительно точки B :

$$\sigma_0 \cdot \frac{l_1^2}{2} - \sigma_a \cdot \frac{l_1^2}{2} - (\sigma_b - \sigma_a) \cdot \frac{l_1^2}{6} - \frac{M}{b} = 0, \quad (2)$$

где $M = \sum_1^i N_{ii} h_{ii}$ – изгибающий момент, воспринимаемый всеми тяжами; b – ширина подошвы фундамента.

Запишем аналогичное уравнение для правого блока:

$$-\sigma_0 \cdot \frac{l_1^2}{2} + \sigma_c \cdot \frac{l_2^2}{2} - (\sigma_b - \sigma_c) \cdot \frac{l_2^2}{6} + \frac{M}{b} = 0. \quad (3)$$

В итоге имеем три уравнения с четырьмя неизвестными. Четвертое уравнение получаем из линейной зависимости деформаций основания в точках A , B и в точке с напряжением σ_0 :

$$\frac{S_a - S_b}{l_1} = \frac{3(S_b - S_0)}{2l_2}, \quad (4)$$

где S_a , S_b , S_0 – осадки основания в точках A , B и в точке с напряжением σ_0 за период от t_0 до $t = \infty$.

После преобразований (1) – (4) получена система из четырех линейных уравнений с четырьмя неизвестными σ_a , σ_b , σ_c , M :

$$\begin{cases} l_1 \sigma_a + (l_1 + l_2) \sigma_b + l_2 \sigma_c = 2(l_1 + l_2) \sigma_0; \\ 2bl_2^2 \sigma_a + bl_1^2 \sigma_b + 6M = 3bl_1^2 \sigma_0; \\ bl_2^2 \sigma_b + 2bl_2^2 \sigma_c + 6M = 3bl_2^2 \sigma_0; \\ 2K_a l_2 \sigma_0 - K_b (3l_1 + 2l_2) = -3K_b l_1 \sigma_0, \end{cases} \quad (5)$$

где K_a и K_b – коэффициенты, характеризующие изменение деформационных свойств в точках A и B за период времени от t_0 до $t = \infty$, определяемые по формуле

$$K_{a(b)} = \frac{8\beta}{\pi^2 E_0} \left(e^{-N} + \frac{1}{9} e^{-9N} \right). \quad (6)$$

Коэффициенты, входящие в формулу (6), находим из следующих зависимостей:

$$\beta = \frac{1 - 2\nu^2}{1 - \nu}, \quad (7)$$

где ν – коэффициент бокового расширения грунта;

$$N = \frac{\pi^2 C_V}{4h_3^2} t_0, \quad (8)$$

где h_3 – высота эквивалентного слоя грунта,

$$h_3 = A_w b. \quad (9)$$

Здесь A_w – коэффициент эквивалентного слоя грунта; b – ширина подошвы фундамента.

$$C_V = \frac{K_f E_0}{\beta \gamma_w}, \quad (10)$$

где K_f – коэффициент фильтрации; γ_w – удельный вес воды.

Решение системы уравнений (5) относительно момента M находится следующим образом:

$$M = \frac{D_M}{D}, \quad (11)$$

где D – определитель системы; D_M – определитель, получающийся из D заменой столбца, составленного из коэффициентов при неизвестном M , столбцом из свободных членов.

После нескольких преобразований окончательно имеем:

$$M = \frac{\sigma_0 b l_1^2 l_2^2 (l_1 + l_2) (K_a + K_b)}{3 \left[K_a l_2 (l_1 + l_2)^2 + K_b l_1 (3l_1^2 + 5l_1 l_2 + 2l_2^2) \right]}. \quad (12)$$

Усилие в тросах, устанавливаемых на высоте h_T , равно:

$$N_T = \frac{M}{h_T}.$$

Требуемая площадь сечения тросов определяется по формуле

$$A_s = \frac{N_T}{R_s}.$$

Принято два троса. Эскиз усиления стены поясом представлен на рис. 1.

Прочность кирпичной кладки на срез по неперевязанному шву проверяется из условия

$$N \leq 0,3 R_{sq} l \delta,$$

где R_{sq} – расчетное сопротивление кладки на срез по неперевязанному шву; l, δ – соответственно длина и толщина стены; $0,3$ – коэффициент условий работы кладки в усиленной стене.

Для исключения влияния температурных деформаций пояса на усилие обжатия стены в его цепь включен пружинный стабилизатор напряжений (см. рис. 1), рассчитываемый по следующей схеме:

Определяются параметры пружины стабилизатора напряжений, обеспечивающие, при изменении температуры внешней среды на Δt , °C, усилие натяжения пояса в диапазоне $\Delta N_t = (0,03 \div 0,05) N_t$.

Находится величина относительного удлинения тяжа по формуле

$$\Delta l = (\alpha_{ts} - \alpha_{tk}) \Delta t \cdot l \cdot 10^3,$$

где α_{ts} , α_{tk} – соответственно, коэффициенты линейного расширения стали и кирпичной кладки; l – длина тяжа пояса.

Задается наружный диаметр пружины 100...150 мм, высотой 200...300 мм с рабочим усилием сжатия N_t .

По справочнику подбираются номер пружины и ее геометрические характеристики d , n , R_1 , R_2 , G .

При отсутствии стандартной пружины с требуемыми характеристиками можно подобрать две нестандартные, размещаемые «одна в другой» и рассчитываемые на работу в паре по условию совместности деформаций (осадок). Для этого находятся усилие и осадка каждой из пары пружин стабилизирующего устройства при натяжении тяжей силой N_t .

Исходные данные и последовательность расчета.

Пружины свиты из проволоки одного диаметра d , имеют одинаковое число витков n . Высота наружной и внутренней пружин в свободном состоянии одинаковая. Радиус осевой линии витка наружной пружины R_1 , внутренней R_2 . Модуль упругости при сдвиге G .

Обозначив через P_1 и P_2 усилия, приходящиеся на каждую из пружин, составляем уравнение равновесия:

$$P_1 + P_2 = N_t.$$

Обозначив через λ_1 и λ_2 величины осадки соответственно наружной и внутренней пружин, составляем условие совместности деформаций:

$$\lambda_1 = \lambda_2.$$

Записываем выражения для определения деформаций:

$$\frac{64P_1R_1^3n}{Gd^4} = \frac{64P_2R_2^3n}{Gd^4}.$$

После упрощения имеем:

$$P_1R_1^3 = P_2R_2^3.$$

Подставляем значение P_2 в уравнение равновесия и находим P_1 . Определяется осадка пружин:

для наружной пружины

$$\lambda_1 = \frac{64P_1R_1^3n}{Gd^4},$$

для внутренней пружины

$$\lambda_2 = \frac{64P_2R_2^3n}{Gd^4};$$

условие совместности деформации $\lambda_1 = \lambda_2$ должно выполняться.

Находятся касательные напряжения, возникающие в витках наружной и внутренней пружин:

$$\tau_1 = \frac{16P_1R_1}{\pi d^2} \left(1 + \frac{d}{4R_1} \right),$$

$$\tau_2 = \frac{16P_2R_2}{\pi d^2} \left(1 + \frac{d}{4R_2} \right).$$

Проверяется выполнение условий

$$\tau_1 < R_s; \tau_2 < R_s.$$

Размещение стабилизирующего устройства в стальном поясе возможно в двух вариантах:

1 вариант. Стабилизатор СНТ устанавливается в торце стены (см. рис. 1). Монтаж и включение в работу состоит из следующих операций:

- в торце стены в кирпичной кладке на уровне пояса сверлится скважина;
- изготавливается стабилизатор напряжений, состоящий из пружины 2, чашки 3 с приваренным к ее днищу штоком 4 с винтовой нарезкой на конце и гайкой 5, которой он соединяется с поперечной траверсой 6;
- с помощью пресса (домкрата) пружина сжимается (осаживается) до расчетного усилия. Усилие осадки фиксируется на штоке гайкой 5;
- стабилизатор размещается в скважине, и к нему присоединяются остальные элементы пояса (1,6,7);
- с помощью гаек 7 усилием, исключающим провисание от собственного веса, тяжи натягиваются;
- вывинчиванием на штоке гайки 5 пружина освобождается от связи и включается в работу пояса.

2 вариант. Стабилизатор СНП (рис. 3) устанавливается в средней части пояса (стены). Монтаж и включение в работу содержат следующие операции:

- к тяжу 1 приваривается диск 2. Затем на тяж насаживается пружина 3. Тяж с пружиной размещается в стальном стакане 4;
- стержни 5 (2шт.) одним концом привариваются к стакану 4, а другим – к тяжу 1а;
- стабилизатор, совместно с тяжами 1, 1а, включается в цепь стального пояса и размещается в штрабе кирпичной кладки или на поверхности стены;
- пояс натягивается домкратом. Усилие натяжения фиксируется гайками обычным способом.

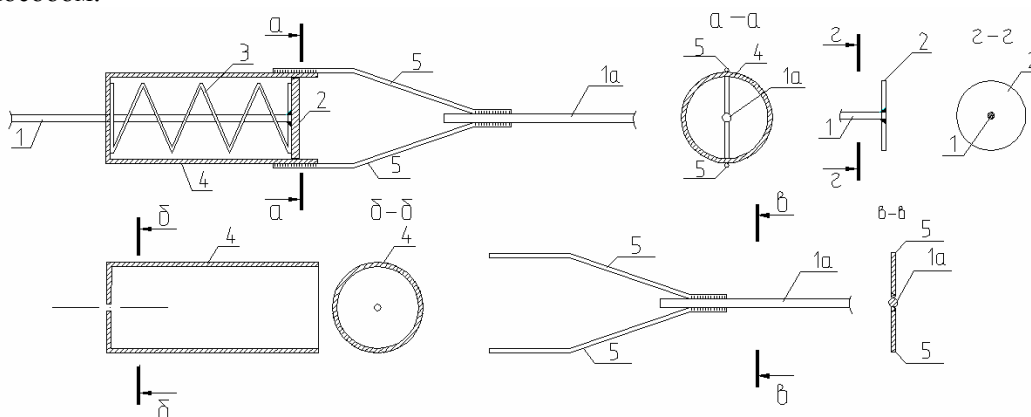


Рис. 3. Конструкция стабилизатора СНП

Выводы:

1. Проанализировано напряженно-деформированное состояние стены и грунтового основания фундамента при образовании магистральной трещины.
2. Разработаны алгоритмы расчета прочности стального пояса и несущей стены с магистральной трещиной.

3. Предложены новая конструкция стабилизатора напряжений пояса и метод расчета.
4. Даны последовательность монтажа пояса, а также способ его включения в работу.

Список литературы

1. Гучкин, И.С. Эксплуатация и реконструкция сооружений / И.С. Гучкин, Н.Н. Ласьков. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 195 с.
2. Danilov, A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 5–8. – С. 219–225.

References

1. Guckin, I.S. Maintenance and reconstruction of constructions / I.S. Guckin, N.N. Laskov. – Penza: PGUAS, 2014. – 195 p.
2. Danilov. A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 5–8. – P. 219–225.

УДК 692.48

Петрозаводский государственный университет

Россия, 185910, г. Петрозаводск, просп. Ленина, д.33

Селютина Любовь Федоровна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология и организация
строительства»
E-mail: selutinalf@mail.ru**Емельянова Наталья Владимировна**,
студентка
E-mail: astori1997@mail.ru*Petrozavodsk State University*Russia, 185910, Petrozavodsk, 33,
Lenin avenue**Selutina Lyubov Fyodorovna**,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Technology
and organization of construction»
E-mail: selutinalf@mail.ru**Emelyanova Natalia Vladimirovna**,
Student
E-mail: astori1997@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДОЩАТЫХ ФЕРМ С УЗЛОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЛАСТИНАХ

Л.Ф. Селютина, Н.В. Емельянова

Приведены результаты исследования четырех вариантов дощатой фермы пролетом 5,5 м с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах (МЗП). Усилия в стержнях фермы определены в ПК ЛИРА-САПР. Перемещения узлов фермы рассчитаны по формуле Мора. Выполнено сравнение расхода древесины и металла. Показаны преимущества фермы с направлением раскосов вдоль короткой диагонали трапеции. Испытания узлов с соединениями на МЗП выполнены на оборудовании SHIMADZU.

Ключевые слова: дощатая ферма, металлические зубчатые пластины, прочность, перемещения узлов, расход материалов, испытания

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF BOARD TRUSSES WITH NODAL CONNECTIONS ON METAL GEAR PLATES

L.F. Selutina, N.V. Emelyanova

Research of four variants of a board truss with a span of 5,5 m with nodal connections of metal gear plates (MGP) is done. The forces the farm terminats are specified in the PC LIRA CAD. The displacements of the nodes are calculated by the Mohr formula. The comparison of wood and metal consumption is performed. The advantages of the truss with the direction of braces along the short diagonal of the trapezoid are shown. Testing of the units with connections on the MGP is made on SHIMADZU equipment.

Keywords: board farm, metal gear plates, strength, moving nodes, tests

Введение

Применение деревянных конструкций в покрытиях гражданских зданий основано на технологиях, совмещающих максимальное использование конструкций заводского изготовления с удобством их транспортирования и монтажа на строительной площадке. Металлические зубчатые пластины (МЗП) являются одним из средств создания эффективных соединений деревянных конструкций, позволяющих реализовать преимущества сборного строительства.

Широкое применение ферм с соединениями на металлических зубчатых пластинах в новом строительстве и при реконструкции зданий обусловлено их низкой материалоемкостью, надежностью соединений, высокой технологичностью.

Разработкой конструкций с узловыми соединениями на МЗП занимались В.Г Котлов, А.В. Крицын, Д.В. Лоскутова [2, 3, 4, 6]. На основе полученных экспериментальных данных разработан метод расчета напряженно-деформированного состояния при взаимодействии древесины и МЗП с учетом упрочнения древесины в зоне контактного слоя древесины и МЗП [4]. Приведены результаты испытаний треугольных ферм пролетами 8 м [3], 12 м [5], 7,6 м (в том числе консоли по 0,7 м) [4].

Для моделирования совместной работы МЗП и деревянных элементов в расчетных схемах стержневых конструкций предлагается использовать метод конечных элементов [4, 10]. Методика расчета деревянных конструкций на МЗП реализована в алгоритме, который состоит из программных модулей для ЭВМ (4).

Для исследования изменений свойств древесины и определения напряжений в зоне контакта древесины и МЗП использован метод поверхностного зондирования [4].

Исследования рационального расположения зубчатых пластин в стыках описаны в работе [6].

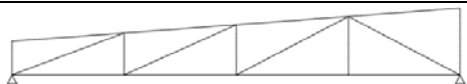
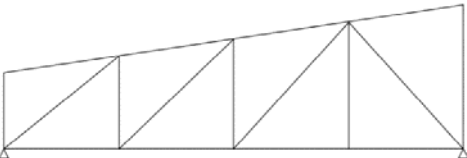
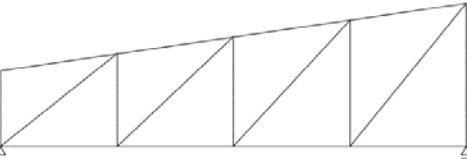
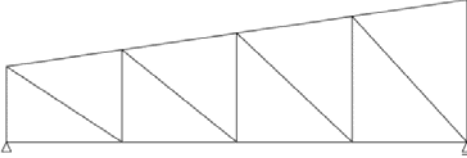
Материалы исследований ферм с непараллельными поясами отсутствуют.

Задачи исследования

Первоначально в архитектурно-планировочном разделе проекта фельдшерско-акушерского пункта в одном из населенных пунктов республики Карелия была предложена ферма, представленная в табл. 1, вариант 1. Проектирование фермы небольшой высоты привело к значительной площади МЗП и перемещениям узлов фермы, превышающим нормативные требования. Поэтому были предложены дополнительно 3 варианта фермы (табл. 1, варианты №№ 2, 3, 4).

Т а б л и ц а 1

Геометрические схемы ферм

№ варианта фермы	Схема фермы	Высота фермы, мм	
		на левой опоре	на правой опоре
1	 Высота фермы в середине пролета 600 мм	400	800
2	 Высота фермы в середине пролета 1300 мм	900	1700
3	 Высота фермы в середине пролета 1300 мм	900	1700
4	 Высота фермы в середине пролета 1300 мм	900	1700

Все варианты фермы рассчитаны, и выполнено сравнение их технических показателей.

Задачами нашего исследования являлись: определение оптимальной высоты фермы и направления раскосов, перемещений узлов и расхода древесины и металла (МЗП); испытания узлов фермы.

В исследовании принят сортамент пиломатериалов и металлических зубчатых пластин, используемых предприятием «Карельский профиль»: сечение досок 197×42 мм (для поясов) и 147×42 мм (для раскосов и стоек), металлические зубчатые пластины производства группы компаний ТехКом и MiTek.

Геометрические характеристики ферм

Важнейшим геометрическим параметром фермы является ее относительная высота H/l . Чем она больше, тем меньше усилия в поясах, но при этом растет суммарная протяженность элементов решетки.

Рекомендуемая высота фермы в середине пролета составляет $1/5$ – $1/6$ пролета (для фермы пролетом 5,5 м высота составляет 917–1100 мм). При использовании упрощенного анализа для фермы с треугольной решеткой высота фермы должна быть не менее $197 \cdot 10 = 1970$ мм и не менее $0,15 \cdot 5,5 \text{ м} = 0,825 \text{ м}$ [1]. Геометрические схемы ферм приведены в табл. 1.

Методология и методы исследования

В ходе работы был использован экспериментально-теоретический метод. В теоретической части исследования применены общие методы строительной механики и теории расчета деревянных конструкций. Экспериментальные исследования выполнены с использованием современного испытательного оборудования SHIMADZU в лаборатории института лесных, горных и строительных наук Петрозаводского государственного университета.

Податливость узлов

Податливость соединений, на которую обращают внимание исследователи, зависит от величины усилий, фактической площади МЗП, расположения плоскости МЗП по отношению к элементам фермы, к направлению действующих усилий. По перечисленным факторам видно, что податливость узловых соединений существенным образом влияет на общую деформативность конструкции. Фермы с узловыми соединениями на МЗП обладают повышенной деформативностью.

Для учета податливости СП 64.13330.2017 [9] регламентирует величину предельных деформаций с линейной зависимостью от уровня напряжений.

Методика расчета перемещений узлов с учетом единичной податливости (податливости, приходящейся на единицу площади пластины и единицы усилия) предложена В.Г. Котловым. В данном методе используется податливость соединения, полученная в результате машинных испытаний [2].

Определение усилий в стержнях фермы

Усилия в рассматриваемых вариантах ферм были определены на ЭВМ с использованием пакета прикладных программ ЛИРА-САПР.

Изгибающие моменты в поясах фермы определены для четырехпролетной балки по деформированной схеме с расчетом изгибающих моментов следующих видов: опорных от прогиба фермы; опорных от внеузловой нагрузки; пролетных от внеузловой нагрузки.

По рекомендациям Еврокода 5 изгибающие моменты в неразрезных элементах определяются из условия, что элемент представляет собой балку с простой опорой в каждом узле. Эффект прогиба в узлах и частичная неподвижность соединений учитываются путем снижения на 10 % моментов во внутренних опорах элемента [1].

Максимальные продольные силы в элементах фермы представлены в табл. 2.

Максимальные продольные силы в элементах фермы, кН

Наименование элемента	Максимальное усилие, кН							
	№ стержня	Вар. №1	№ стержня	Вар. №2	№ стержня	Вар. №3	№ стержня	Вар. №4
Нижний пояс	2	15,157	2	7,0258	2	7,0268	3	7,019
Верхний пояс	7	-15,304	9	-7,3263	9	-7,3274	8	-7,3217
Раскос	14	-13,812	14	-7,9817	14	-7,9826	18	7,4413
Стойка	11	-2,493	12	-2,5908	6	-6,6511	5	-6,6069

Усилия в стержнях фермы №1 превышают усилия в поясах и раскосах других вариантов фермы в 1,85–2,16 раза.

Расход древесины представлен в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Расход древесины, м³

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
0,145	0,1573	0,1577	0,1561

Меньший расход древесины для варианта фермы №4 объясняется расположением раскосов по направлению меньшей диагонали трапеции, образованной стойками и верхним и нижним поясами фермы.

Расчет узлов ферм

Теоретическая площадь пластины определена по формулам СП 64.13330.2017 [9], Рекомендаций [8]. В табл. 4 приведена площадь пластин, скорректированная по конструктивным требованиям [8].

Т а б л и ц а 4

Фактическая площадь пластины в узле, м²

№ узла	Вариант 1			Вариант №2	Вариант №3	Вариант №4
	Площадь пластины, м ²	Угол наклона раскоса к нижнему поясу/верхнему поясу	Расчетная длина среза, мм			
1	0,066	20°/19°	210	0,0468	0,0468	0,0168
2	0,0564	23°30'/19°	217	0,0396	0,0396	0,054
3	0,0684	27°/23°	217	0,036	0,036	0,048
4	0,0168	90°/94°	-	0,0168	0,05	0,048
5	0,054	30°10'/27°	117	0,051	0,0266	0,051
6	0,0168	90°/94°	-	0,0168	0,0168	0,042
7	0,0266	90°/86°	-	0,0168	0,0432	0,0168
8	0,084	20°/19°	165	0,0456	0,0456	0,044
9	0,0456	20°/19°	3	0,0432	0,0432	0,0432
10	0,0816	27°/23°	2,8	0,0588	0,0336	0,045

Площади пластин в узлах №№ 1, 2, 3 варианта №1 превышают в 1,4–4 раза площади МЗП узлов других вариантов фермы, что объясняется небольшими углами наклона раскосов фермы к нижнему поясу. Площади МЗП уменьшаются на 50 % при углах наклона раскосов более 30°.

Наибольший расход металла (МЗП) в ферме с небольшой высотой (вариант №1) превышает на 30 % расход металла в ферме №4. Наименьший расход металла – в

ферме № 4. Увеличение расхода металла в ферме №2 составляет 2,85 %, а в ферме №3 – 5,4 % (по сравнению с фермой варианта №4).

Расчет ферм по 2-й группе предельных состояний

Расчет перемещений узлов фермы выполнен по формуле перемещений (формула Мора):

$$\Delta = \sum_1^n \frac{N \cdot N_1 \cdot l}{E'_{\text{пр}} \cdot F},$$

где N_i – осевое усилие в элементах от единичной силы, приложенной в том узле, перемещение которого определяется; N – расчетное осевое усилие в элементах от полной нагрузки; l – длина элемента фермы; $F_{\text{бр}}$ – площадь брутто поперечного сечения элемента фермы; $E'_{\text{пр}}$ – приведенный модуль упругости древесины.

Перемещения узлов фермы с учетом податливости соединений определены с использованием приведенного модуля упругости древесины, вычисленного по формуле

$$E'_{\text{пр}} = \frac{E'}{1 + \left(\frac{E' \cdot F_{\text{бр}} \cdot \sum_{i=1}^m \delta_i}{N \cdot l} \right)},$$

где $E' = 300 \cdot R_c$ [7]; $F_{\text{бр}}$ – площадь брутто поперечного сечения элемента фермы; N – действующее в элементе осевое усилие; l – длина элемента; δ_i – деформации соединения при полном использовании его расчетной несущей способности; m – общее число присоединений элемента.

На рис. 1–4 указаны перемещения узлов фермы.

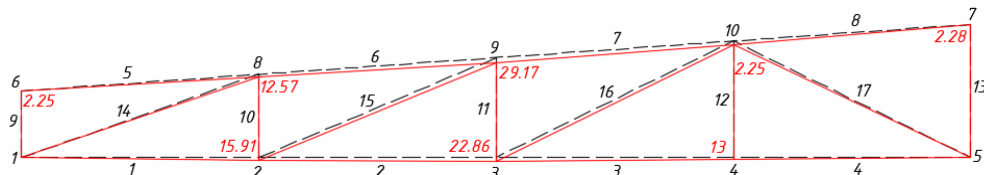


Рис. 1. Перемещения узлов фермы, мм, вариант №1

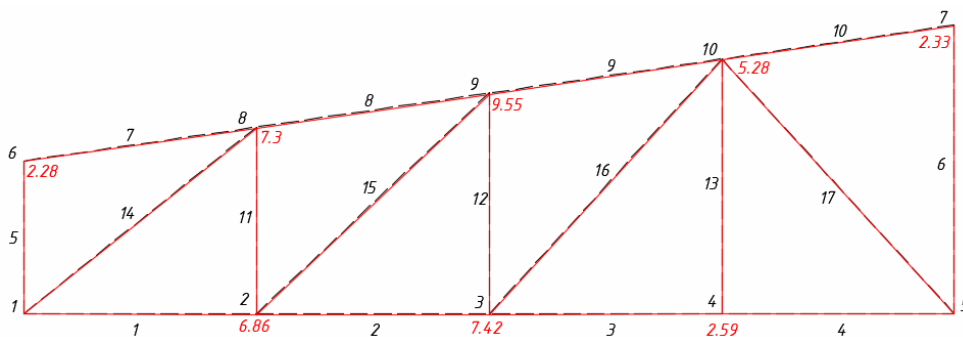


Рис. 2. Перемещения узлов фермы, мм, вариант №2

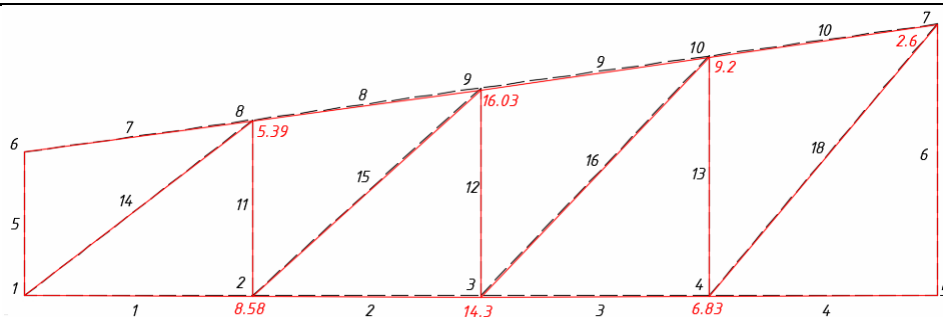


Рис. 3. Перемещения узлов фермы, мм, вариант №3

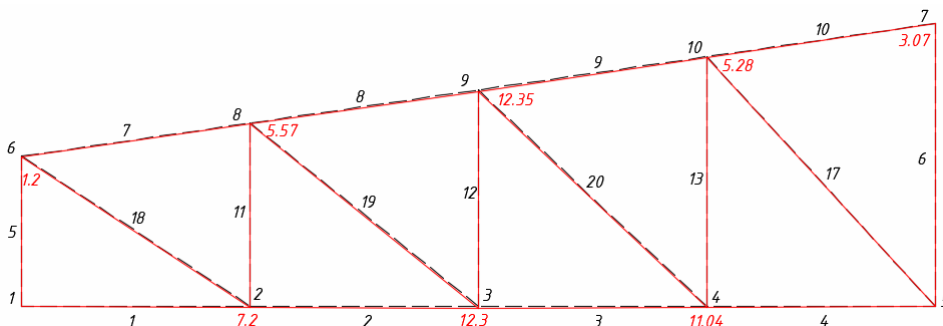


Рис. 4. Перемещения узлов фермы, мм, вариант №4

Вертикальный предельный прогиб составляет 28,695 мм. Перемещения узлов нижнего пояса всех исследованных ферм не превышают предельных значений.

В рассчитанных фермах распределение усилий в раскосах подобно распределению поперечной силы в балочных сплошных конструкциях; они имеют наименьшую величину в середине пролета.

Вертикальная составляющая прогиба фермы, вызванная деформациями поясов, близка по величине к прогибу от равномерно распределенной нагрузки в балке сплошного сечения. Деформации решетки увеличивают прогиб, вызванный деформациями поясов, на 20 %.

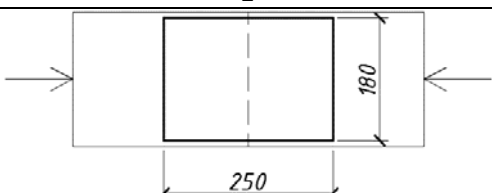
Испытания узлов фермы

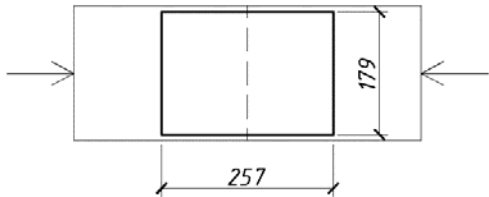
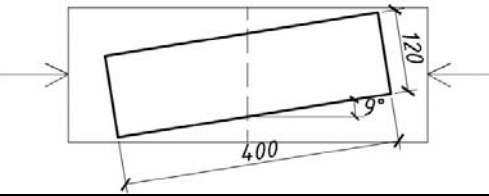
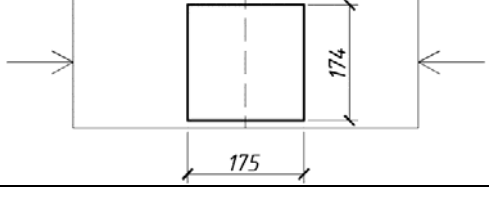
Испытания узлов на сжатие проведены на испытательной машине SHIMADZ при постоянной скорости деформаций 2 мм/мин.

Характеристики узлов представлены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Характеристики узлов на МЗП

№ узла	Схема узла	Размеры пластины, мм	Толщина, мм	α , град.	β , град.	Производитель МЗП
1	2	3	4	5	6	7
1		250×180	2	0	0	ТехКом

1	2	3	4	5	6	7
2		257×179	2	0	0	TexКом
3		400×120	2	9	0	TexКом
4		175×174	2	90	0	MiTek

Диаграммы деформаций узлов при сжатии представлены на рис. 5.

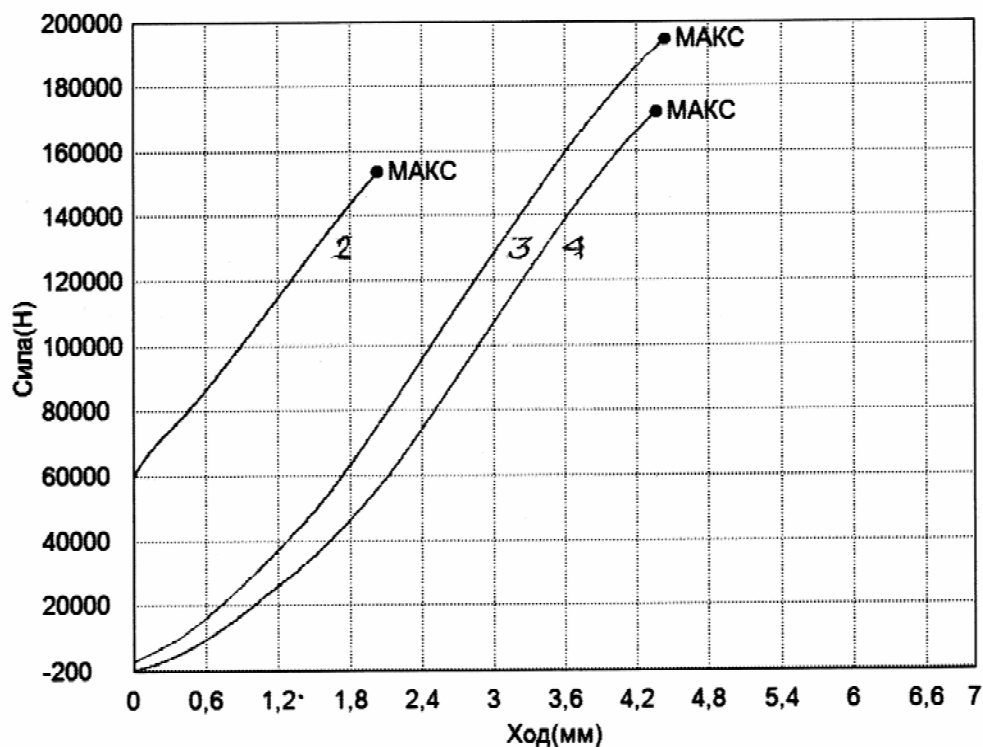


Рис. 5. Диаграмма деформаций соединений № 2, 3, 4 (см. табл. 5)

Разрушение узлов произошло при разрыве межклеточных связей волокон древесины и потере устойчивости перегородок МЗП. Участок разрушения расположен на доске ниже линии стыка, длина его (в направлении вдоль волокон) составляет 1,0–1,5 длины зубцов. Выгиб соединения при разрушении направлен в сторону более мягких соседних слоев древесины.

Характер разрушения узла показан на рис. 6, 7.



Рис. 6. Деформации перегородок между зубцами (ряд пластин, примыкающих к стыку досок слева)



Рис. 7. Потеря устойчивости перегородок между зубцами и раскалывание древесины досок

Характер разрушения пластический. Коэффициент надежности при пластическом разрушении [7] и отношение опытной разрушающей нагрузки к теоретической представлены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Коэффициент надежности при пластическом разрушении

№ узла	Коэффициент надежности при пластическом разрушении [7]	Отношение опытной разрушающей нагрузки к теоретической
1	2,57	3,38
2	2,64	3,25
3	2,63	4,26
4	2,63	3,98

Диаграммы деформаций узлов при сжатии представлены на рис. 5.

Выводы

Приведены результаты теоретических исследований фермы с непараллельными поясами и соединениями на МЗП по прочности и жесткости; результаты экспериментальных исследований узлов конструкций.

1. Соблюдение рекомендаций по назначению высоты фермы обеспечивает уменьшение усилий в элементах фермы, снижение расхода металла и уменьшение перемещений узлов конструкции.

2. Уменьшение усилия в опорном восходящем раскосе в 2 раза можно достичь увеличением высоты фермы.

3. Восходящий раскос в ферме работает на сжатие, нисходящий – на растяжение.

4. Меньший расход древесины в фермах с непараллельными поясами получен при направлении раскосов вдоль меньшей диагонали трапеции, образованной поясами и стойками фермы.

5. Замена раскоса с восходящего на нисходящий приводит к изменению знака усилия в нем, но абсолютная величина усилия остается постоянной.

6. Опытная разрушающая нагрузка превышает теоретическую величину в 3,25–4,26 раза. Теоретическая величина разрушающей нагрузки определена с учетом коэффициента надежности при пластическом разрушении.

Результаты данных исследований могут быть использованы для развития и уточнения существующих методов расчета в технологии проектирования дощатых ферм, в том числе и с новыми нагельными соединениями, имеющими лучшие качества, чем соединения на МЗП.

Список литературы

1. EN 1995-1-1. Eurocode 5: Design of Timber Structures. Part I-1: General-Common rules and rules for buildings. European committee for standardization. – Brussels, 2004.

2. Котлов, В.Г. Пространственные конструкции из деревянных ферм с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах: автореф. дис... канд. техн. наук (05.23.01) / В.Г. Котлов. – Казань: Казанский инженерно-строительный институт, 1992. – 15 с.

3. Крицын, А.В. Расчет сквозных деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах с учетом упруго-вязких пластических деформаций: автореф. дис... канд. техн. наук (05.23.01) / А.В. Крицын. – Н. Новгород: ННГСАУ, 2005. – 26 с.

4. Лоскутова, Д.В. Прочность и деформативность узловых соединений на металлических зубчатых пластинах в сквозных деревянных конструкциях: автореф. дис... канд. техн. наук (09.06.26) / Д.В. Лоскутова. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2009. – 24 с.

5. Миронов, В.Г. Деформирование дощатых ферм с соединениями на металлических зубчатых пластинах при кратковременных и длительно действующих нагрузках / В.Г. Миронов // Совершенствование строительных конструкций из дерева и пластмасс: межвузовский тематический сборник трудов. – СПб., 1992. – С. 48–55.

6. Павленко, М.Н. Особенности выполнения расчета узлов на металлических зубчатых пластинах / М.Н. Павленко // Научный потенциал регионов на службу модернизации. – 2012. – №1(2). – С. 41–46.

7. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1980. – 40 с.

8. Рекомендации по проектированию и изготовлению дощатых конструкций с соединениями на металлических зубчатых пластинах / ЦНИИСК им. Кучеренко. – 1983. – 40 с.

9. СП 64.13330.2017. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 «Деревянные конструкции». – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2017. – 105 с.

10. Селютина, Л.Ф. Исследования дощатых ферм с податливыми соединениями / Л.Ф. Селютина, В.В. Корнилов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер.: Естественные и технические науки. – 2009. – №7 (101). – С. 26–30.

References

1. EN 1995-1-1. Eurocode 5: Design of Timber Structures. Part I-1: General-Common rules and rules for buildings. European committee for standardization. – Brussels, 2004.
2. Boilers, V.G. Spatial structure of wooden trusses with nodal connections with metal gear plates: author. dis... kand. of Sciences (05.23.01) / V.G. Kotlov. – Kazan: Kazan Institute of civil engineering., 1992. 15 PP.
3. Krizan, A.V. Calculation through wooden structures with metal gear plates with account of elastic-viscous plastic deformation: abstract. dis... kand. of Sciences (05.23.01) / A.V. Krizan. – N. Novgorod: NNGSAU, 2005. 26 p.
4. Loskutova, D.V. Strength and deformability of nodal joints on metal gear plates in through wooden structures: autoref. dis... kand. of Sciences (09.06.26) / D.V. Loskutova. – Tomsk: Tomsk state University of architecture and civil engineering, 2009. – 24 p.
5. Mironov, V.G. Deformation of board trusses with joints on metal gear plates under short-term and long-term loads / V.G. Mironov // Improvement of building structures made of wood and plastic: interuniversity thematic collection of works. – SPb., 1992. – P. 48–55.
6. Pavlenko, M.N. Peculiarities of design of joints with metal gear plates / M.N. Pavlenko // The regions scientific potential at the service of modernization. – 2012. – №1(2). – P. 41–46.
7. Recommendations for testing joints of wooden structures / TSNIISK named V.A. Kucherenko. – M.: Stroyizdat, 1980. – 40 p.
8. Recommendations for the design and manufacture of board structures with joints on metal gear plates / TSNIISK named Kucherenko. – 1983. – 40 p.
9. SP 64.13330.2017. Updated version of SNiP II-25-80 "Wooden Structures". – M.: Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, 2017. – 105 p.
10. Selutina, L.F. Studies of wooden trusses with supple joints / L.F. Selutina, V.V. Kornilov // Scientific notes of Petrozavodsk State University. Ser.: Natural and Technical Sciences. – 2009. – №7 (101). – P. 26–30.

УДК 624

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Монахов Владимир Андреевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Механика»
E-mail: monahovnn@mail.ru

Зайцев Михаил Борисович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Механика»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Monakhov Vladimir Andreevich,
Doctor of Sciences,
Professor of the department «Mechanics»
E-mail: monahovnn@mail.ru

Zaytsev Mihail Borisovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Mechanics»

ПОСТРОЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ ПЛОСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

В.А. Монахов, М.Б. Зайцев

Представленная методика построения кинематической матрицы основана на применении механической модели стержневой системы, полученной при её дискретизации. Описание топологической структуры модели в исходном положении базируется на формировании графа и его матрицы инцидентности. Композиция матричного преобразования векторов узловых перемещений при переходе от глобальных координат к локальным с расширенной матрицей инцидентности позволяет установить приращения перемещений каждого элемента в направлении оси элемента и перпендикулярном ей. Зная последние, несложно определить углы наклона каждого элемента, а также сосредоточенные изгибные деформации в расчетных сечениях стержневой системы в зависимости от узловых перемещений при заданной нагрузке, сформировав тем самым геометрическую матрицу. Пользуясь полученной матрицей, можно выполнять расчёты стержневых систем на прочность, устойчивость и т.д.

Ключевые слова: стержневая система, дискретизация системы, граф стержневой системы, матрица инцидентности, вектор узловых перемещений, геометрическая матрица

CONSTRUCTION OF KINEMATIC MATRIX FLAT ROD SYSTEMS

V.A. Monakhov, M.B. Zaytsev

The presented method of constructing a kinematic matrix is based on the use of a mechanical model of the rod system obtained by its discretization. Description of the topological structure of the model in the initial position is based on the formation of the graph and its incidence matrix. The composition of the matrix transformation of the nodal displacement vectors in the transition from global to local coordinates with an extended incidence matrix allows you to set the increments of the displacements of each element in the direction of the element axis and perpendicular to it. Knowing it, it is easy to determine the angles of the inclination of each element, as well as the concentrated bending deformations in the calculated sections of the rod system, depending on the nodal displacements at a given load, thereby forming a geometric matrix. Using the obtained matrix it is possible to perform calculations of rod systems for strength, stability, etc.

Keywords: bar system, sampling system, count a rod system, incidence matrix, nodal displacements vector, geometric matrix

Известно [1, 2], что напряженно-деформированное состояние стержневой системы может быть полностью определено при формировании одной (любой) из трех матриц: статической, кинематической (геометрической) или матрицы влияния внутренних усилий.

Классические методы строительной механики подразумевают использование определенных «основных» систем при расчете. Построение матриц достаточно трудоемко и плохо алгоритмируется.

Поставим задачу формирования кинематической матрицы на основе использования упругих шарниров в узлах расчетной схемы стержневой системы.

Представляя упругую стержневую систему в виде связанного в местах дискретизации (узлах) набора ограниченного числа элементов (рис. 1,а), схему перемещений модели механической системы можно описать матричным соотношением $\bar{\gamma} = \Gamma \bar{\zeta}$, где $\bar{\gamma}$ – вектор-столбец, состоящий из n пар абсолютных удлинений λ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) и перекосов χ_i ($i = 1, 2, \dots, n$); $[\Gamma]$ – матрица преобразования перемещений; $\bar{\zeta}$ – вектор-столбец узловых перемещений в глобальной системе координат $\eta\Omega\theta$ (рис. 1,б); порядок вектора $\bar{\zeta}$ равен удвоенному числу узлов принятой дискретной модели стержневой системы; удвоенное количество узлов, включая и опорные, определяет также число компонент вектора $\bar{\gamma}$. Если для стержневой системы установлено преобразование Γ , то несложно перейти к геометрической матрице H , связывающей, в частности, вектор обобщенных деформаций $\bar{\omega}$, составленный из n пар продольных ε_i ($i = 1, 2, \dots, n$) и изгибных χ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) деформаций элемента, сосредоточенных в узлах, согласно $\bar{\omega} = H \bar{\zeta}$. Матрица H , очевидно, определяет конфигурацию стержневой системы в деформированном состоянии.

Топологическую структуру рассматриваемой механической модели можно охарактеризовать с помощью графа рамы, с вершинами которого ассоциируются конечные элементы, а с дугами – «узлы», т. е. расчётные сечения, в которых отыскиваются деформации и внутренние усилия рамы (рис. 1,в). Ориентация графа определяется выбором направлений дуг графа [3].

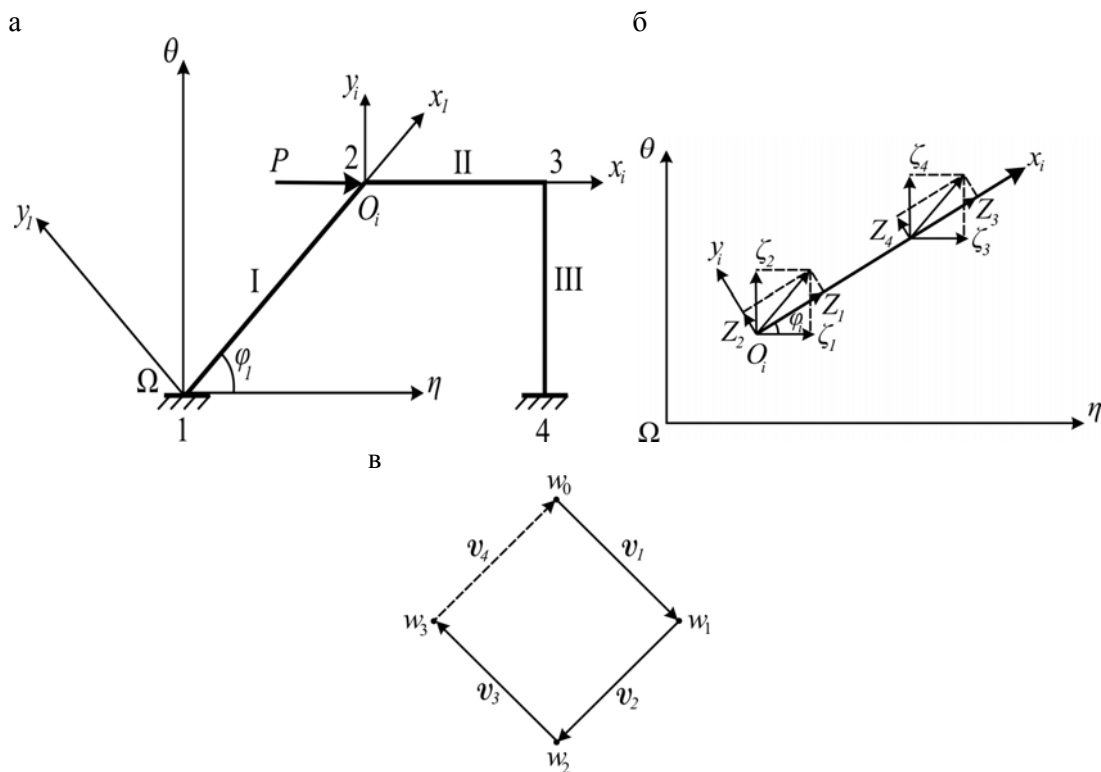


Рис. 1. Расчетная схема стержневой системы:

а – расчётная схема рамы, совмещённая с её механической моделью;

б – индексация узловых перемещений; в – граф модели

Данному графу со структурой «дерева» соответствует матрица инцидентности

$$S = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}_{(3 \times 4)}.$$

Вектор неизвестных перемещений узлов рамы $\bar{\zeta}$, взятый в глобальной системе координат $\Omega\eta\theta$, содержит восемь компонент $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_8$: по паре в каждом узле, включая и опорные. Связав локальные системы координат $x_i O_i y_i$ ($i=1, 2, 3$) с элементами (рис. 1, б), с помощью квазидиагональной матрицы

$$\Psi_i = \begin{bmatrix} [\varphi_i] & \vdots & 0 \\ \dots & \vdots & \dots \\ 0 & \vdots & [\varphi_i] \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, 3),$$

где $\varphi_i = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & \sin \varphi_i \\ -\sin \varphi_i & \cos \varphi_i \end{bmatrix}$ ($i=1, 2, 3$) – матрица поворота вектора перемещений i -го узла, можно осуществить переход от глобальных перемещений $\bar{\zeta}_i$ ($i=1, 2, 3$) к локальным для каждого отдельного элемента согласно матричному преобразованию $\bar{Z}_i = [\Psi_i] \bar{\zeta}_i$ ($i=1, 2, 3$). Совокупность аналогичных преобразований для всей стержневой системы, представленная матрицей

$$\Theta_{(12 \times 8)} = \begin{bmatrix} [\Psi_1] & 0 & 0 \\ 0 & [\Psi_2] & 0 \\ 0 & 0 & [\Psi_3] \end{bmatrix},$$

позволяет установить зависимость между локальными и глобальными перемещениями узлов в матричном виде

$$\bar{Z}_{(12)} = \Theta_{(12 \times 8)} \bar{\zeta}_{(8)}. \quad (1)$$

Для того чтобы вычислить продольные $\bar{\epsilon}$ и изгибные $\bar{\chi}$ деформации элемента, необходимо сначала найти *вектор приращений перемещений* торцов отдельных элементов стержневой системы $\bar{\gamma} = (\lambda_1, \chi_1, \dots, \lambda_3, \chi_3)$, представленный своими компонентами: абсолютными удлинениями участков – λ_i ($i=1, 2, 3$) и их перекосами – χ_i ($i=1, 2, 3$), число которых соответствует количеству участков, принятых при дискретизации. С этой целью следует воспользоваться расширенной матрицей инцидентности, являющейся одновременно, как и сама матрица инцидентности, разностным оператором

$$\tilde{S} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{(6 \times 12)}.$$

Умножение данной матрицы на вектор-столбец локальных перемещений позволяет установить *приращения узловых перемещений*

$$\bar{\gamma}_{(6)} = \tilde{S}_{(6 \times 12)} \bar{Z}_{(12)}.$$

Принимая во внимание преобразование поворота [1], найдем зависимость приращений перемещений от узловых перемещений $\bar{\zeta}$ в глобальной системе координат

$$\bar{\gamma}_{(6)} = \Gamma_{(6 \times 8)} \bar{\zeta}_{(8)},$$

где

$$\Gamma_{(6 \times 8)} = \tilde{S}_{(6 \times 12)} \Theta_{(12 \times 8)}. \quad (2)$$

Пренебрегая влиянием продольных сил при определении напряжённого состояния стержневой системы, в матрице Γ опустим нечётные строки, в векторе $\bar{\gamma}$ – нечётные компоненты. Обозначив сокращённую таким способом матрицу $\Gamma_{(6 \times 8)}$ через $G_{(3 \times 8)}$, а укороченный наполовину вектор $\bar{\gamma}_{(6)}$, содержащий теперь только перекосы, – $\bar{\chi}_{(3)}$, найдем

$$\bar{\chi}_{(3)} = G_{(3 \times 8)} \bar{\zeta}_{(8)}. \quad (3)$$

Чтобы установить деформации изгиба, которые в рамках принятой модели сосредоточены в узлах, сначала определим отношение перекоса к длине соответствующего отрезка, вычисляя тем самым тангенс угла поворота, что при малых перемещениях означает определение непосредственно угла поворота (поскольку $\theta \approx \text{tg}\theta$)

$$\bar{\alpha}_{(3)} = L_{(3 \times 3)}^{-1} \bar{\chi}_{(3)}. \quad (4)$$

Диагональная матрица длин стержней L , как и матрица направляющих косинусов стержней – матрица C , которая используется при формировании матрицы вращения Θ , могут быть получены на основе матриц инцидентности S и координат узлов K [3]. С учётом равенств (3) и (4) вектор *сосредоточенных* изгибных деформаций стержневой системы можно выразить через узловые перемещения $\bar{\zeta}$ по формуле

$$\bar{\kappa}_{(3)} = S_{(4 \times 3)}^T L_{(3 \times 3)}^{-1} G_{(3 \times 8)} \bar{\zeta}_{(8)}.$$

Таким образом, определение изгибных деформаций в расчётных сечениях стержневой системы осуществляется по формуле $\bar{\kappa}_{(3)} = H_{(3 \times 8)} \bar{\zeta}_{(8)}$, где матрица преобразования

$$H_{(4 \times 8)} = S_{(4 \times 3)}^T L_{(3 \times 3)}^{-1} G_{(3 \times 8)} \quad (5)$$

и есть геометрическая (кинематическая) матрица.

Полученное выражение для матрицы H легко программируется, и потому формирование геометрической матрицы стержневой системы можно выполнить в автоматическом режиме. В достоверности вывода последней формулы можно убедиться, сравнив его результат со структурой матрицы H , полученной «статическим» способом [4]. Изложенная методика построения конфигурации естественно распространяется на стержневые системы более сложной структуры.

Выводы

1. Представлена методика формирования кинематической матрицы на основе использования упругих шарниров в узлах расчетной схемы стержневой системы.

2. Пользуясь полученной матрицей, можно выполнять расчёты стержневых систем на прочность, устойчивость [5] и т.д.

Список литературы

1. Монахов, В.А. Алгоритм расчёта рамы на устойчивость на основе дискретной модели расщеплённого стержня / В.А. Монахов, Р. Саакян, А. Урин // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №2.
2. Зернов, В.В. Определение критической нагрузки для стропильных ферм в упругой и упруго-пластической стадиях работы / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, Н.Н. Ласков // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 4. – С. 85–89.
3. Монахов, В.А. Расчет стержневых систем с использованием теории графов в среде «Matlab» / В.А. Монахов, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2016. – №3. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no3/stroitel'naya-mehanika/3.13/at_download/file.
4. Монахов, В.А. Приложение принципа двойственности к формированию матрицы равновесия стержневой системы / В.А. Монахов, В.В. Зернов, О.Ф. Тульчинская // Сб. материалов Международной научно-технической конференции. – Пенза: ПГУАС, 2014. – С. 124–133.
5. Зернов, В.В. Анализ устойчивости стержневых систем в упруго-пластической стадии работы / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, Ю.В. Анурьева // Моделирование и механика конструкций. – 2017. – № 6. – С. 4.

References

1. Monakhov, V.A. Algorithm for the calculation of the frame for stability based on the discrete model of the split rod / V.A. Monakhov, R. Saakyan, A. Urin // Regional architecture and engineering. – 2017. – №2.
2. Zernov, V.V. Determination of critical load for roof trusses in elastic and elastic – plastic stages of work / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev, N.N. Laskov // Regional architecture and engineering. – 2014. – No. 4. – P. 85–89.
3. Monks, V.A. Calculation of rod systems with the use of graph theory in the environment of «Matlab» / V.A. Monks, M.B. Zaytsev // Modeling and mechanics of structures. – 2016. – No. 3. – Systems requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no3/stroitel'naya-mehanika/3.13/at_download/file.
4. Monakhov, V.A. Application of the duality principle to the formation of the equilibrium matrix of the rod system / V.A. Monakhov, V.V. Zernov, O.F. Tulchinskaya // SB. materials of International scientific-technical conference. – Penza: PGWS, 2014. – P. 124–133.
5. Analysis of stability of rod systems in the elastic-plastic stage of work / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev, Yu.V. Anur'eva // Modeling and mechanics of structures. – 2017. – № 6. – P. 4.

УДК 624.01

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Вдовин Вячеслав Михайлович,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Penza State University of Architecture
and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Vdovin Vjacheslav Mikhajlovich,
Candidate of Sciences, Professor
of the department "Building constructions"
E-mail: stroyconst@pguas.ru

УСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТОЙ РЕБРИСТОЙ СТЕНОВОЙ ПАНЕЛИ

В.М. Вдовин

Решается задача устойчивости пластины, состоящей из двух обшивок и регулярно расставленных вертикальных ребер, приклеенных к обшивкам. Обшивки выполнены из древесно-плитных материалов, а ребра – из досок. В задаче рассмотрены устойчивость пластины общая и местная – для одной ячейки панели. Приведен оптимальный случай работы ребристой пластины, когда потеря устойчивости местная и общая наступает одновременно. Рассмотрена методика расчета поставленной задачи, позволяющая проводить оптимальное проектирование ребристой панели в определенном диапазоне изменения геометрических и механических параметров элементов панели.

Ключевые слова: ребристая панель, обшивка, устойчивость, критическая сила

SUSTAINABILITY OF CENTRALLY COMPRESSED RIBBED WALL PANELS

V.M. Vdovin

The problem of the stability of the plate consisting of two sheathing and regularly spaced vertical edges glued to the sheathing is solved. The sheathing are made of wood-based materials, and the ribs are made of boards. In the problem, the stability of the plate is common and local – for a single cell of the panel. The paper presents the optimal case of a ribbed plate, when local and general loss of stability is achieved simultaneously. The method of calculating the task, which allows it make the optimal design of a ribbed panel in a certain range of changes in the geometric and mechanical parameters of the panel elements, is considered.

Keywords: ribbed panel, cladding, stability, critical force

Рассматривается ребристая система, состоящая из двух обшивок и рёбер, регулярно расставленных с шагом s и приклеенных к обшивкам.

За расчетную схему (рис. 1) принята свободно опертая пластина со сторонами a и b , сжатая в направлении рёбер нагрузкой q .

В направлении, перпендикулярном к основным рёбрам, пластина имеет два контурных рёбра, свободных от внешней нагрузки. Все рёбра прочно соединены (с помощью клея) с обшивками, чтобы придать им устойчивость в плоскости панели, поскольку потеря устойчивости их ведёт к нарушению целостности всей системы.

Рёбра и обшивки выполнены из упругих материалов: толщина рёбер (b_p), толщина обшивки (δ). Уровень внешней нагрузки (q) известен. Ввиду наличия рёбер, монолитно соединенных с обшивками, пластина в целом является ортотропной с изгибными жёсткостями вдоль главных осей ортотропии x и y , соответственно равных:

$$D_1 = E_n h_{np}^3 / 12(1 - \nu_n^2), \quad D_2 = D_3 = kD_1,$$

где $h_{пр} = \delta \left[2(4 + 6\gamma + 3\gamma^2) \right]^{1/3}$ – приведенная толщина пластинки;

$$\gamma = \frac{h_p}{\delta};$$

k – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения напряжений в ребристой пластине и зависящий от отношения b/a (для некоторых материалов значения k приведены в [2]); E_n и ν_n – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала обшивок.

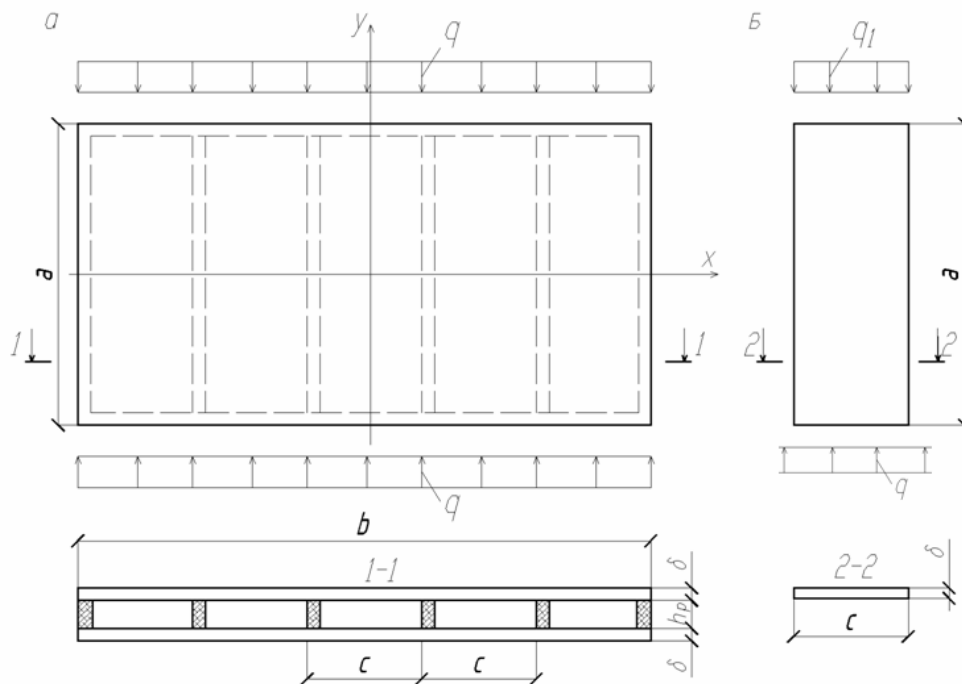


Рис. 1. Расчетная схема панели:

а – при общей устойчивости; б – при местной устойчивости

Критические напряжения общей потери устойчивости [1] с учетом фактических соотношений жесткостей и минимализации по волновым числам имеют вид

$$\sigma_0 = k_0 \left(\frac{\delta}{b} \right)^2 r^2, \quad (1)$$

где

$$k_0 = \left[\frac{\pi^2 E_n}{12(1 - \nu_n^2)} \right] (m^2 \beta^2 + 2k + km^{-2} \beta^{-2}); \quad (2)$$

$$r = [2(4 + 6\gamma + 3\gamma^2)]^{1/3}; \quad (3)$$

$\beta = b/a$ – отношение сторон пластины; m – волновое число, причем:

$$m=1 \text{ при } 0 < \beta^{-1} < \sqrt[4]{4k};$$

$$m=2 \text{ при } \sqrt[4]{4k} < \beta^{-1} < \sqrt[4]{36k};$$

$$m=3 \text{ при } \sqrt[4]{36k} < \beta^{-1} < \sqrt[4]{144k} \text{ и т.д.}$$

Следует отметить, что при отсутствии ребер $h_p=0$, $\gamma=0$, $r=2$ и, следовательно, $r \geq 2$.

При рассмотрении местной устойчивости обшивки представим её как шарнирно опертую изотропную пластинку, сжатую в одном направлении нагрузкой q_1 (см. рис. 1б). Тогда величина критических напряжений запишется в виде [3]

$$\sigma_m = \left(\frac{\pi^2 D}{a^2 \delta} \right) (m_1 + n_1 \beta_1^2 m_1^{-1})^2, \quad (5)$$

где $D = \frac{E \delta^3}{12} (1 - \nu_n^2)$ – изгибная жесткость обшивки; $\beta_1 = a/c$ – отношение сторон пластинки m_1, n_1 – волновые числа.

После минимизации критических напряжений (5) по m_1 и n_1 получим:

$$\sigma_m = \left(\frac{\pi^2 D}{a^2 \delta} \right) ([\beta_1] + n_1^2 \beta_1^2 [\beta_1]^{-1})^2. \quad (6)$$

Здесь квадратные скобки $[\beta_1]$ означают целую часть числа β_1 .

Из формулы (6) следует, что при заданном значении напряжений σ_m можно отыскать жесткость близких по значению β_1 пластин, т.е. задача нахождения расстояния (C) между ребрами является многозначной. Для определения единственного значения C следует проанализировать выражения, содержащие параметр β_1 в уравнениях (5) и (6). Точка перехода от (m) к (m+1) полуволны осуществляется при равенстве показаний потери устойчивости. Учитывая сказанное, можно получить выражения для m_1 и β_1 :

$$m_1 = \left(\frac{a}{h_n} \right) \sqrt{\frac{\sigma_n}{k_n}} - 0,5; \quad (7)$$

$$\beta_1 = \sqrt{m_1 (m_1 + 1)}, \quad (8)$$

$$\text{где} \quad k_n = \pi^2 E / 3 (1 - \nu_n^2). \quad (9)$$

Итак, для определения β_1 при заданном уровне местных напряжений необходимо по формуле (7) найти m_1 и после подсчёта по формуле (8) числа β_1 определить расстояние (c) между ребрами по формуле

$$c = a / \beta_1. \quad (10)$$

При проектировании центрально-сжатой ребристой конструкции (панели) условием оптимальности служит требование одинаковой надёжности её в условиях общей и местной потери устойчивости. Без излишних коэффициентов запаса это требование можно записать так:

$$\sigma_0 = \sigma_m = \sigma, \quad (11)$$

где σ – уровень внешних напряжений сжатия.

Используя формулу (11) совместно с (1) и (6), можно добиться оптимальных размеров ребристой конструкции, в которой предельное состояние достигается одновременно для всех элементов.

Из (1) имеем:

$$\delta = \left(\frac{b}{r} \right) \sqrt{\sigma_0 / k_0}. \quad (12)$$

Этой формулой можно пользоваться для определения величины δ , а при заданной величине δ следует вычислять величину

$$r = (b / \delta) \sqrt{\sigma_0 / k_0} \quad (13)$$

Из (7) и (8) получим:

$$c = \delta \sqrt{\sigma_0 k_n / \sigma_n k_0} . \quad (14)$$

Для практического применения полученных формул воспользуемся случаем оптимального проектирования ребристых клееных панелей, предназначенных для внутренних стен полносборного дома. В качестве материала панелей принята древесно-стружечная плита с несущими ребрами из сосновых досок. Учитывая технологические возможности изменения механических свойств плиты в процессе её прессования, в практических примерах принимаем: модуль упругости E_n , изменяющийся в пределах $(1 \div 4) \cdot 10^3$ МПа, толщина плиты $\delta = 10; 13$ и 16 мм.

Уровень внешних напряжений σ принят соответственно для плит толщиной $10; 13$ и 16 мм равным $1,3; 1,0$ и $0,8$ МПа.

Зная соотношение сторон $\beta = b/a$ и характеристики материала обшивки E_n и ν_n , находим k , затем $\sqrt[4]{4k}$ и по (4) принимаем число m . По формуле (2) вычисляем k_0 , по (9) – k_n . По формуле (13) определим значение $h_p = \gamma \delta$. Шаг ребер (c) находим по формуле (14).

С помощью изложенного метода расчета были выполнены вычисления для различных значений отношения сторон β . Результаты расчетов приведены на рис. 2.

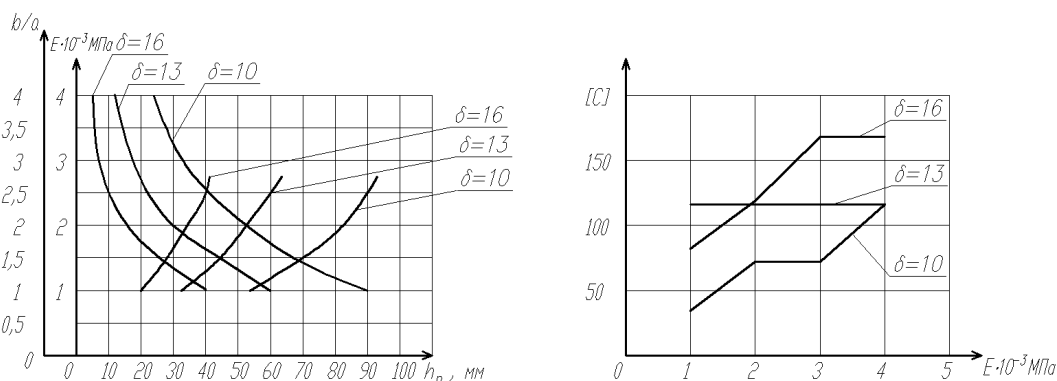


Рис. 2

Использование этих графиков позволит проводить оптимальное проектирование ребристых конструкций в широком диапазоне изменения геометрических и физико-механических параметров.

Выводы:

1. Используя предложенный методический подход к решению задачи устойчивости центрально-сжатой ребристой клееной панели с регулярно расставленными несущими ребрами, можно добиться оптимального конструктивного решения при ее проектировании, основанного на одновременном достижении предельного состояния панели в целом и отдельных участков обшивки панели, находящихся между ребрами.

2. Решение поставленной задачи позволяет назначать рациональный шаг расстановки вертикальных несущих ребер, что обеспечивает общую и местную устойчивость панели.

3. Предложенный метод решения устойчивости ребристых структур позволяет решать подобные задачи для комбинированных конструкций, склеенных из древесины и древесно-плитных материалов, т.е. из материалов с различными механическими характеристиками.

Список литературы

1. Прочность, устойчивость, колебания: в 3 т. / под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – Т. 3. – 567 с.
2. Вдовин, В.М. Конструкции из дерева и пластмасс. Ограждающие конструкции / В.М. Вдовин. – М.: Юрайт, 2017. – 178 с.
3. Тимошенко, С.П. Устойчивость упругих систем / С.П. Тимошенко. – М.-Л.: ОГИЗ Гостехиздат, 1946. – 432с.

References

1. Strength, stability, vibrations: in 3 vol. / ed. I.A. Birger, Y. G. Panovko. – M.: Mechanical Engineering, 1968. – Vol. 3. – 567 p.
2. Vdovin, V.M. Wood and plastic constructions. Walling / V.M. Vdovin. – M.: Yurayt, 2017. – 178 p.
3. Tymoshenko, S.P. Stability of elastic systems / S.P. Tymoshenko. – M.-L.: ogiz Gostekhizdat, 1946. – 432 p.

УДК 69.059.032

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Нежданов Кирилл Константинович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»

Гарькин Игорь Николаевич,
доцент кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Nezhdanov Kirill Konstantinovich,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Building constructions»

Garkin Igor Nikolaevich,
Associate Professor of the department
«Quality management and technology
of building production»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

ВЫСОКОРЕСУРСНАЯ НЕРАЗРЕЗНАЯ ПОРТАЛЬНАЯ ДВУХСТЕНЧАТАЯ ПОДКРАНОВАЯ БАЛКА

К.К. Нежданов, И.Н. Гарькин

Предложены методы повышения несущей способности подкрановых конструкций за счет использования двухстенчатых подкрановых балок. На основе математических зависимостей показано повышение моментов инерции при кручении верхнего пояса подкрановой балки до 2 раз. Обосновано преимущество использования неразрезных подкрановых балок из замкнутых профилей. Определены пути снижения материалоемкости разработанной подкрановой балки в сравнении со стандартной двутавровой подкрановой балкой.

Ключевые слова: строительные конструкции, подкрановая балка, двухстенчатая балка, неразрезная балка, момент инерции при кручении, снижение материалоемкости, замкнутый профиль

HIGH-RESOURCE UNIVERSE PORTAL DOUBLE CRANE BEAM

K.K. Nezhdanov, I.N. Garkin

Methods are proposed for increasing the bearing capacity of crane crane structures through the use of double crane girders. On the basis of mathematical dependences the increase in the moments of inertia during the torsion of the upper belt of the crane girder up to 2 times is shown. The advantage of using continuous crane girders of closed profiles is proved. The ways of reducing the material consumption of the developed crane beam in comparison with the standard I-beam crane beam are considered.

Keywords: crane beam, double-beam, continuous beam, moment of inertia during torsion, material consumption reduction, closed profile, building construction

В действующих цехах подкрановые балки имеют минимальный нормативный срок безопасной эксплуатации до 10 лет и, по существу, определяются как наиболее ответственные за надёжность сооружения в целом. Согласно ГОСТ 23118–2012 эксплуатация стальных конструкций с трещинами запрещается, однако, как оказалось, во многих случаях указанный запрет нарушается [1]. Интенсивность эксплуатации зависит от скорости накопления циклов локальных (напряжения, действующие на небольшой длине, не сказывающиеся на общих деформациях конструкций и приводящие к появлению плоского напряженного состояния, что увеличивает опасность разрушения конструкций) колебаний напряжений в подрельсовой зоне стенок подкра-

новых балок (нормальных: σ_y^{loc} ; $\sigma_{y\text{Кр}}^{\text{loc}}$ и сдвигающих: $\tau_{x,y}^{\text{loc}}$). За 10 лет (минимальный срок службы) накапливается *не менее* $\approx 6...7$ млн циклов [2].

На основе анализа результатов обследований подкрановых конструкций [3] было установлено, что в сварных балках даже при поясных сварных швах, выполненных с К-образной разделкой кромок, с полным проваром на всю толщину листа и с плавными по радиусу переходами от сварного шва к стенке, усталостные трещины возникают ранее 2 млн циклов при заданных 6 млн. Возникновение усталостных трещин фактически свидетельствует об исчерпании технического ресурса подкрановой балки.

По мере накопления числа циклов локальных колебаний напряжений (σ_y^{loc} ; $\sigma_{\text{Кр}y}^{\text{loc}}$; $\tau_{x,y}^{\text{loc}}$) от прокатываний колёс мостовых кранов усталостные трещины быстро развиваются и растут преимущественно вдоль сварных швов. По мере накопления циклов скорость роста усталостных трещин возрастает.

Когда трещины сливаются друг с другом в единую трещину, возникает *аварийная* ситуация, так как трещины отсекают стенку от пояса. Вероятность потери устойчивости стенки и обрушения подкрановой балки увеличивается.

Выносливость подрельсовой зоны стенки прокатной подкрановой балки из *прокатных* профилей при действии локальных напряжений в ≈ 4 раза выше, чем сварной балки. Во избежание внезапного обрушения подкрановой балки целесообразно использовать балки, составленные по двухпролетной (неразрезной) схеме, являющиеся статически неопределёнными и имеющие более высокую надёжность. Высокий технический ресурс стальной двухстенчатой подкрановой балки и высокую её надёжность обеспечивают с помощью высокоресурсных фрикционных соединений.

Разработанная конструкция балки даёт и экономический эффект за счёт применения рационального профиля. Показатели материалоемкости в значительной степени зависят от толщины двойной стенки $t_{\text{ст}}$ и её гибкости $\lambda_{\text{ст}}$. Здесь пара стенок сдвигостойчиво соединена с парой рельсов, являющихся поясами балки; высокопрочные рельсы находятся в наиболее напряженной части сечения, что даёт наибольший положительный эффект. Рассмотрим реальный пример.

Формируем двухстенчатую балку из порталных рельсов с таким же моментом сопротивления $W_x^* = 16510 \text{ см}^3$, как у прокатного двутаврового профиля ГОСТ 6183–52 I 100 Б5.

Примем равные площади сечений как верхнего, так и нижнего поясов двухстенчатой балки из порталных рельсов $A_{\text{Порт}} = 113,32 \text{ см}^2$. Площади сечения стенки $A_{\text{Ст}} = 0,5 \times 113,32 \text{ см}^2$. Расстояние до центра тяжести пояса $z_0 = 0,5 \times 14,906 = 7,453 \text{ см}$; толщина полки $t_{\text{Пол}} = 3,8 \text{ см}$.

Момент инерции сечения порталной подкрановой балки

$$J_{X \text{ Порт}} = 2 \cdot A_{\text{Порт}} \left(\frac{H}{2} - z_0 \right)^2 + \frac{2 \cdot A_{\text{Ст}}}{12} (H - 2 \cdot t_{\text{Пол}})^2; \quad (1)$$

$$\frac{W_x^* \cdot H}{2} = 2 \cdot A_{\text{Порт}} \left(\frac{H^2}{4} - H \cdot z_0 + z_0^2 \right) + \frac{2 \cdot A_{\text{Ст}}}{12} (H^2 - 4t_{\text{Пол}} \cdot H + 4t_{\text{Пол}}^2). \quad (2)$$

Определим оптимальную высоту H сечения балки:

$$\left(\frac{A_{\text{Порт}}}{2} + \frac{A_{\text{Ст}}}{6} \right) H^2 - \left(\frac{W_x^*}{2} + 2A_{\text{Порт}} \cdot z_0 + \frac{2A_{\text{Ст}}}{3} t_{\text{Пол}} \right) H + 2 \cdot A_{\text{Порт}} \cdot z_0^2 + \frac{2A_{\text{Ст}}}{3} t_{\text{Пол}}^2 = 0; \quad (3)$$

$$A_{\text{Порт}} = 113,32 \text{ см}^2; 2A_{\text{Ст}} = 113,32 \text{ см}^2; W_x^* = 16510 \text{ см}^3;$$

$$z_0 = \frac{14,906}{2} = 7,453 \text{ см}; t_{\text{Пол}} = 3,8 \text{ см}.$$

$$113,32 \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \right) H^2 - \left(72,846805 + 2 \cdot 7,453 + 2 \frac{113,32}{3} \cdot 3,8 \right) H + \\ + 2 \cdot 113,32 \cdot 7,453^2 + 2 \frac{113,32}{3} 3,8^2 = 0. \quad (4)$$

$$\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \right) H^2 - \left(72,846805 + 2 \cdot 7,453 + 2 \frac{1}{3} \cdot 3,8 \right) H + 2 \cdot 7,453^2 + 2 \frac{1}{3} 3,8^2 = 0. \quad (5)$$

$$\frac{2}{3} H^2 - \left(\frac{16510}{2 \cdot 113,32} + 7,453 + \frac{3,8}{3} \right) H + 2 \cdot 7,453^2 + \frac{3,8^2}{3} = 0. \quad (6)$$

$$\frac{2}{3} H^2 - 90,286138 H + 120,72609 = 0. \quad (7)$$

$$H^2 - 135,42921 \cdot H + 181,081639 = 0 \Rightarrow H = 134,07865 \text{ см}. \quad (8)$$

Получили высоту portalной балки $H=134,07865$ см.

$$A_{\text{Порт}} = 113,32 \text{ см}^2; 2A_{\text{Ст}} = 113,32 \text{ см}^2; W_x^* = 16510 \text{ см}^3; z_0 = 7,453 \text{ см}; t_{\text{Пол}} = 3,8 \text{ см}.$$

$$J_{\text{Х Порт}} = 2 \cdot A_{\text{Порт}} \left(\frac{H}{2} - z_0 \right)^2 + \frac{2 \cdot A_{\text{Ст}}}{12} (H - 2 \cdot t_{\text{Пол}})^2; \quad (9)$$

$$J_{\text{Х Порт}} = 2 \cdot 113,32 \cdot \left(\frac{134,07865}{2} - 7,453 \right)^2 + \frac{113,32}{12} (134,07865 - 7,6)^2; \quad (10)$$

$$J_{\text{Х Порт}} = 804692 + 302127,13 = 1106819,3;$$

$$W_x = \frac{2J_{\text{Х Порт}}}{H} = \frac{2 \times 1106819,3}{134,07865} = 16510 \text{ см}^3. \quad (11)$$

Момент инерции (относительно главной оси) portalной балки совпал с моментом инерции прокатной двутавровой балки аналогичного сечения.

Рассмотрим практическую реализацию подкрановой конструкции. Для изготовления стальной двухстенчатой подкрановой балки целесообразно верхний и нижний пояса выполнять из пары высокопрочных portalных рельсов, симметрично размещённых относительно горизонтальной оси X сверху головой вниз, а снизу головой вверх. Каждая пара вертикальных стенок каждого из portalных рельсов снабжается горизонтальными рядами отверстий с регулярным шагом. При этом контактирующие поверхности пары вертикальных стенок рельсов зачищают дробеструйным способом (для повышения коэффициента трения в 3 раза). Аналогично зачищают контактирующие поверхности пары стенок балки, симметричных относительно вертикальной оси Y (плотно контактирующих снаружи с зачищенными поверхностями portalных рельсов). Фактически образуется монолитная конструкция, работающая как единое

целое, для чего фиксируется зазор между стенками. Объединяя пару порталных рельсов парой стенок в единое целое, получают замкнутую коробчатую полость, что позволяет получить anomalно высокий момент инерции при кручении $J_{\text{Кр}}^{\text{Порт}}$ порталной подкрановой балки, обладающей высокой надёжностью.

На рис. 1 показано сечение стальной двухстенчатой подкрановой балки, содержащей одинаковые верхний 1 и нижний 6 пояса из пары порталных рельсов, симметрично размещённых относительно горизонтальной оси X сверху главой вниз, а снизу главой вверх. На рис. 2 показан узел высокоресурсного фрикционного соединения 1 пары порталных рельсов с парой вертикальных стенок 4.

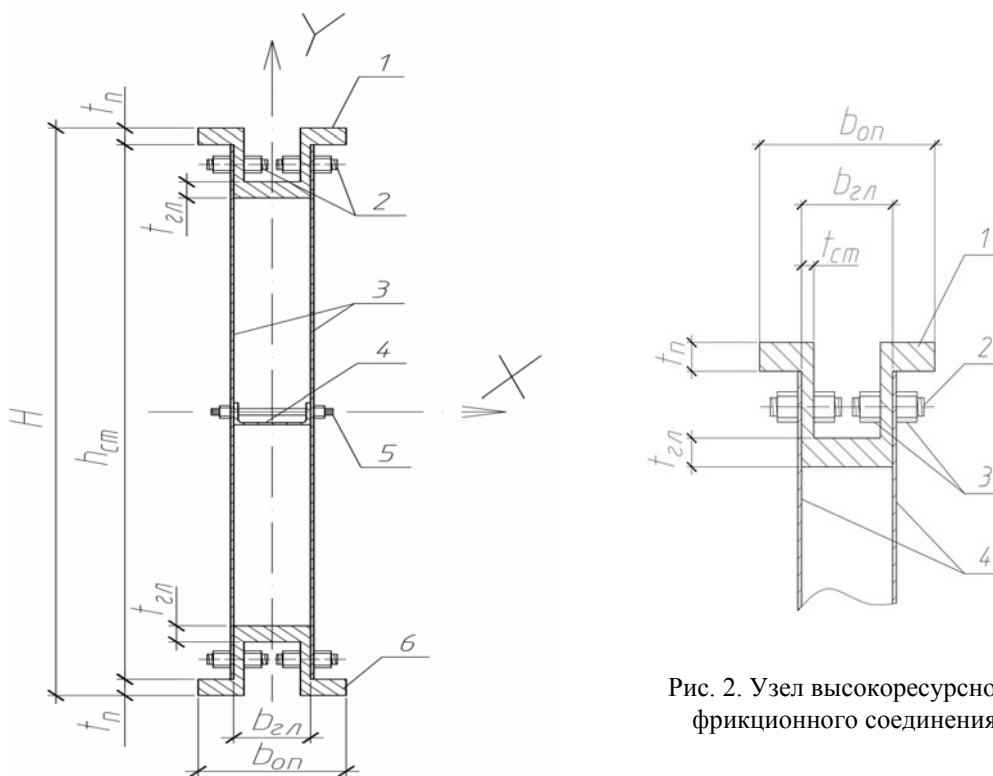


Рис. 2. Узел высокоресурсного фрикционного соединения

Рис. 1. Сечение стальной двухстенчатой подкрановой балки

Каждый порталный рельс имеет пару опор 2, симметричных относительно вертикальной оси Y . Пара вертикальных стенок 3, симметричных относительно вертикальной оси Y , выполнена из прокатных стальных листов. Пара порталных рельсов 1 расположена симметрично относительно горизонтальной оси X , и они являются поясами порталной балки. Пары вертикальных стенок порталных рельсов 1 снабжают горизонтальными рядами отверстий с регулярным шагом, соосными рядам отверстий в вертикальных стенках 3. Зазор Δ между вертикальными стенками равен ширине главы каждого из порталных рельсов 1. Кроме того, зазор Δ фиксирует швеллер 4, уменьшающий гибкость стенок 3.

Пара вертикальных стенок 3 порталных рельсов 1 как сверху, так и снизу соединялись с парой вертикальных стенок 3 высокоресурсными фрикционными соединениями с помощью высокоресурсных фрикционных шпилек 2 с шайбами и гайками 4.

При этом контактирующие поверхности пары вертикальных стенок рельсов зачищают дробеструйным способом и этим повышают коэффициент трения в ≈ 3 раза.

Между парой порталных рельсов 1 и парой вертикальных стенок 3 образован замкнутый контур шириной Δ , обеспечивающий anomalно высокое увеличение момента инерции при кручении $J_{\text{Кр}}$ порталной двухстенчатой подкрановой балки.

Эффективность нового балочного профиля достигается за счёт:

- высокоресурсных соединений, исключая возникновение усталостных трещин;
- использования в качестве поясов рельсов, выполненных из высокопрочной легированной хромом и никелем стали (расчётное сопротивление до $R_{bun} = 730$ МПа), что обеспечивает значительное снижение материалоемкости;
- применения подкрановых балок по неразрезной схеме (двухпролетной), исключая вероятность обрушения одного из пролетов даже при каком-то повреждении.

Список литературы

1. Гарькин, И.Н. Подкрановые конструкции на предприятиях Пензенской области: состояние, перспективы / И.Н. Гарькин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2017. – № 3 (21). – С. 20–24.
2. Нежданов, К.К. Совершенствование подкрановых конструкций и методов их расчёта: дисс. д-ра техн. наук / К.К. Нежданов. – Пенза, 1992. – 349 с.
3. Ерёмин, К.И. Обзор аварий и сооружений, произошедших в 2010 году / К.И. Ерёмин, Н.А. Шишкина // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сборник научных трудов. – Магнитогорск: ООО «Велд», 2011. – С.1–20.
4. Гарькин, И.Н. Экспертиза промышленной безопасности: обследование зданий с крановыми нагрузками / И.Н. Гарькин, И.А. Гарькина // Современные наукоемкие технологии. – № 5. – 2018. – С. 41–45.

References

1. Garkin, I.N. Crane designs at the enterprises of the Penza region: the state, prospects / I.N. Garkin // Engineering and construction Bulletin of the Caspian Sea. – 2017. – № 3 (21). – P. 20–24.
2. Nezhdanov, K.K. Improvement of crane structures and methods of their calculation: Diss. Dr. Techn. Sciences / K.K. Nezhdanov. – Penza, 1992. – 349 p.
3. Eremin, K.I. Review of accidents and structures that occurred in 2010 / K.I. Eremin, N. A. Shishkina // Prevention of accidents of buildings and structures: collection of scientific papers. – Magnitogorsk: LLC "Veld", 2011. – P. 1–20.
4. Garkin, I.N. Examination of industrial safety: inspection of buildings with crane loads / I.N. Garkin, I.A. Garkin // Modern science-intensive technologies. – № 5. – 2018. – P. 41–45.

УДК 624.073

Белгородский государственный
технологический университет
им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова,
д. 46, тел.: (4722) 42-08-19

Юрьев Александр Гаврилович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Теоретическая механика
и сопротивление материалов»

Зинькова Виктория Анатольевна,
старший преподаватель кафедры
«Теоретическая механика и сопротивление
материалов»
E-mail: virzinkova@mail.ru

Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46,
tel.: (4722) 42-08-19

Yuriev Alexander Gavrilovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Theoretical mechanics and
resistance of materials»

Zinkova Victoria Anatolevna,
Senior Lecturer of the department
«Theoretical mechanics and resistance
of materials»
E-mail: virzinkova@mail.ru

РАСЧЕТ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФЕРМ НА ОСНОВЕ ВАРИАЦИОННЫХ ПРИНЦИПОВ

А.Г.Юрьев, В.А.Зинькова

Представлен проектный расчет статически определимой и неопределимой ферм при учете устойчивости сжатых стержней. На основе вариационных принципов механики деформируемого твердого тела установлен единый методологический подход к решению задач анализа и синтеза ферм. Для статически определимой фермы присуща равнонапряженность в категориях растянутых и сжатых стержней. Наименьший объем статически неопределимой фермы имеет место при переходе от данной фермы к статически определимой основной системе.

Ключевые слова: расчет ферм, вариационные принципы синтеза конструкций, критерий оптимальности, устойчивость равновесия

CALCULATION OF METAL TRUSSES BASED ON VARIATIONAL PRINCIPLES

A. G. Yuriev, V.A. Zinkova

The design calculation of statically determined and indeterminate truss is presented taking into account the stability of compressed rods. Based on the variational principles of solid mechanics, a unified methodological approach to solving the problems of analysis and synthesis of farms is established. For a statically defined truss, there is an equidistance in the categories of stretched and compressed rods. The least amount of a statically indeterminate farm takes place at the transition from the farm to the statically determinate primary system.

Keywords: truss calculation, variational principles of synthesis of designs, optimality criterion, equilibrium stability

Введение. Продолжительным этапом поиска в области проектирования рациональных несущих конструкций явилось псевдооптимальное проектирование. Присущая ему постановка проектной задачи с сугубо экономическим критерием (минимум объема, массы, стоимости и т.п.) при определенном отходе от физической сущности (энергии) выходит за рамки механики деформируемого твердого тела. Как следствие, не обеспечивается гарантия достижения абсолютного (глобального) экстремума функционала цели.

Достаточное условие для его достижения может дать лишь введение энергетического начала в процедуру оптимального проектирования, что следует из двойственности постановки задач на условный экстремум с интегральными связями. Так, например, целью изопериметрической задачи формообразования является расположение

материала заданного объема таким образом, чтобы доставить абсолютный минимум функционалу потенциальной энергии системы (потенциальной энергии деформации при линейном физическом законе), зависящей от векторов функций перемещений и конфигурации.

В частном случае конструкция может быть равнонапряженной по всему объему, и тогда, по теореме Васютинского для линейно-упругого тела, ей соответствует минимум потенциальной энергии деформации. Так как в этом случае последняя пропорциональна объему тела, то в качестве критерия оптимальности здесь может выступать минимум объема.

Важно заметить, что теорема Васютинского сформулирована без учета возможной потери устойчивости ее элементов.

С этих позиций рассмотрим постановку задачи оптимизации статически неопределимых ферм в статье [1]. Площади сечений стержней определяются на основе критерия минимума объема материала при дополнительном условии равнонапряженности. Возможная потеря устойчивости стержней не рассматривается.

Но, по теореме Васютинского, использованные критерий и дополнительное условие вполне идентичны, что нарушает суть постановки оптимизационной задачи и сводит на нет содержание работы.

Сама по себе равнонапряженность достижима лишь в отдельных случаях. Для большинства ферм она становится невыполнимой, поскольку растянутый и сжатый стержни, имеющие одинаковые по модулю усилия, будут иметь различные площади поперечного сечения.

Отмеченные проблематичные ситуации имеют место в большинстве работ по обсуждаемой тематике, в том числе получивших широкую известность [2-7].

Проектировочный расчет ферм с учетом устойчивости сжатых стержней по методу напряжений [7] нарушается при изменении знака продольной силы хотя бы в одном стержне. Проблематична корректировка начальных данных.

1. Проектировочный расчет статически определимой фермы

Вариационные принципы механики деформируемого твердого тела позволяют установить единый методологический подход к решению задач анализа и синтеза несущих конструкций, причем в последнем случае имеются в виду не только площади поперечных сечений элементов, но и топология и геометрия несущих конструкций [8].

Вначале обратимся к статически определимой ферме и представим ее как виртуальную систему с внутренними силами N_i/φ_i , где φ_i – коэффициент уменьшения расчетного сопротивления R для сжатых стержней (равен единице для растянутых стержней).

Рассмотрим изопериметрическую задачу с варьируемыми площадями поперечных сечений стержней, в которой предполагается заданным объем однородного упруголинейного материала V_0 :

$$\sum_{i=1}^n A_i l_i = V_0,$$

где l_i – длина i -го стержня, A_i – площадь поперечного сечения, n – число стержней.

Взяв за основу функционал Кастильяно, получаем:

$$J = \sum_{i=1}^n \frac{N_i^2 l_i}{2E\varphi_i^2 A_i} + \mu \sum_{i=1}^n A_i l_i,$$

где E – модуль продольной упругости; μ – множитель Лагранжа, имеющий постоянную величину в изопериметрической задаче.

Следствием стационарности функционала являются уравнения объема и n уравнений, выражающих специфику оптимизационной задачи и вытекающих из условия $\partial J / \partial A_i = 0$:

$$-\frac{N_i^2}{2E\varphi_i^2 A_i^2} + \mu = 0.$$

Так как $N_i/(\varphi_i A_i)$ выражает квазинатяжение σ_i в i -м стержне, то последнее уравнение принимает вид

$$\frac{\sigma_i^2}{2E} = \mu (= \text{const}),$$

свидетельствующий о квазиравнонапряженности фермы:

$$\bar{\sigma}_i / \varphi_i = \text{const},$$

где $\bar{\sigma}_i = N_i / A_i$.

Приняв σ_i равным расчетному сопротивлению R , получаем:

$$A_i = \frac{N_i}{\varphi_i R},$$

то есть определение площадей поперечных сечений ведется известным методом последовательных приближений.

Вместе с тем, предположив уравнение $\sigma_i = R$ в качестве дополнительного условия вместо заданного объема, получаем новое выражение функционала:

$$J_1 = \frac{R}{2E} \sum_{i=1}^n \frac{N_i l_i}{\varphi_i}.$$

Его можно использовать при оптимизации топологии и геометрии фермы, предполагая варьируемыми расположение и длины стержней [9, 10].

2. Проектировочный расчет статически неопределимой фермы

Обратимся теперь к статически неопределимой ферме (см. рисунок). Длины стержней и величины внутренних усилий в них от лишних неизвестных X (стержни 2-8 и 6-9) представлены в таблице.

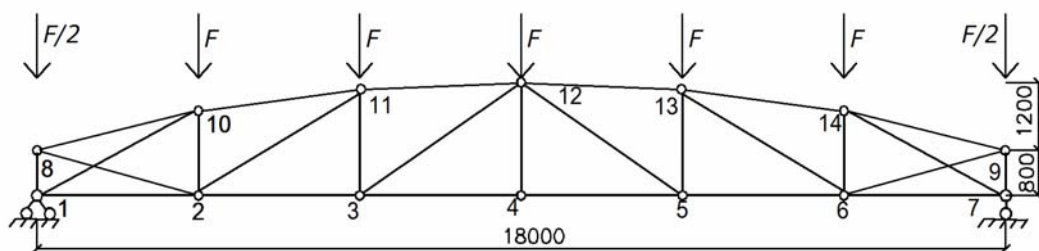


Схема фермы

Длины стержней и продольные усилия от X

Стержень	Длина	Внутреннее усилие
1-8	$0,4h$	$-Xh_1 / \sqrt{0,16h^2 + d^2}$
2-10	h_1	$-0,4Xh / \sqrt{0,16h^2 + d^2}$
1-2	d	$-Xd / \sqrt{0,16h^2 + d^2}$
8-10	$\sqrt{(h_1 - 0,4h)^2 + d^2}$	$-X / \sqrt{\frac{(h_1 - 0,4h)^2 + d^2}{0,16h^2 + d^2}}$
1-10	$\sqrt{h_1^2 + d^2}$	$X / \sqrt{\frac{h_1^2 + d^2}{0,16h^2 + d^2}}$
2-8	$\sqrt{(0,4h)^2 + d^2}$	X

Предположив варьируемыми величинами усилие X и геометрические параметры h_1 и h_2 (длины стержней 3-11 и 5-13), запишем функционал в виде

$$J_2 = J_1(h_1, h_2) + \Delta J(X, h_1),$$

где ΔJ – дополнение за счет влияния X .

Из условий стационарности функционала: $\frac{\partial J_2}{\partial X} = 0$, $\frac{\partial J_2}{\partial h_1} = 0$, $\frac{\partial J_2}{\partial h_2} = 0$ получаем

систему трех уравнений с неизвестными X , h_1 , h_2 .

В первом приближении знаки суммарных (от нагрузки и X) усилий принимаем из расчета статически определимой фермы [11]. В результате получаем:

$$\Delta J = \frac{2XR}{E\sqrt{0,16h^2 + d^2}} \left[\frac{h_1 \cdot 0,4h}{\Phi_1} + 0,4h \cdot h_1 + d^2 + \frac{(h_1 - 0,4h)^2 + d^2}{\Phi_2} + \frac{h_1^2 + d^2}{\Phi_3} + (0,16h^2 + d^2) \right].$$

Из условия $\frac{\partial J_2}{\partial X} = \frac{\partial \Delta J}{\partial X}$ вытекает уравнение, содержащее в левой части слагаемые из квадратной скобки. При $d=3$ м, $h=2$ м и в предположении сначала $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = 0,5$, затем $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = 0,15$ (в пределах использования линейного физического закона для стали) оно имеет вид:

$$h_1^2 - 0,2h_1 + 13,978 = 0;$$

$$h_1^2 - 0,34h_1 + 10,71 = 0.$$

Мнимые числа для h_1 означают отсутствие решения поставленной задачи, а следовательно, и равнонапряженности, заложенной в основу функционала J_2 . Она нарушает условия совместности деформаций. На пути оптимизации конструкции фермы стержни 2-8 и 6-9 и в самом деле оказались лишними.

Заключение. Вариационная постановка задачи оптимизации статически определимой фермы при учете устойчивости сжатых стержней показала, что равнонапряженность присуща категориям растянутых и сжатых стержней (при различии модулей напряжений в этих категориях). Наименьший объем статически неопределимой фермы имеет место при обращении в нуль усилий в ее лишних стержнях, то есть при переходе к равнонапряженной статически определимой основной системе.

Список литературы

1. Липин, Е.К. Некоторые свойства статически неопределимых равнопрочных ферм / Е.К. Липин // Ученые записки ЦАГИ. – 1983. – Т.14, № 5. – С. 12–19.
2. Maxwell, J.C. On the calculation of the equilibrium and stiffness of frames / J.C. Maxwell // The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. – 1890. – Vol. 2. – P. 175–177.
3. Michell, A.G.M. The limits of economy of material in framestructures / A.G.M. Michell // Philosophical Magazine and Journal of Science. – 1904. – Vol. 8. sixth Series, № 47.
4. Pippard, A.I.S. On a method for the direct design of framed structures having redundant bracing / A.I.S. Pippard // Tech. Rep. Aero. Res. Comn. London, for Year 1922-1923.
5. Рабинович, И.М. К теории статически неопределимых ферм / И.М. Рабинович. – М.: Транспечать, 1933. – 120 с.
6. Хуберян, К.М. К расчету статически неопределимых ферм / К.М. Хуберян. – Тбилиси: НИСоор, 1938. – 82 с.

7. Киселев, В.А. Строительная механика / В.А. Киселев. – 3-е изд., доп. – М.: Стройиздат, 1976. – 511 с.
8. Юрьев, А.Г. Строительная механика: синтез конструкций / А.Г. Юрьев. – М.: МИСИ, 1982. – 100 с.
9. Юрьев, А.Г. Оптимизация структуры металлических ферм / А.Г. Юрьев, В.А. Зинькова, Н.А. Смоляго, О.А. Яковлев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 7. – С.41–45.
10. Юрьев, А.Г. Оптимизация топологии и геометрии конструкций / А.Г. Юрьев. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. – 96 с.
11. Юрьев, А.Г. Проектировочный расчет фермы / А.Г. Юрьев, В.А. Зинькова, Ата Эль-Карим Солиман // Строительные материалы и изделия. – 2019. – Т.2, №1. – С.37–44.

References

1. Lipin, E.K. Some properties of statically indeterminate equi-strength trusses / E.K. Lipin // Scientific Notes of TSAGI. – 1983. – Vol. 14, No. 5. – P. 12–19.
2. Maxwell, J.C. On the calculation of the equilibrium and stiffness of frames / J.C. Maxwell // The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. – 1890. – Vol. 2. – P. 175–177.
3. Michell, A.G.M. The limits of economy of material in frame structures / A.G.M. Michell // Philosophical Magazine and Journal of Science. – 1904. – Vol. 8. sixth Series, № 47.
4. Pippard, A.I.S. On a method for the direct design of framed structures having redundant bracing / A.I.S. Pippard // Tech. Rep. Aero. Res. Comn. London, for Year 1922–1923.
5. Rabinovich, I.M. On the theory of statically indeterminate trusses / I.M. Rabinovich. – M.: Transpechat, 1933. – 120 p.
6. Huberyan, K.M. Calculation of statically indeterminate trusses / K.M. Huberyan. – Tbilisi: Nisoor, 1938. – 82 p.
7. Kiselev, V.A. Mechanics Structure / V.A. Kiselev. – Ed. 3rd, additional. – M.: Stroizdat, 1976. – 511 p.
8. Yuriev, A.G. Mechanics Structure: synthesis of structures / A.G. Yuriev. – M.: MISI, 1982. – 100 p.
9. Yuriev, A.G. Optimization of the structure of metal trusses / A.G. Yuriev, V.A. Zinkova, N.A. Smolyago, O.A. Yakovlev // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2017. – № 7. – P. 41–45.
10. Yuriev, A.G. Optimization of topology and geometry of structures / A.G. Yuriev. – Belgorod: Publishing House BSTU, 2018. – 96 p.
11. Yuriev, A.G. Design calculation truss / A.G. Yuryev, V.A. Zinkova, Ata El Carem Soliman // Building Materials and Products. – 2019. – Vol.2, N. 1. – P. 37–44.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 697.911

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Аверкин Александр Григорьевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: algraw@mail.ru

Ерёмкин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Аверкин Юрий Александрович,
аспирант

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Averkin Aleksandr Grigorievich,
Doctor of Sciences,
Professor of the department « Heat, gas supply
and ventilation »
E-mail: algraw@mail.ru

Eremkin Alexander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Heat, gas supply
and ventilation»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Averkin Yuri Alexandrovich,
Postgraduate student

ОСУШЕНИЕ ВОЗДУХА НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ СОРБЕНТОВ

А.Г. Аверкин, А.И. Еремкин, Ю.А. Аверкин

Приведены способы осушения воздуха в системах кондиционирования. Представлена классификация порового пространства твердых сорбентов, рассмотрен механизм сорбции водяных паров из воздуха. Разработаны схемы осушения воздуха на основе адсорбентов, которые позволяют уменьшить ресурсо- и энергозатраты при тепловлажностной обработке воздушных потоков. Дан сравнительный анализ технологических свойств промышленных адсорбентов. В качестве базового адсорбента принят силикагель марки КСМ. Рекомендована методика расчета высоты слоя гранулированного адсорбента на основе числа единиц переноса.

Ключевые слова: кондиционирование воздуха, осушение, адсорбенты, классификация пор, силикагель, капиллярная конденсация, технологическая схема

AIR DRAINAGE BASED ON SOLID SORBENTS

A.G. Averkin, A.I. Eremkin, Y.A. Averkin

The methods of air drying in air conditioning systems are given. The classification of the pore space of solid sorbents is presented, the mechanism of water vapor sorption from air is considered. Air drying schemes have been developed on the basis of adsorbents, which make it possible to reduce resource and energy consumption during heat and moisture treatment of air flows. A comparative analysis of the technological properties of industrial adsorbents is given. Silica gel brand KSM is used as the base adsorbent. A method for calculating the height of a layer of granular adsorbent based on the number of transfer units is recommended.

Keywords: air conditioning, dehumidification, adsorbents, pore classification, silica-gel, capillary condensation, flow chart

Введение

В системах кондиционирования воздуха (СКВ) основными процессами тепловлажностной обработки воздушного потока являются: в теплый период года – осушение и охлаждение, в холодный период – нагрев и увлажнение [1]. Осушение воздуха в СКВ является наиболее ресурсо- и энергозатратным технологическим процессом. Оно может осуществляться несколькими способами:

а) *с помощью холодоносителей* (жидкой среды, например воды, температура которой ниже точки росы воздуха), их получают с помощью холодильных установок (чиллеров), стоимость которых для центральных кондиционеров составляет миллионы рублей;

б) *с помощью сорбентов*, например адсорбентов (твердых сорбентов), реализация процесса не требует дорогого и сложного оборудования. Одной из причин его неприменения в СКВ России является отсутствие промышленного производства оборудования и недостаточная научно-методическая база его проектирования.

Аналізу и совершенствованию промышленных схем осушения воздуха на основе твердых сорбентов, разработке графоаналитической методики расчета адсорберов посвящаются материалы данной статьи.

Материалы и методы

При выборе адсорбента для СКВ воспользуемся научными данными о строении его порового пространства [1].

Согласно классификации академика М.М. Дубинина поры в твердых телах подразделяются на следующие типы (Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. – М.: Химия, 1984. – 592 с.):

- макропоры с радиусом более 100–200 нм;
- переходные (мезопоры) с радиусом от 1,5 до 100 нм;
- микропоры с радиусом до 1,5 нм.

Макропоры с размерами пор более 100 (200) нм являются транспортными каналами для подвода адсорбируемых молекул к мезопорам и микропорам. В макропорах и мезопорах наблюдается послойный механизм адсорбции, в микропорах же, размер которых соизмерим с размерами адсорбируемых молекул, адсорбция носит характер объемного заполнения. Поэтому для микропористых адсорбентов объем пор, а не его поверхность, имеет основное значение в адсорбции.

Удельный объем микропор в адсорбентах достигает 0,2–0,6 см³/г, удельная поверхность – до 500 м²/г и более. Микропоры играют основную роль при разделении газовых смесей, особенно при очистке газов от малых концентраций примесей.

При частичном заполнении жидкостью капиллярного канала ее мениск приобретает вогнутую форму. Впервые количественную зависимость упругости насыщенного пара жидкости от кривизны сферической поверхности мениска получил Кельвин (Томпсон) [1]:

$$\frac{P}{P_0} = e^{\pm \frac{2\sigma V_m}{rRT}}, \quad (1)$$

где P – давление насыщенного пара над выпуклой (знак +) или вогнутой (знак –) поверхностью, Па; P_0 – давление насыщенного пара над плоской поверхностью, Па; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; V_m – молярный объем, м³; r – радиус мениска, м; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); T – температура, К.

Из анализа уравнения (1) следует, что для вогнутой поверхности мениска при тех же значениях величины r его правая часть меньше единицы, т.е. $P < P_0$ (в окружающем воздухе парциальное давление водяных паров выше, чем в поровом пространстве сорбента, где мениски жидкости имеют вогнутую форму). Ввиду разницы парциальных давлений происходит сорбция водяных паров из воздуха телом адсорбента, т.е. осушение воздуха. При этом водяной пар претерпевает фазовое превращение, он пере-

ходит из парообразного состояния в жидкое. Данный процесс соответствует *капиллярной конденсации*.

Капиллярная конденсация влаги сопровождается выделением удельной теплоты испарения и удельной теплоты смачивания. Полная удельная теплота адсорбции составляет 2930 кДж/кг, из которых около 420 кДж/кг составляет теплота смачивания. Теплота адсорбции повышает температуру как слоя адсорбента, так осушаемого воздуха [1].

Для осушения воздуха наибольшее практическое значение имеет силикагель марки КСМ (крупный силикагель мелкопористый). Силикагель – гидратированный аморфный кремнезем, т.е. гель кремневой кислоты. Его формула $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Силикагель получают при взаимодействии солей поликремневых кислот с минеральными кислотами. По внешнему виду силикагели – это твердые стекловидные прозрачные или матовые зерна, бесцветные или светло-коричневые. Диаметр частиц силикагеля равен 2–7 мм. Удельная поверхность порового пространства достигает 400 м²/г, плотность твердого вещества силикагеля равна 2,2...2,3 г/см³, плотность сорбента в насыпном состоянии составляет 0,45...0,70 г/см³, объем капилляров – 40...60 % от общего объема.

Основные технологические свойства промышленных адсорбентов приведены в таблице [1].

Технологические свойства промышленных адсорбентов

Свойство	Адсорбенты		
	силикагель	алюмогель	цеолит
Равновесная влагоемкость при низких парциальных давлениях воды	Низкая	Низкая	Высокая
То же при высоких парциальных давлениях	Высокая	Высокая	Высокая
Пригодность для осушки горячих газовых сред	Непригоден	Непригоден	Пригоден
Устойчивость к капельной влаге	Неустойчив	Устойчив	Ограниченно устойчив
Устойчивость к присутствию в газе кислых компонентов	Устойчив	Неустойчив	Ограниченно устойчив
Каталитическая активность в реакциях полимеризации ненасыщенных соединений	Активен	Неактивен	Активен
Механическая прочность	Прочный	Прочный	Ограниченно прочный
Стоимость	Низкая	Очень высокая	Высокая

Анализ данных, приведенных в таблице и литературных источниках [1], показал, что силикагель имеет следующие преимущества:

- высокая избирательная сорбционная способность к водяным парам и гидрофильность;
- низкая температура для стадии регенерации (110...200 °С) и, как следствие, более низкие энергозатраты при регенерации, чем у других промышленных сорбентов;
- возможность синтеза силикагелей в широком интервале заданных структурных характеристик при использовании достаточно простых технологических приемов;
- низкая себестоимость при промышленном производстве;
- высокая механическая прочность по отношению к истиранию и раздавливанию;
- негорючесть.

Недостатком силикагеля является разрушение его зерен под воздействием капельной влаги.

Рабочие уравнения для описания равновесной адсорбции паров воды на силикагелях отсутствуют, в технологических расчетах используется экспериментальная информация. Ее пример приведен на рис. 1 [1], где представлены изотермы адсорбции водяных паров на двух образцах силикагелей.

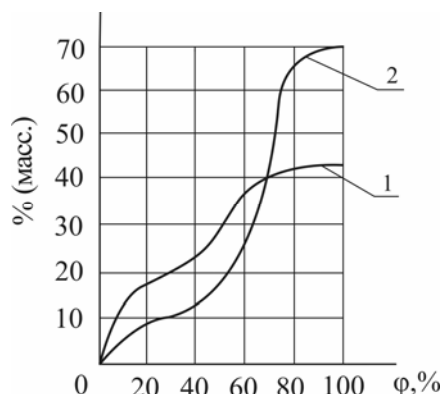


Рис. 1. Изотермы адсорбции водяных паров на мелкопористом (2) и среднепористом (1) силикагелях при 20 °С

Изотермы адсорбции (см. рис. 1) имеют неленгмюровский характер, что связано с протеканием в порах силикагеля капиллярной конденсации.

Рассмотрим подробнее процессы и оборудование для осушения воздуха на основе применения твердых сорбентов (рис. 2). Осушение воздуха осуществляют в адсорберах с неподвижным слоем сорбента. В качестве сорбента применяют активированный уголь, силикагель и др. Для обеспечения непрерывности процесса адсорберы дублируют. В то время как один аппарат адсорбирует водяные пары из воздуха, другой подвергается активации, т.е. проводят десорбцию водяных паров путем повышения температуры в слое сорбента.

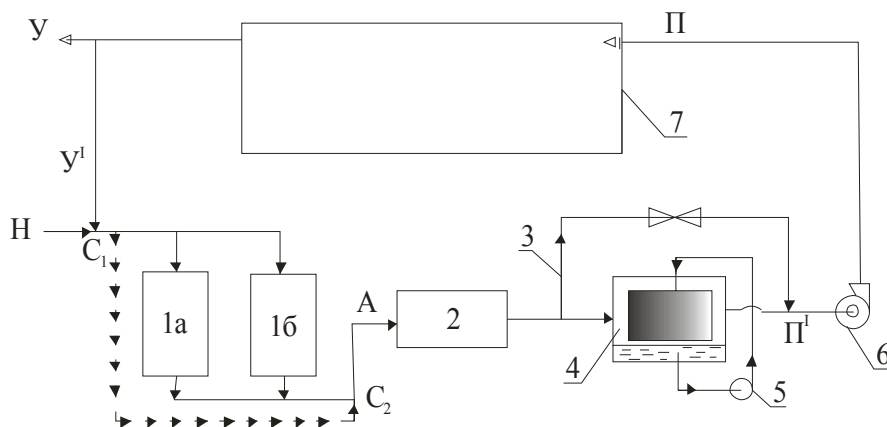


Рис. 2. Схема осушения воздуха на основе твердых сорбентов:

1а, 1б – адсорберы; 2 – холодильник (поверхностный теплообменник); 3 – байпас;
4 – контактный аппарат; 5 – насос; 6 – вентилятор; 7 – помещение

Наружный воздух (Н) после смешения с рециркуляционным воздушным потоком (с частью удаляемого воздуха) с параметрами смеси (C_1) проходит адсорбер, где реализуется процесс изохвального осушения. Из адсорбера осушенный воздух с параметрами (А) направляют в поверхностный теплообменник – холодильник для сухого охлаждения, затем он поступает в контактный аппарат с байпасным воздухом для получения приточного воздуха заданных параметров (Π^1) путем увлажнения в адиабатических условиях с применением рециркуляционной воды. Изменение параметров воздушного потока на $I-d$ -диаграмме влажного воздуха представлено на рис. 3 [1].

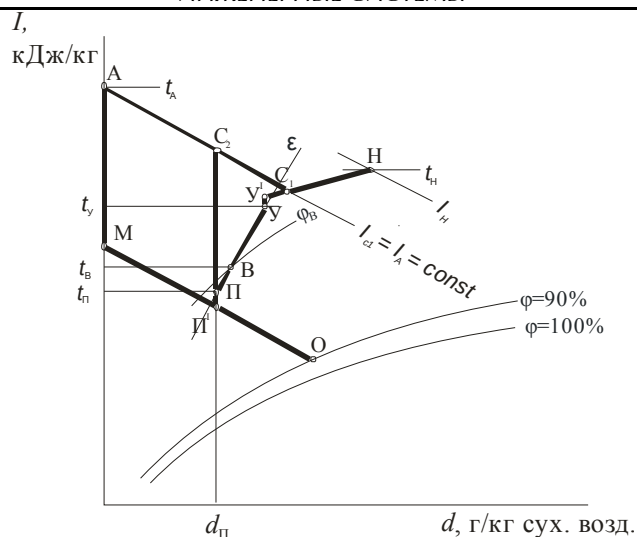


Рис. 3. Схемы процессов при осушении воздушного потока на основе твердых сорбентов на I - d -диаграмме влажного воздуха по традиционной технологии:

НУ¹ – смешение наружного воздуха с частью удаляемого воздуха; СА – изохэнтальпийное осушение воздуха в адсорбере; АМ – сухое охлаждение воздуха в поверхностном теплообменнике – холодильнике; МО – адиабатическое увлажнение воздуха в контактном аппарате (смешение воздушных потоков из холодильника и контактного аппарата); ПП – нагрев приточного воздуха за счет трения о стенки воздуховода; ПВУ – процесс в помещении; У¹У – нагрев удаляемого воздуха о стенки воздуховода

Результаты и обсуждения

Проведенный анализ представленных процессов позволил разработать усовершенствованную схему осушения воздуха с применением твердых сорбентов (рис. 4). В частности, для получения заданных параметров приточного воздуха *можно исключить контактный узел для увлажнения воздуха, насос для рециркуляционной воды, соответственно, уменьшить расход электрической энергии*. Модернизация процесса обработки воздуха может быть осуществлена путем монтажа дополнительного воздуховода (на рис. 2 воздуховод представлен пунктирной линией) для повторного смешения воздушной смеси, полученной на первой стадии при подмешивании части удаляемого воздуха к наружному воздуху, с осушенным воздухом из адсорбера.

При этом параметры новой воздушной смеси соответствуют т. С₂, ее влагосодержание – приточному воздуху. Для получения параметров приточного воздуха воздушную смесь охлаждают в поверхностном теплообменнике – холодильнике 2 (см. рис. 2).

Расчет соотношения количества смешиваемых воздушных потоков производится по уравнению

$$G_A = G \frac{d_{c_2} - d_A}{d_{c_1} - d_A}, \quad (3)$$

где G , G_A – соответственно расходы приточного воздуха и воздуха, поступающего из адсорбера, кг/ч; d_{c_1} , d_{c_2} , d_A – соответственно влагосодержание воздуха в точках С₁, С₂, А, г/кг сух. возд.

Определение расхода теплоты Q , кВт, отнимаемой в холодильнике 2, составит

$$Q = 0,278 \cdot G(I_{C_2} - I_{\Pi^1}), \quad (4)$$

где I_{C_2} , I_{Π^1} – соответственно энтальпия воздуха на входе, выходе из холодильника, кДж/кг.

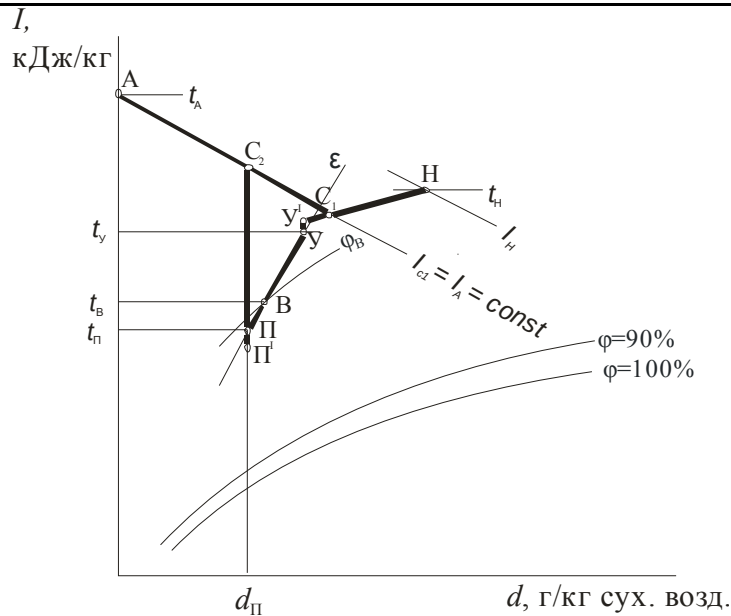


Рис. 4. Усовершенствованная схема осушения воздушного потока на основе твердого сорбента:

НУ¹ – смешение наружного воздуха с частью удаляемого воздуха; СА – изохалатное осушение воздуха в адсорбере (или смешение воздушного потока из адсорбера с параметрами А с воздухом с параметрами С₁); СП¹ – сухое охлаждение воздуха в поверхностном теплообменнике – холодильнике; ΠΠ¹ – нагрев приточного воздуха за счет трения о стенки воздухопровода; ΠВУ – процесс в помещении; У¹У – нагрев удаляемого воздуха о стенки воздухопровода

Авторами разработана методика расчета конструктивных размеров адсорбера на основе числа единиц переноса с применением модифицированной *I-d*-диаграммы влажного воздуха, на поле которой нанесены дополнительные изолинии равновесных влагосодержаний силикагеля марки КСМ [1]:

- диаметр аппарата – D_a , м,

$$D_a = \sqrt{\frac{G}{2826 \cdot \rho v}}, \quad (5)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; v – скорость воздуха (0,2...0,3 м/с);

- высота слоя сорбента в аппарате – H , м,

$$H = n \cdot h, \quad (6)$$

где n – число единиц переноса; h – высота единицы переноса, м [3, 4].

Вывод

Разработаны технологические схемы и произведен графоаналитический расчет оборудования для осушения воздуха на основе зернистого силикагеля в системах кондиционирования, позволяющие снизить ресурсо- и энергозатраты при тепловлажностной обработке воздуха.

Список литературы

1. Аверкин, А.Г. Совершенствование устройств тепловлажностной обработки воздуха и методов расчета климатехники: монография / А.Г. Аверкин, А.И. Еремкин. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 204 с.
2. Аверкин, А.Г. *I-d*-диаграмма влажного воздуха и ее применение при проектировании технических устройств / А.Г. Аверкин. – СПб.: Лань, 2016. – 192 с.
3. Аверкин, А.Г. Столетие *I-d*-диаграммы влажного воздуха: устройство, применение, модернизация / А.Г. Аверкин, А.И. Еремкин, Е.Г. Ершов, Ю.А. Аверкин // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №4. – С. 166–172.

4. Самарский, А.А. Численные методы решения задач конвекции-диффузии / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2015. – 248 с.

References

1. Averkin, A.G. Perfection of devices for heat and moisture treatment of air and methods of calculation of climat of technics: monograph / A.G. Averkin, A.I. Eremkin. – Penza: PGUAS, 2015. – 204 p.
2. Averkin, A.G. *I-d*-diagram of humid air and its application in the design of technical devices / A.G. Averkin. – St. Petersburg: Lan, 2016. – 192 p.
3. Averkin, A.G. Century *I-d*-diagrams of humid air: device, application, modernization / A.G. Averkin, A.I. Eremkin, E.G. Ershov, Yu.A. Averkin // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 4. – P. 166–172.
4. Samarsky, A.A. Numerical methods for solving convection-diffusion problems / A.A. Samarsky, P.N. Vabishchevich. – М.: Book House «LIBROKOM», 2015. – 248 p.

УДК 677:628.853

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Ерёмкин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Фильчакина Ирина Николаевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: filchakina80@mail.ru

Орлова Наталья Александровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: nataor23@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Eremkin Alexander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Heat, gas supply
and ventilation»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Filchakina Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Heat, gas supply and
ventilation»
E-mail: filchakina80@mail.ru

Orlova Natalia Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Heat, gas supply and
ventilation»
E-mail: filchakina80@mail.ru

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УВЛАЖНЕНИЯ ТЕКСТИЛЬНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С КОНДИЦИОНИРОВАННЫМ ВОЗДУХОМ

А.И. Ерёмкин, И.Н. Фильчакина, Н.А. Орлова

Предложена физико-математическая модель процесса увлажнения текстильных материалов кондиционированным воздушным потоком с использованием физико-математических описаний закономерностей процессов увлажнения. Построенные математические модели и сформулированные краевые задачи позволяют рассчитывать распределение относительной влажности кондиционированного воздуха в объеме рассматриваемой пористой среды в одномерном квазистационарном случае.

Ключевые слова: физико-математическое моделирование; влажность текстильных материалов, процесс увлажнения пористой среды, воздухораспределитель равномерной подачи воздуха

PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF TEXTILE MATERIAL MOISTURING WHEN INTERACTING WITH AIR CONDITIONED AIR

A.I. Eremkin, I.N. Filchakina, N. A. Orlova

A physical and mathematical model of the process of moistening textile materials with conditioned air flow using physical and mathematical descriptions of the laws of the processes of moistening has been proposed. The made mathematical models and the formulated boundary-value problems make it possible to calculate the distribution of the relative humidity of the conditioned air in the volume of the porous medium under consideration in the one-dimensional quasistationary case.

Keywords: physical and mathematical modeling; textiles moisture, the process of porous medium moistening, air distributor uniform air supply

Введение

Известно, что на текстильных предприятиях в ходе производства пряжи на стадиях чесания, кручения, прядения и ткачества требуется поддерживать различную влажность волокон W , %. Для обеспечения W на каждом этапе переработки в практике используется метод вылеживания материалов в специальных помещениях с влажным микроклиматом. Это удорожает, усложняет и удлиняет процесс получения полуфабрикатов и пряжи. Чтобы обеспечить необходимую влажность волокон без вылеживания непосредственно в ходе технологического процесса, необходимо изучить процессы увлажнения волокон кондиционированным воздухом в ходе их переработки. Наиболее удобным инструментом проведения теоретических исследований, как известно, является математическое моделирование физических и технологических процессов.

Теоретический анализ

В данной статье приведена физико-математическая модель процесса увлажнения текстильных материалов кондиционированным воздушным потоком воздуха с использованием физико-математических описаний закономерностей процессов увлажнения. Увлажняемый материал представляет собой бобины с плотно намотанными полуфабрикатами пряжи и нитями (рис. 1) и может рассматриваться как пористая среда с распределенными по объему эффективными характеристиками, такими, как пористость, теплопроводность, массопроводность, адсорбционные характеристики и пр. В процессе увлажнения материала среды в каждой точке пористого пространства происходит реакция адсорбции влаги, которая имеет свои микроскопические закономерности [1, 2]. Важнейшими механизмами проникновения влажного воздуха к внутренним, труднодоступным участкам пористого материала являются принудительный поток воздуха и диффузионный механизм. При этом учет скорости микроскопической реакции увлажнения поверхности нити (ровницы, ленты и пр.) должен производиться в соответствии с теорией зависимости влагосодержания материала от относительной влажности воздуха и температуры среды [2, 3, 4].

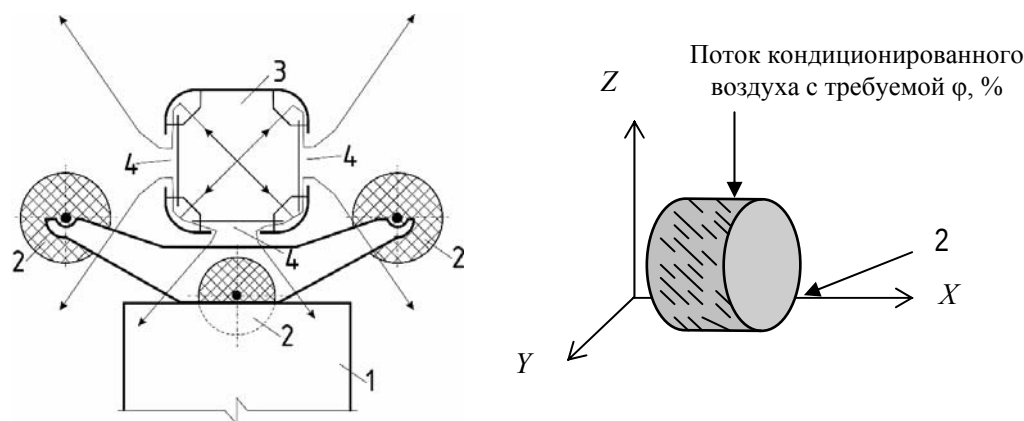


Рис. 1. Схема установки воздухораспределителя на рамке прядильной машины:

1 — прядильная машина; 2 — бобины с ровницей; 3 — воздухораспределитель с трехсторонней подачей и оппозитными щелями [5]; 4 — наружная воздуховыпускающая щель

Температура внутренней области пористой материала определяется теплопроводностью и, очевидно, должна учитываться при значительных перепадах температуры подаваемого в рабочую зону увлажняющего воздуха. Если таких перепадов нет, то, по-видимому, температурными колебаниями вне и внутри среды можно пренебречь. Подобный подход к принципиальному описанию макрокинетики пористой системы как однородной среды при определенных условиях протекания адсорбционных процессов был предложен еще в 1939 г. Я.Б. Зельдовичем и успешно применяется исследователями и в настоящее время [3].

Пористая среда рассматривается как однородная, в каждой точке которой протекает кинетическая реакция увлажнения. Коэффициент диффузии D , м²/с, как один из возможных кинетических параметров имеет усредненное значение и может существенно отличаться от истинного и определяться на основе экспериментальных исследований.

Моделирование процесса увлажнения пористой среды

Физико-математическое моделирование процесса увлажнения пористой среды (прядельного материала) представлено на примере ровницы, намотанной на бобину (см. рис. 1). Увлажненный воздух подается непосредственно на бобину и в технологическую зону прядельной машины [3, 4]. Воздухораспределитель 3 [3, 5], установленный на рамке прядельной машины 1, позволяет подавать сравнительно большие массы приточного воздуха и обеспечивает достаточно малые скорости воздуха в рабочей зоне, не создавая дискомфорта для работающего персонала. При этом осуществляется трехсторонняя подача воздуха через воздуховыпускные щели 4, сделанные снизу, справа и слева в стенках воздухораспределителя.

Воздухораспределитель 2 (рис. 2) предусматривается установить на ровничной рамке по длине прядельной машины 1 так, чтобы не затруднять работу прядельщицы при замене пустых бобин полными, а воздуховыпускные щели (отверстия) в воздухораспределителе разместить таким образом, чтобы выходящий воздушный поток омывал бобины с ровницей 3 и 4. При таком способе воздухораздачи будет осуществляться кондиционирование ровницы 3 непосредственно в период прядения, а также будут обрабатываться запасные бобины 4.



Рис. 2. Установка воздухораспределителя на рамке прядельной машины в зоне ровницы:

- 1 – прядельная машина; 2 – воздухораспределитель;
3 – обрабатываемая бобина с ровницей; 4 – запасные бобины с ровницей

Примем следующие допущения, которые при рассматриваемых технологических приемах увлажнения текстильного материала являются вполне естественными:

1. Температура воздуха в бобине и во всех точках технологической зоны прядельной машины одинакова (это соответствует действительности в случае, когда подаваемый кондиционированный воздух не меняет температуру с течением времени, что реализуется в рамках технологических требований текстильного производства).

2. Подача кондиционированного воздуха в объем пористой среды (бобина с ровницей, веретено с пряжей, лента и пр.) осуществляется преимущественно за счет принудительного движения воздуха и диффузионного переноса влаги.

Исходя из закона сохранения вещества, в каждой точке рассматриваемой среды изменение влажности во времени подчиняется уравнению

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\operatorname{div}(j_{\text{прин}} + j_{\text{дифф}}) + j_{\text{ист}}, \quad (1)$$

где $\operatorname{div} = \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right)$ – оператор дивергенции вектора; $j_{\text{прин}}$ – принудительный поток воздуха, обусловленный наличием начальной скорости подачи воздуха в пористую среду; $j_{\text{дифф}}$ – поток, обусловленный диффузией влаги; $j_{\text{ист}}$ – отрицательный источник, вызванный потерей влаги из подаваемого влажного воздуха за счет адсорбции влаги в каждой точке объема псевдооднородной среды.

Рассмотрим выражения для каждого из потоков в отдельности.

Для потока принудительного движения воздуха

$$j_{\text{прин}} = \varphi \cdot \vec{w}, \quad (2)$$

где $\vec{w} = (w_1, w_2, w_3)$ – вектор скорости движения кондиционированного воздуха сквозь пористую среду.

В первом приближении допустимо считать, что компоненты этого вектора имеют постоянную величину. Далее рассмотрим случай изменения скорости в объеме пористой среды.

Для потока диффузии влаги внутри среды

$$j_{\text{дифф}} = -D \cdot \operatorname{grad}(\varphi), \quad (3)$$

где D – усредненный коэффициент диффузии.

Так как рассматривается псевдооднородная модель пористой среды, то значение D является не истинным коэффициентом диффузии, а некоторым рабочим параметром, позволяющим усредненно описывать процесс диффузии влаги в пористой среде.

Плотность источника поглощения влаги

$$j_{\text{ист}} = -k \cdot F_{\text{пс}} \cdot f(\varphi),$$

где k – константа скорости адсорбции на единицу поверхности, кг/(м²·с); $F_{\text{пс}}$ – удельная поверхность единицы объема пористой среды, м²/кг.

Вид функции $f(\varphi)$ зависит от механизма увлажнения материала, для ее описания существует множество моделей, которые соответствуют частным физико-химическим ситуациям, но малоприспособлены для их использования в общем, усредненном случае. Авторами предложено решение данной задачи, где $f(\varphi)$ – заданная функция, соответствующая экспериментально определенной зависимости.

Вернемся к уравнению (1). Итак,

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\operatorname{div}(j_{\text{прин}}) - \operatorname{div}(j_{\text{дифф}}) + j_{\text{ист}}$$

или

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\left(w_1 \frac{\partial \varphi}{\partial x} + w_2 \frac{\partial \varphi}{\partial y} + w_3 \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + D \cdot \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) - k \cdot F_{\text{пс}} \cdot f(\varphi). \quad (4)$$

Уравнение (4) является базовой моделью для расчета распределения влажности воздуха в объеме рассматриваемой пористой среды.

Авторами предложен ряд естественных предположений и упрощений.

В первом приближении считается, что в течение определенных, достаточно коротких промежутков времени влагосодержание воздуха, подаваемого в рабочую и технологическую зоны прядильной машины, постоянно. Допустимо принять условия:

- внутри и вне пористой среды отношение $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0$;
- все участки поверхности бобины с ровницей равнодоступны для подаваемого воздуха и имеют одинаковые поверхностные характеристики.

В рамках таких предположений многомерное уравнение (4) упрощается до одномерного стационарного

$$D \cdot \frac{d^2 \varphi}{dx^2} - w \frac{d\varphi}{dx} = k \cdot F_{\text{пс}} \cdot f(\varphi). \quad (5)$$

Принятые упрощения не позволяют полностью описать процесс увлажнения материала рассматриваемой пористой среды, но дают возможность получить картину распределения влажности воздуха внутри пористой среды для некоторого временного среза и определить влияние различных факторов на такое распределение.

Уравнение (5) может быть решено конечно-разностными методами, если известны вид или табулированные значения функции $f(\varphi)$, а также значения усредненного коэффициента диффузии D , скорости потока w и удельной поверхности среды $F_{\text{пс}}$.

Для численного решения уравнения (5) необходимо задать также граничные условия. В точке $x = 0$, т.е. на границе пористой среды, влажность материала соответствует влажности подаваемого в технологическую зону воздуха φ_0

$$\varphi(0) = \varphi_0. \quad (6)$$

Выведем условие для производной $\frac{d\varphi}{dx}$ в точке $x = 0$.

Выделим элементарный объем в пористой среде (ПС) единичной площади и малой толщины V_m . Рассмотрим изменение влагосодержания воздуха при прохождении его сквозь пористую среду заданного объема. Относительная влажность воздуха в этом объеме $\varphi(x)$ будет меняться по мере движения сквозь среду, а именно уменьшаться за счет осаждения влаги в порах среды.

Пусть φ_0 – начальная относительная влажность воздуха на входе в ПС.

После прохода в толщу среды на расстояние Δx влажность воздуха изменится до φ_Δ за счет сорбции влаги на поверхности.

Тогда

$$(\varphi_0 - \varphi_\Delta) = \frac{Q_p^0 - Q_p^\Delta}{Q_{\text{max}}},$$

где Q_p^0 – количество водяного пара в единице объема влажного воздуха до увлажнения объема V_m пористой среды; Q_p^Δ – количество водяного пара в единице объема влажного воздуха после увлажнения объема V_m пористой среды; Q_{max} – максимальное количество водяного пара в единице объема влажного воздуха.

Величина $Q_{\text{max}} (\varphi_0 - \varphi_\Delta) \cdot \frac{V_m}{V_{\text{ед}}}$ равна количеству влаги, адсорбированной в порах

ПС объема V_m ($V_{\text{ед}}$ – единичный объем).

В каждой точке пористой среды влага осаждается согласно закону адсорбции, то есть кривой адсорбции, зависящей от физико-химических характеристик среды:

$$W(x) = f(\varphi(x)),$$

где $W(x)$ – удельное влагосодержание волокон в точке x .

$$\rho S_m \int_0^{\Delta x} (f(\varphi(x)) - W_0) dx,$$

где ρ – плотность пористого материала; S_m – площадь, занятая твердой фазой ПС; W_0 – удельное влагосодержание материала до увлажнения.

Таким образом,

$$Q_{\max} (\varphi_0 - \varphi_{\Delta}) \cdot \frac{V_m}{V_{\text{ед}}} = \rho S_m \int_0^{\Delta x} (f(\varphi(x)) - W_0) dx.$$

Поделим обе части этого равенства на ΔX и перейдем к пределу при $\Delta X \rightarrow 0$. При этом логично предположить, что после предельного перехода область V_m будет представлять собой часть единичной поверхности S_m , соответствующей площади пор, т.е. $\varepsilon \cdot S_{\text{ед}}$, где ε – коэффициент пористости ПС. S_m соответственно является частью единичной поверхности, занятой твердой фазой среды, т.е. $S_m = (1 - \varepsilon) \cdot S_{\text{ед}}$.

Условие для производной функции $\varphi(x)$ в точке $x = 0$

$$\frac{d\varphi}{dx}(0) = -\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{\rho}{Q_{\max}} (f(\varphi(0)) - W_0). \quad (7)$$

Можно уверенно утверждать, что в отдаленной от границы точке в объеме пористой среды влажность воздуха в порах также является некоторой постоянной величиной. То есть на некотором расстоянии δ от границы

$$\left. \frac{d\varphi(x)}{dx} \right|_{x \geq \delta} = 0.$$

Это условие соответствует предположению, что на достаточном расстоянии от границы пористой среды влажности воздуха и материала среды можно принять равными, и будет использоваться для контроля численного решения.

Уравнения (5)–(7) представляют собой задачу Коши для обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка и являются некоторым приближением к полному математическому описанию процесса увлажнения, протекающего в объеме пористой среды, которая при правильном выборе параметров процесса позволяет с достаточной точностью рассчитывать первичное распределение влаги в порах рассматриваемой системы.

Прежде чем описать метод решения задачи (5)–(7), приведем некоторые рассуждения о корректности постановки, в частности, устойчивости решения. Очевидно, если задача (5)–(7) не относится к разряду устойчивых дифференциальных уравнений, то использование численных методов для решения задачи затруднительно и при проведении расчетов необходимо использовать так называемые «жесткие» методы численного решения дифференциальных уравнений. Применение же обычных методов должно сопровождаться постоянным контролем над их решением. Это необходимо для классически неустойчивых систем дифференциальных уравнений. Малые изменения в начальных данных для искомой функции могут вызвать значительные ошибки в решении системы на последующих, особенно на конечных, участках изменения независимой переменной, вплоть до полного искажения решения.

Покажем возможную неустойчивость задачи (5)–(7). Для этого введем новую неизвестную функцию

$$\psi(x) = \frac{d\varphi}{dx} \quad (8)$$

и преобразуем дифференциальное уравнение второго порядка (5) к системе двух дифференциальных уравнений первого порядка относительно двух неизвестных функций $\varphi(x)$ и ее производной $\psi(x)$:

$$\begin{cases} D \frac{d\psi}{dx} - w \frac{d\varphi}{dx} = F_{\text{nc}} \cdot f(\varphi); \\ \frac{d\varphi}{dx} = \psi. \end{cases} \quad (9)$$

Для исследования устойчивости системы (9) упростим ее, считая, что проникновение кондиционированного воздуха в пористую среду за счет принудительного потока незначительно, т.е. величина w близка к нулю. Для удобства обозначим $\psi = Z_1$, $\varphi = Z_2$, тогда систему (9) можно записать в виде:

$$\begin{cases} D \frac{dZ_1}{dx} = F_{\text{nc}} \cdot f(Z_2) = f_1(Z_1, Z_2); \\ \frac{dZ_2}{dx} = Z_1 = f_2(Z_1, Z_2). \end{cases} \quad (10)$$

Система дифференциальных уравнений (10) называется автономной и легко исследуется на предмет устойчивости. Для этого достаточно составить характеристическое уравнение относительно некоторой формальной неизвестной величины λ

$$\det \left[\frac{df_i}{dx_k}(0) - \lambda \cdot \delta_k^i \right], \quad (11)$$

где $\delta_k^i = \begin{cases} 1, \text{если } i = k, \\ 0, \text{если } i \neq k, \end{cases}$ – символ Кронекера, и проверить его на наличие корней с положительной действительной частью.

Если таковые имеются, то система (10) является неустойчивой относительно точки равновесия $Z_i(0)$. В нашем случае характеристическое уравнение примет вид:

$$\lambda^2 - F_{\text{nc}} \frac{df}{d\varphi} = 0. \quad (12)$$

Так как функция $f(\varphi)$ представляет собой адсорбционную кривую, то, в силу монотонного возрастания с ростом φ , ее производная положительна во всем интервале изменения φ и, следовательно, один из корней уравнения (12) положителен, что говорит о возможном нарушении устойчивости при решении системы уравнений (10), а значит, и более сложной системы (9).

Несмотря на возможное нарушение устойчивости системы (10), численные расчеты показали, что для решения системы уравнений (9) вполне пригодным оказался конечно-разностный метод решения систем дифференциальных уравнений Рунге–Кутты с автоматическим выбором шага интегрирования системы.

Программа для решения системы (9), используемая авторами для расчетов, написана и реализована в интегрированной вычислительной среде MathCad, что очень удобно как для программирования, так и для визуализации результатов.

На рис. 3 приведены теоретические кривые изменения относительной влажности φ воздуха в толщине пористой среды (ровницы) [3], анализ которых позволяет сделать вывод, что более интенсивное уменьшение φ происходит при снижении скорости движения потока.

Для подтверждения теоретических данных были проведены экспериментальные исследования изменения относительной влажности в толще бобины с ровницей при разных значениях скорости потока воздуха в производственных условиях (рис. 4, 5).

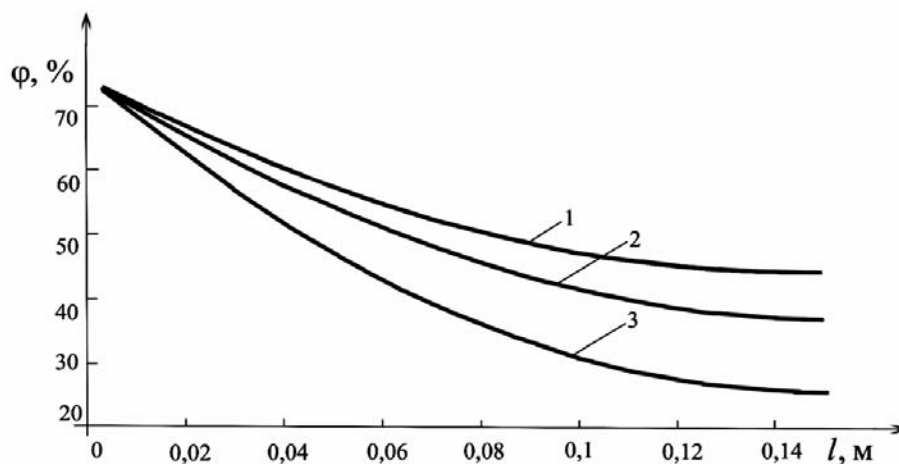


Рис. 3. Теоретические кривые изменения относительной влажности ϕ воздуха в толщине пористой среды при значениях w :
0,3 – кривая (1); 0,2 – (2); 0,1 – (3); $D = 0,15$; $F_{\text{лр}} = 3500$

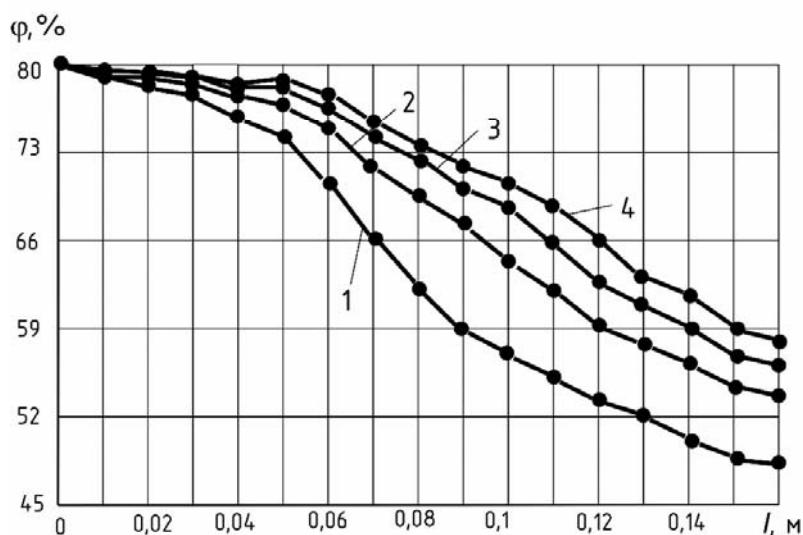


Рис. 4. Экспериментальные кривые изменения относительной влажности воздуха ϕ в толщине l бобины с ровницей от скорости потока воздуха:
1 – $w = 2$ м/с; 2 – $w = 4$ м/с; 3 – $w = 6$ м/с; 4 – $w = 8$ м/с

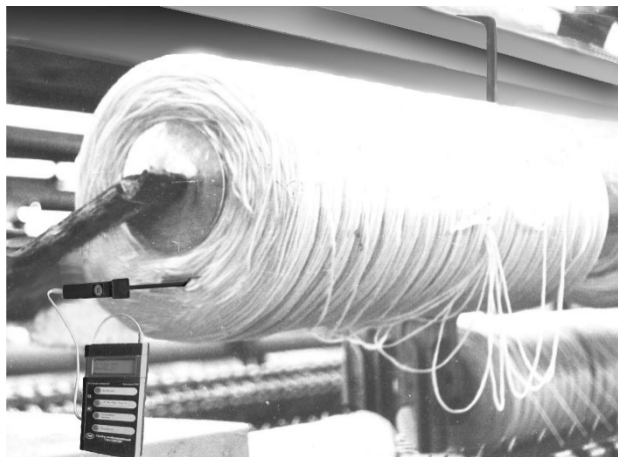


Рис. 5. Экспериментальные исследования изменения относительной влажности воздуха φ в толщине бобины с ровницей l с помощью прибора типа ТКА-ПКМ-60 в производственных условиях

Отмечается некоторое несоответствие расчетных (см. рис. 3) и экспериментальных (см. рис. 4) данных в допустимых пределах (12 %) при достаточно больших скоростях подачи влажного воздуха в рабочую зону. Связано это с тем, что увеличение скорости потока воздуха имеет двоякое влияние на скорость адсорбции влаги. С одной стороны, при больших скоростях потока уменьшается время контакта частиц влаги с пористым материалом, процесс «продавливается» внутрь пористой массы. С другой стороны, рост скорости потока усиливает конвективное перемешивание влажного воздуха, что способствует уменьшению толщины диффузионно-адсорбционного слоя, увеличивает скорость доставки влаги к поверхности материала пористой среды и, как следствие, скорость увлажнения материала.

Заключение

1. Взаимное влияние скорости подаваемого воздуха на изменение его относительной влажности позволяет сделать вывод о существовании некоторого наиболее выгодного значения скорости подачи потока воздуха в зону бобины с ровницей ($v = 2$ м/с), при котором процесс увлажнения протекает на достаточной глубине в пористой среде при высокой скорости ее увлажнения до 12 %.

2. На основе представления компактно сформированного текстильного материала в виде псевдооднородной среды, характеризуемой усредненными физическими и технологическими параметрами, а также на основе физико-математических описаний процессов взаимодействия волокон с кондиционированным воздухом в объеме капиллярно-пористой коллоидной среды при увлажнении ее принудительным потоком кондиционированного воздуха построены физико-математические модели и сформулированы краевые задачи, которые позволяют рассчитывать распределение относительной влажности кондиционированного воздуха в объеме рассматриваемой пористой среды в одномерном квазистационарном случае.

Список литературы

1. Кирюхин, С.М. Текстильное материаловедение / С.М. Кирюхин, Ю.С. Шустов. – М.: КолосС, 2011. – 360 с.
2. Еремкин, А.И. Moisture Adsorption with Capillary-Porous Textile Materials in Air Conditioning Systems. Адсорбция влаги капиллярно-пористыми текстильными материалами в системах кондиционирования воздуха / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, В.В. Салмин, О.В. Тараканов, А.И. Шеин // Международный журнал прикладных технических исследований, Исследовательские (диссертационные) публикации Индии. – 2016. – Т. 11, №15. – С. 11662–11667.

3. Еремкин, А.И. Технологическое кондиционирование способом вытесняющей вентиляции текстильных предприятий / А.И. Еремкин., И.Н. Фильчакина – Пенза: ПГУАС, 2019. – 220 с.

4. Еремкин, А.И. Исследование процессов увлажнения кондиционированным воздухом текстильных полуфабрикатов на основе математического моделирования / А.И. Еремкин, С.В. Баканова // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1 (38).

5. Патент РФ № 2128253. Устройство локальной раздачи воздуха / А.И. Еремкин, О.А. Базорова; заявитель и патентообладатель Пензенский архит.-строит. ин-т 96123359//2; заявл. 10.12.96; Опубл. 20.08.2002. Бюл. № 9.

References

1. Kiryukhin, S.M. Textile materials science / S.M. Kiryukhin, Yu.S. Shustov. – M.: Colossus, 2011. – 360 p.

2. Eremkin, A.I. Moisture Adsorption with Capillary-Porous Textile Materials in Air Conditioning Sustems / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, V.V. Salmin, O.V. Tarakanov, A.I. Shein // International Journal of Applied Technical Research, Research (dissertation) publications of India. – 2016. – Vol. 11, No 15. – P. 11662–11667.

3. Eremkin, A.I. Technological conditioning by displacing ventilation of textile enterprises / A.I. Eremkin., I.N. Filchakina – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2019. – 220 p.

4. Eremkin, A.I. Study of air conditioning moistening processes in textile semi-finished products based on mathematical modeling / A.I. Eremkin, S.V. Bakanova // Regional architecture and engineering. – 2019. – No 1 (38).

5. Patent of the Russian Federation No. 2128253. Air distributor / A.I. Eremkin, O.A. Bazorova; Published on 20.08.2002. Newsletter № 9.

УДК 628.33; 615.9

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Перельгин Юрий Петрович,

доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Химия»
E-mail: pyp@pnzgu.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Гришин Борис Михайлович,

доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: bgrishin@rambler.ru

Титов Евгений Александрович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

Россия, 410054, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77,
тел.: (8452) 99-88-11; факс: (8452) 99-88-10

Осипова Наталия Николаевна,

доктор технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение,
вентиляция, водообеспечение и прикладная
газодинамика»
E-mail: osnat75@mail.ru

Penza State University

Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya, St.,
tel.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Perelygin Yuriy Petrovich,

Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Chemistry»
E-mail: pyp@pnzgu.ru

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Grishin Boris Mikhailovich,

Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Water supply,
sewerage and hydraulic engineering»
E-mail: bgrishin@rambler.ru.

Titov Evgeny Alexandrovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Water supply, sewerage and
hydraulic engineering»

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Russia, 410054, Saratov, 77,
Polytechnicheskaya St.
tel.: (8452) 99-88-11; факс: (8452) 99-88-10

Osipova Natalya Nikolaevna,

Doctor of Science, Associate Professor,
Head of Department «Heat and Gas Supply,
Ventilation, Water Supply and Applied
Hydroaerodynamics»
E-mail: osnat75@mail.ru

РЕАГЕНТНАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ДРОЖЖЕВОГО ЗАВОДА ОТ ФОСФАТ-ИОНОВ И ИОНОВ АММОНИЯ

Ю.П. Перельгин, Б.М. Гришин, Е.А. Титов, Н.Н. Осипова

Приведены данные экспериментальных исследований физико-химической очистки сточных вод дрожжевого завода от ионов аммония и фосфат-ионов с применением минеральных коагулянтов и сульфата магния. Показано, что обработка стоков раствором сульфата магния с предварительным их подщелачиванием до $\text{pH}=9\ldots 10$ позволяет снизить остаточные концентрации ионов NH_4^+ и PO_4^{3-} до нормативных показателей, требуемых при сбросе сточных вод в систему водоотведения г. Пензы. Предлагаемый способ позволяет существенно (в 4-5 раз) снизить дозы реагентов по сравнению с применением алюмо- и железосодержащих коагулянтов и получить осадок, содержащий магнийаммонийфосфат, который может быть использован в качестве удобрения.

Ключевые слова: сточные воды дрожжевого завода, ионы аммония, фосфат-ионы, физико-химическая очистка, коагулянты, сульфат магния, магнийаммонийфосфат

REAGENT CLEANING OF WASTEWATER OF YEAST FACTORY FROM PHOSPHATE IONS AND AMMONIUM IONS

Yu.P. Pereygin, B.M. Grishin, E.A. Titov, N.N. Osipova

The experimental data of the physical and chemical treatment of a yeast plant wastewater from ammonium ions and phosphate ions using mineral coagulants and magnesium sulfate are presented. It is shown that the treatment of wastewater with a solution of magnesium sulfate with their preliminary alkalization to $\text{pH} = 9\ldots 10$ reduces the residual concentrations of NH_4^+ and PO_4^{3-} ions to the standard values required when discharging wastewater into the wastewater system in Penza. The proposed method allows significantly (4-5 times) reduce the dose of reagents compared with the use of aluminum- and iron-containing coagulants and to obtain a precipitate containing magnesium ammonium phosphate, which can be used as a fertilizer.

Keywords: yeast plant wastewater, ammonium ions, phosphate ions, physical and chemical treatment, coagulants, magnesium sulfate, magnesium ammonium phosphate.

В дрожжевом производстве основным видом сырья является меласса – отход сахарного производства или зерно-картофельная барда (остаток после отгонки спирта из бражки).

В мелассе содержится 75-82 % сухих веществ. Главной составной частью сухих веществ мелассы является сахароза, содержание которой примерно 46-52 % по массе мелассы [1].

Дрожжевое производство характеризуется большим расходом воды. Вода используется для разбавления мелассы, для промывания дрожжей после их отделения от питательной среды, для мойки аппаратуры, регулирования температуры в дрожжерастильных аппаратах.

Сточные воды дрожжевых заводов содержат достаточно высокие концентрации органических и неорганических веществ (до 10 г/л) [2], а именно дрожжевые клетки, белки, углеводы, остатки масел, хлориды 30 – 248 мг/л, фосфаты до 588 мг/л, калий 190 – 2090 мг/л, азот аммонийный 57 – 485 мг/л, pH 4,0–6,5. БПК_{полн} данного стока составляет 1500 – 5000 мг/л. Общее количество загрязнений в производственных сточных водах – 405 кг на 1 т продукции.

Классическая схема очистных сооружений дрожжевого завода при выпуске сточной воды в водоем состоит из усреднителя, решетки, песколовки, преаэратора, первичного отстойника, аэротенка первой ступени, вторичного отстойника, аэротенка второй ступени, третичного отстойника, биологических прудов, цеха обеззараживания, контактных резервуаров. Вода после такой очистки может быть использована повторно на производстве. Обеззараживание сточных вод осуществляется хлорированием (жидким хлором или хлорной известью), озонированием, ультразвуком или ультрафиолетовыми лучами.

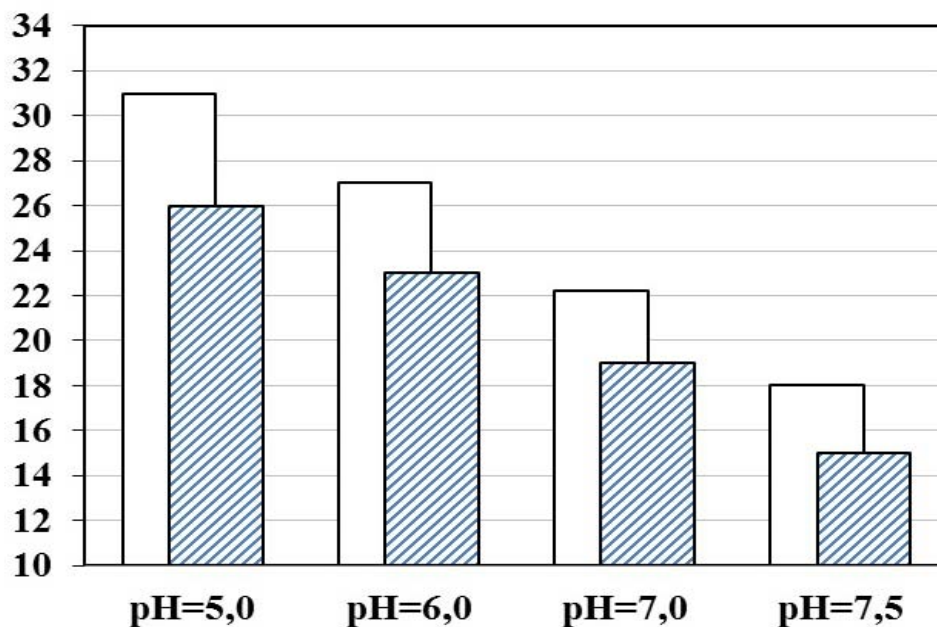
Указанная схема очистки сточных вод дрожжевого завода требует больших площадей, поэтому для локальной очистки данных стоков могут быть рекомендованы физико-химические методы.

Наиболее распространенным методом физико-химической очистки сточных вод является их коагуляционная обработка с последующим отстаиванием. В качестве коагулянтов обычно применяются минеральные реагенты на основе алюминия и железа. Эффективность коагуляционной обработки стоков дрожжевого завода исследовалась в лабораторных условиях с применением полиоксихлорида алюминия (ПОХА) $\text{Al}(\text{OH})_5\text{Cl}$ и хлорида железа FeCl_3 .

Сточные воды дрожжевого завода, имеющие $\text{pH}=4,5$, содержащие ионы NH_4^+ с концентрацией 100 мг/л и фосфат-ионы с концентрацией 570 мг/л, обрабатывались коагулянтами при времени перемешивания 2 мин с помощью циркуляционного насоса и вихревого смесительного устройства [3, 4] и далее отстаивались в стеклянных цилиндрах-отстойниках в течение 2 часов. Для предварительного подщелачивания стоков использовался раствор гидроксида натрия NaOH концентрацией 8 %. В процессе экспериментов pH исходного стока изменялся в пределах от 5,0 до 7,5 при исполь-

зовании ПОХА и от 5,0 до 10,5 при использовании хлорного железа. Дозы ПОХА и FeCl_3 составляли 1,5 и 3 г/л. Диаграммы остаточных концентраций NH_4^+ и PO_4^{3-} в сточной воде дрожжевого завода после обработки коагулянтами при различных pH и последующем отстаивании приведены на рис. 1 и 2.

а

 NH_4^+ , мг/л

б

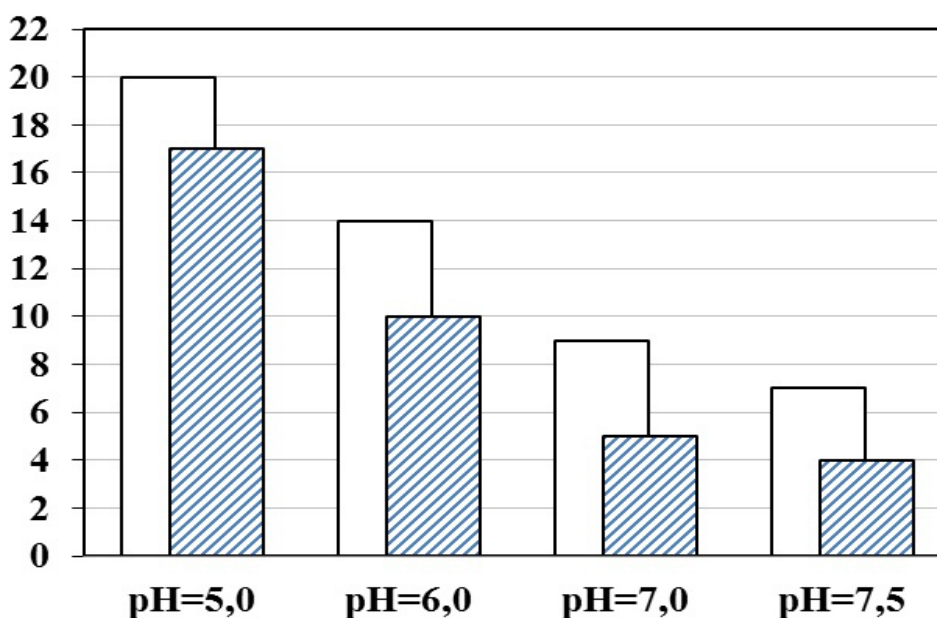
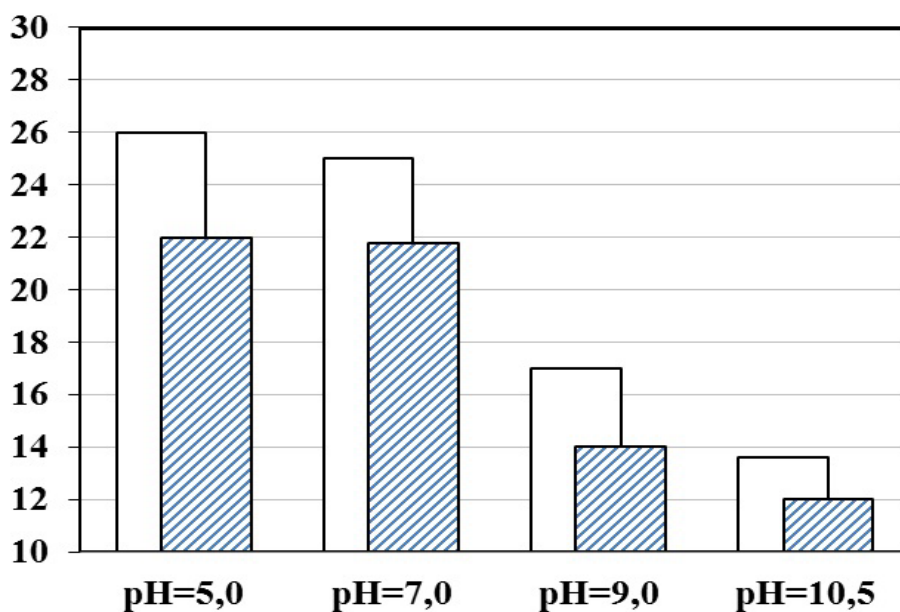
 PO_4^{3-} , мг/л

Рис. 1. Диаграмма остаточных концентраций ионов NH_4^+ (а) и PO_4^{3-} (б) в сточной воде после отстаивания при её обработке коагулянтом ПОХА с дозами D_k :
 – 1,5 г/л; – 3 г/л

а

 NH_4^+ , мг/л

б

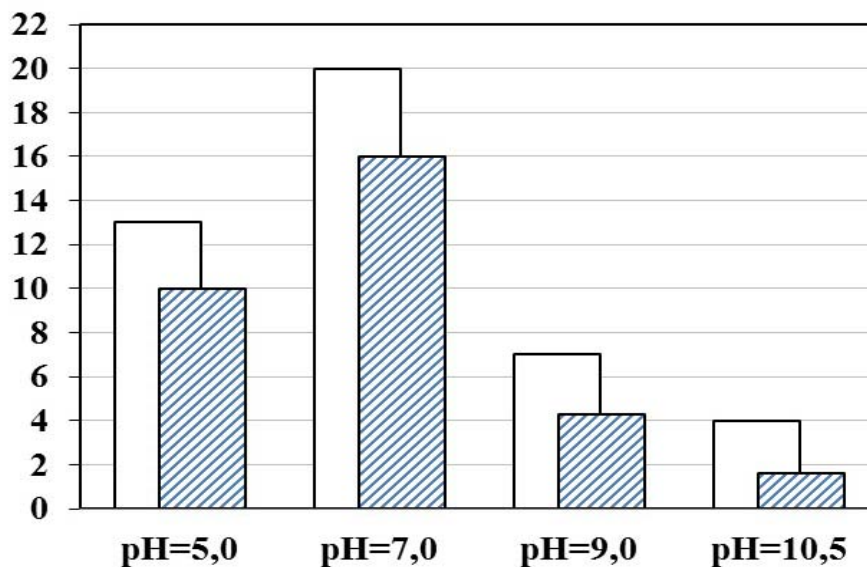
 PO_4^{3-} , мг/л

Рис. 2. Диаграмма остаточных концентраций ионов NH_4^+ (а) и PO_4^{3-} (б) в сточной воде после отстаивания при её обработке хлорным железом с дозами D_k :

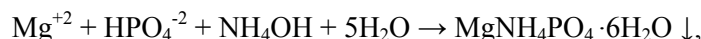
□ – 1,5 г/л; ▨ – 3 г/л

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что при повышении pH эффективность удаления ионов аммония и фосфат-ионов увеличивается, однако даже при дозах 3,0 г/л не удалось снизить концентрации фосфат-ионов до норм ПДК, требуемых при сбросе сточных вод в централизованную систему водоотведения г. Пензы (0,3 мг/л по фосфору). Снижения остаточных концентраций ионов NH_4^+ до норм ПДК (12,5 мг/л) удалось достичь только при использовании хлорного железа при дозах 3,0 г/л и pH 10,5. Для уменьшения остаточных концентраций аммонийных и фосфатных ионов до норм ПДК потребуются значительные расходы реагентов, и, кроме того, при очистке стоков коагулянтами будет образовываться большое количество осадка, который нужно будет размещать на специализированных полигонах.

При проектировании новых и реконструкции действующих предприятий необходимо ориентироваться на ресурсосберегающие технологии утилизации растворов и очистки сточных вод. Представляется также достаточно интересной возможность получения из сточных вод ценных компонентов, которые могут быть использованы в других производствах или в качестве конечного продукта.

Ранее нами был разработан реагентный способ утилизации отработанных аммиачных растворов [5], который может быть применен для очистки сточных вод или отработанных высококонцентрированных растворов дрожжевого производства от ионов аммония и фосфат-ионов.

Отделение фосфат-ионов и ионов аммония из сточных вод дрожжевого производства проводится следующим образом. В сточную воду вводят сульфат магния, что приводит к образованию магнийаммонийфосфата по реакции



произведение растворимости которого равно $7,08 \cdot 10^{-14}$ [6].

Как показывают расчеты, наиболее полно азот аммонийный и фосфат-ионы удаляются из сточной воды при соотношении концентраций $[\text{NH}_4] : [\text{Mg}^{2+}] : [\text{PO}_4^{3-}]$, равных 1: 1,4 : 5,6, и при pH, равном 8,5...10. В целях проверки теоретических расчетов были проведены эксперименты по удалению фосфатов и аммонийного азота в лабораторных условиях.

Состав сточных вод дрожжевых заводов в лабораторных испытаниях с сульфатом магния был аналогичен составу стоков в экспериментах с ПОХА и хлорным железом. Доза MgSO_4 была постоянной и составляла 700 мг/л, pH стока изменялась от 7 до 10 за счёт введения в обрабатываемый сток раствора едкого натра. После двухчасового отстаивания обработанного сульфатом магния и гидроокисью натрия стока из верхней части цилиндров-отстойников отбиралась осветленная фракция и анализировалась на содержание ионов NH_4^+ и PO_4^{3-} . Диаграммы остаточных содержаний аммонийных ионов и фосфат-ионов в отстаиванных пробах приведены на рис. 3.

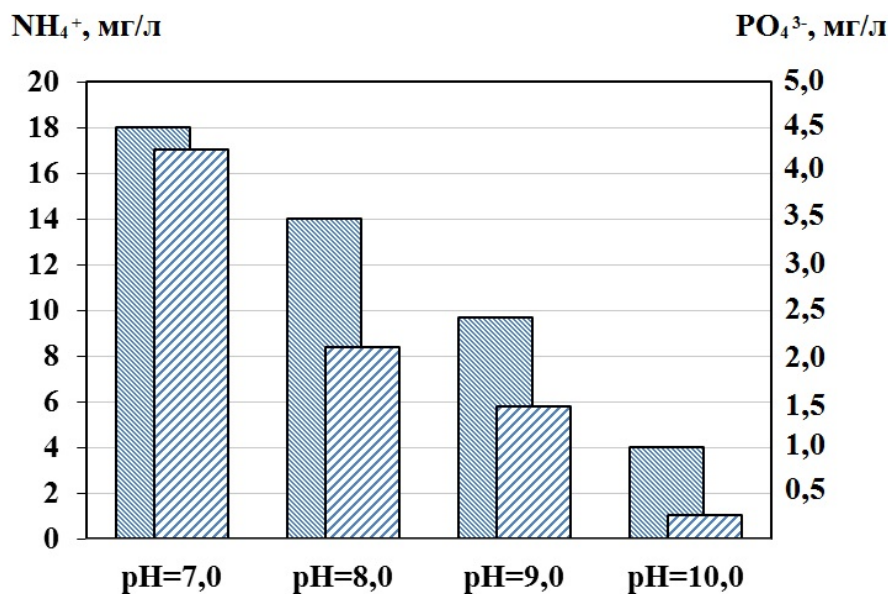


Рис. 3. Диаграмма остаточных концентраций ионов NH_4^+ и PO_4^{3-} в стоках дрожжевого завода после отстаивания при обработке раствором MgSO_4 с дозой 700 мг/л:

■ – NH_4^+ ; ▨ – PO_4^{3-}

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что обработка стока дрожжевого завода сульфатом магния позволяет снизить остаточные концентрации ионов NH_4^+ (при $\text{pH} \geq 9$) и фосфат-ионов PO_4^{3-} (при $\text{pH} = 10$) до норм ПДК, предъявляе-

мых при сбросе сточных вод в городскую канализацию, при существенном уменьшении доз реагента по сравнению с использованием алюмо- и железосодержащих коагулянтов.

Образовавшийся осадок магнийаммонийфосфата после высушивания может быть использован в качестве минерального удобрения.

Выводы

1. Физико-химическая очистка сточных вод дрожжевого завода с использованием наиболее распространённых коагулянтов – полиоксихлорида алюминия и хлорного железа – даже при очень высоких (до 3 г/л) дозах реагентов с подщелачиванием не обеспечивает снижения концентраций ионов аммония и фосфатов в отстаивных пробах до норм ПДК, требуемых при сбросе сточных вод в систему водоотведения г. Пензы.

2. Обработка стоков, поступающих с дрожжевого завода, раствором сульфата магния с предварительным подщелачиванием до pH=9...10 позволяет при дозах MgSO_4 700 мг/л снизить остаточные концентрации ионов NH_4^+ после отстаивания до 9,7 мг/л и фосфат-ионов – до 0,25 мг/л, что обеспечивает требуемые условия для сброса сточных вод в городскую канализацию с локальных очистных сооружений. Образующийся осадок магнийаммонийфосфата после высушивания может быть использован в качестве минерального удобрения.

Список литературы

1. Клунова, С.М. Биотехнология/ С.М. Клунова, Т.А. Егорова, Е.А. Живухина. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 256 с.
2. Нечаев, А.П. Технология пищевых производств / А.П. Нечаев, И.С. Шуб, О.М. Аношина [и др.]; под ред. А.П. Нечаева. – М.: КолосС, 2005. – 768 с.
3. Гришин, Б.М. Применение вихревых смесительных устройств в технологиях механической и физико-химической очистки сточных вод / Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, Н.Н. Ласков, Н.Г. Вилкова, Ю.П. Перельгин // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №2 (27). – С. 112–117.
4. Гришин, Б.М. Использование вихревых смесительных устройств в технологиях очистки сточных вод / Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, Р.В. Вельдин // Современный научный вестник. – 2013. – Т. 9, №1. – С. 119–122.
5. Перельгин, Ю.П. Способ утилизации отработанного медно-аммиачного раствора: пат. на изобретение №2622072. Оpubл.: 09.06.2017. Бюл. №16 / Перельгин Ю.П. Киреев С.Ю., Зуева Т.В., Зорькина О.В.
6. Константы неорганических веществ: справ. / Р.А. Лидин, Л.Л. Андреева, В.А. Молочко; под ред. Р.А. Лидина. – М.: Дрофа, 2006. – 685 с.

References

1. Klenova, S.M. Biotechnology/ M.S. Klanova, T.A. Egorova, E.A. Sivukhina. –M.: Publishing center "Academy", 2010. – 256 p.
2. Nechaev, A.P. Technology of food production / A.P. Nechaev, I.S. Shub, O.M. anoshina [et al.]; ed. A.P. Nechaev. – M.: Colossus, 2005. – 768 p.
3. Grishin, B.M. Application of eddy mixing devices in technologies for mechanical and physical-chemical wastewater treatment / B.M. Grishin, M.V. Bikunova, N.N. Laskov, N.G. Vilkova, Y.P. Perelygin // Regional architecture and engineering. – 2016. – №2 (27). – P. 112–117.
4. Grishin, B.M. The use of vortex mixing devices in wastewater treatment / B.M. Grishin, M.V. Bikunova, R.V. Welden // Modern scientific Bulletin. – 2013. – Vol. 9, №1. – P. 119-122.
5. Perelygin, Yu.P. Method of utilization of used copper-ammonia solution: Patent for invention №2622072. Published: 09.06.2017. Bul. No. 16. / Yu.P. Perelygin, S.Yu. Kireev, T.V. Zueva, O.V. Zorkina //
6. Constants of inorganic substances: Handbook / R.A. Lidin, L.L. Andreeva, V.A. Molochko; by ed. R.A. Lidina. – M.: Drofa, 2006. – 685 p.

УДК 699.86:692.2

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Королева Тамара Ивановна,
кандидат экономических наук,
профессор кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: korolevatamara@gmail.ru

Аржаева Наталья Владимировна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
summer981@yandex.ru

Мельников Илья Евгеньевич,
студент
E-mail: farvater335@gmail.com

Ивашенко Никита Юрьевич,
аспирант
E-mail: dnib@mail.com

*Penza State University of Architecture
and Construction*
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Koroleva Tamara Ivanovna,
Candidate of Economic Sciences,
Professor of the department «Heat, gas supply
and ventilation»
E-mail: korolevatamara@gmail.ru

Arzhaeva Natalia Vladimirovna,
Candidate of Sciences,
Associate Professor of the department «Heat,
gas supply and ventilation»
E-mail: summer981@yandex.ru

Melnikov Ilya Evgenievich,
Student
E-mail: farvater335@gmail.com

Ivaschenko Nikita Yuryevich,
Postgraduate student
E-mail: dnib@mail.com

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ВОЗДУШНОЙ ПРОСЛОЙКИ ДЛЯ НЕОДНОРОДНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Т.И. Королева, Н.В. Аржаева, И.Е. Мельников, Н.Ю. Ивашенко

Приведен метод расчета температурного поля неоднородной ограждающей конструкции с уточнением сопротивления теплопередаче воздушной прослойки. Действующие значения сопротивления теплопередаче воздушной прослойки в существующих нормативных документах являются усредненными, так как теплопередача излучением и конвекцией напрямую зависит от температур противоположных стенок воздушной прослойки.

Предложена оценка эффективности уточнения значения сопротивления теплопередаче воздушной прослойки в неоднородной ограждающей конструкции стены облегченной кирпичной кладки при расчете температурного поля.

Ключевые слова: неоднородная ограждающая конструкция, стена облегченной кирпичной кладки, воздушная прослойка, сопротивление теплопередаче, метод расчета температурных полей, теплоизоляционный слой

DETERMINATION OF AIR LAYER RESISTANCE TO HEAT TRANSFER FOR INHOMOGENEOUS PROTECTION STRUCTURE

T.I. Koroleva, N.V. Arzhaeva, I.E. Melnikov, N.Y. Ivaschenko

Given the method of calculation of the temperature field of a non-uniform building envelope with the specification of the heat transfer resistance of the air gap is given. The existing values of the heat transfer resistance of the air gap, in the current regulatory documents, are averaged, since the heat transfer by radiation and convection directly depends on the temperatures of the opposite walls of the air gap.

An assessment is proposed of the effectiveness of refining the value of the heat transfer resistance of the air gap in the non-uniform enclosing structure of a lightweight brick wall when calculating the temperature field.

Keywords: non-uniform enclosing structure, lightweight brick wall, air gap, heat transfer resistance, method for calculating of temperature fields, thermal insulation layer

Огромное количество материалов разных видов и марок в настоящее время является доступным, что приводит к большому разнообразию ограждающих конструкций зданий.

В ограждающих конструкциях нередко встречаются воздушные прослойки, возникающие или по технологическим причинам, или как дополнительный теплоизолирующий слой. В отличие от твердых или сыпучих материалов, в воздушных прослойках теплопередача производится не только теплопроводностью, но также излучением и конвекцией.

В действующем на данное время СП [1] имеются приведенные значения сопротивления теплопередаче воздушной прослойки. Однако эти величины являются усредненными, так как теплопередача излучением и конвекцией напрямую зависит от температур противоположных стенок воздушной прослойки.

В статье рассматриваются расчет температурного поля неоднородной ограждающей конструкции с уточнением сопротивления теплопередаче воздушной прослойки и оценка эффективности данного уточнения.

В качестве иллюстрации приводится расчет стены облегченной кирпичной кладки «тип А» (согласно «Пособию по проектированию каменных и армокаменных конструкций» к СНиП II-22-81).

Кирпичная кладка выполняется из обыкновенного глиняного кирпича на цементно-песчаном растворе, в качестве минеральной засыпки принят щебень из вспученного перлита. Характеристики материалов соответствуют СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» и СТО 00044807-001-2006 «Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий».

Параметры наружного воздуха приняты по СП 131.13330.2012 «Строительная климатология» для города Пензы (условия эксплуатации – А; $t_{\text{вн}}^{0,92} = -27^\circ\text{C}$; $\varphi_{\text{н}} = 83\%$).

Параметры внутреннего воздуха принимаем равными: $t_{\text{в}} = 18^\circ\text{C}$; $\varphi_{\text{в}} = 60\%$.

Общий вид конструкции стены приведен на рис. 1.

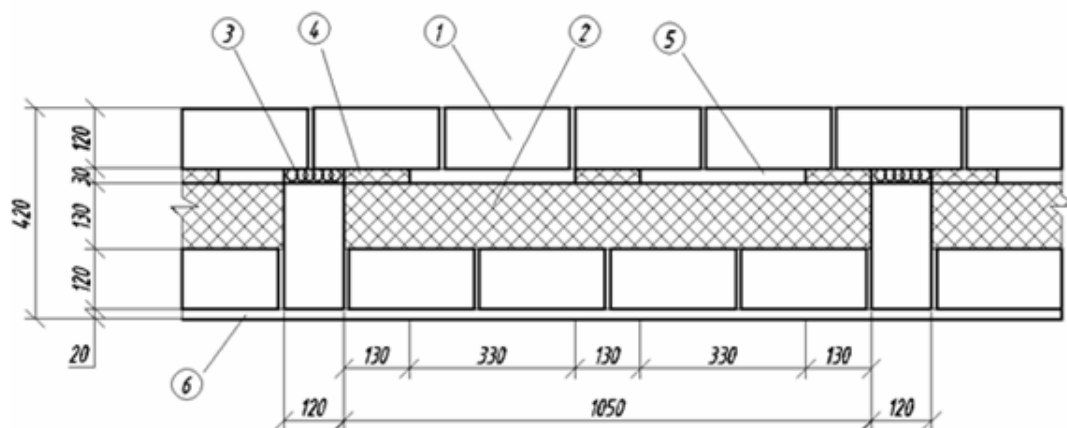


Рис. 1. Поперечное сечение конструкции стены облегченной кирпичной кладки:
1 – кирпич; 2 – плитный утеплитель; 3 – монтажная пена; 4 – полосы плитного утеплителя;
5 – воздушная прослойка; 6 – внутренняя штукатурка

Для уменьшения влияния «мостиков холода» в перемычках имеются воздушные прослойки, расположенные в шахматном порядке. Для увеличения теплотехнических качеств конструкции данные полости заделаны монтажной пеной.

Ограждающая конструкция состоит из:

- 1) кирпичной кладки из сплошного обыкновенного глиняного кирпича; $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,7 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$; $\mu = 0,11 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$;
- 2) базальтовой ваты «ТехноНИКОЛЬ» Техновент Н ПРОФ; $\rho = 45 (\pm 5) \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,04 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$; $\mu = 0,3 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$;
- 3) монтажной пены PENOSIL GoldGun 65; $\rho = 20\text{-}25 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,034 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$; $\mu = 0,05 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$;
- 4) известково-песчаного раствора; $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,7 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$; $\mu = 0,12 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$;
- 5) воздушной прослойки; $\delta = 0,03 \text{ м}$; $R_{\text{вп}} = 0,16 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С/Вт}$; $\mu = 0,135 \text{ г/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{мм рт.ст.)} = 1,01 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$.

Сопrotивление теплопередаче воздушной прослойки, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С/Вт}$, определяем как:

$$R_{\text{вп}} = \frac{\delta_{\text{вп}}}{\lambda_{\text{экв}}}, \quad (1)$$

где $\delta_{\text{вп}}$ – толщина воздушной прослойки, м; $\lambda_{\text{экв}}$ – эквивалентный коэффициент теплопередачи, $\text{Вт/(м}^\circ\text{С)}$,

$$\lambda_{\text{экв}} = \lambda_1 + \lambda_2 + \alpha_{\text{л}} \delta_{\text{вп}}; \quad (2)$$

здесь λ_1 – коэффициент теплопроводности неподвижного воздуха, $\text{Вт/(м}^\circ\text{С)}$; λ_2 – условный коэффициент, называемый коэффициентом передачи тепла конвекцией, $\text{Вт/(м}^\circ\text{С)}$; $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением, $\text{Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{С)}$.

Значения величины $\lambda_1 + \lambda_2$ найдены по таблице в зависимости от толщины воздушной прослойки и разницы температур на ее поверхностях. Прежде всего необходимо определить средние температуры поверхностей воздушной прослойки.

По таблице [1] находим значения $\lambda_1 + \lambda_2$ в зависимости от толщины воздушной прослойки и средних значений температур ее поверхностей.

Коэффициент теплоотдачи излучением вычисляем по формуле

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_o}} \cdot \frac{\left(\frac{\tau_1 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{\tau_2 + 273}{100}\right)^4}{\tau_1 - \tau_2}, \quad (3)$$

где τ_1 и τ_2 – температуры поверхностей, $^\circ\text{С}$; C_1 и C_2 – коэффициенты излучения поверхностей, $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$; C_o – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный $4,96 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Теплоотдача излучением происходит в данном случае между поверхностями базальтовой ваты и кирпичной кладки. Кирпичная кладка имеет степень черноты $\varepsilon_2 = 0,93$. Степень черноты базальтовой ваты принимаем равной $\varepsilon_1 = 0,825$ по рекомендации из [1].

Находим коэффициенты излучения поверхностей:

$$C_1 = \varepsilon_1 \cdot C_o = 0,825 \cdot 4,96 = 4,092 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4),$$

$$C_2 = \varepsilon_2 \cdot C_o = 0,93 \cdot 4,96 = 4,61 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Расчет воздушной прослойки производим методом последовательного приближения. Для первого приближения определим значения температур в толще конструкции методом температурных полей. Для расчета плоского температурного поля используем методику К.Ф. Фокина. Выбираем участок стены от перемычки до перемычки, выделяем в нем зону между двумя поперечными осями симметрии и разбиваем ее сеткой координат на узлы. Далее определяем температуру каждого узла в зависимости от 4-х смежных с ним.

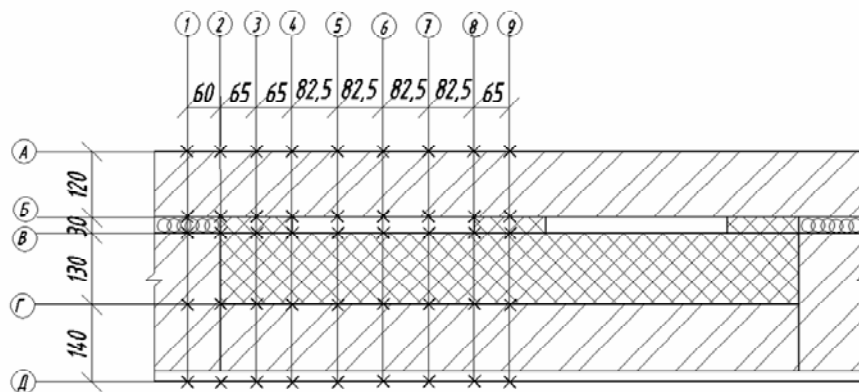


Рис. 2. Схема разбивки на узлы

Предполагается:

- так как коэффициенты теплопроводности кирпичной кладки и известково-песчаного раствора равны, при расчете для удобства считаем их как один материал;
- для первого приближения находим эквивалентный коэффициент теплопередачи воздушной прослойки и в расчетах используем его:

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\delta_{\text{вп}}}{R_{\text{вп}}} = \frac{0,03}{0,16} = 0,1875 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}; \quad (4)$$

- теплопередачей в воздушной прослойке по направлению продольной оси стены пренебрегаем в виду ее малого влияния на процесс теплопередачи в ограждающей конструкции в целом.

Результат расчета приведен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Температуры в узлах (1-е приближение), °C

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
А	-25,98	-26,02	-26,09	-26,23	-26,32	-26,38	-26,40	-26,43	-26,49
Б	-21,88	-22,03	-22,89	-23,26	-23,90	-24,17	-24,20	-24,09	-24,32
В	2,95	1,95	-12,34	-18,97	-21,87	-22,26	-22,18	-20,21	-18,39
Г	12,31	12,89	14,36	15,18	15,63	15,92	16,06	16,20	16,24
Д	17,43	17,53	17,88	18,14	18,37	18,48	18,55	18,58	18,59

Как видно из табл. 1, после первого приближения получены температуры на поверхности воздушной прослойки (рис. 3).

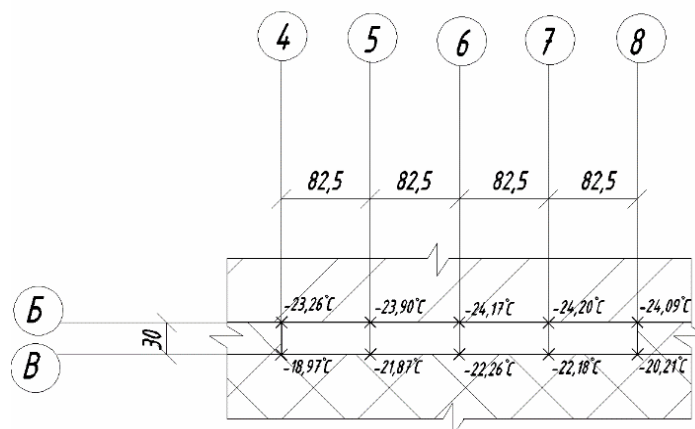


Рис.3. Распределение температур на поверхностях воздушной прослойки (1-е приближение)

Величины τ_1 , τ_2 , $\alpha_{\text{л}}$, $R_{\text{вп}}$, рассчитанные с использованием приведенной методики при данных условиях, имеют следующие значения:

$$\tau_1 = -21,47^\circ\text{C};$$

$$\tau_2 = -23,99^\circ\text{C};$$

$$\tau_1 - \tau_2 = 2,52^\circ\text{C} \approx 2,5^\circ\text{C};$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 0,036 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C});$$

$$\alpha_{\text{л}} = 0,946 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C});$$

$$\lambda_{\text{экв}} = 0,064 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C});$$

$$R_{\text{вп}} = 0,469 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

Для второго приближения принимаем эквивалентный коэффициент теплопередачи воздушной прослойки из расчета воздушной прослойки:

$$\lambda_{\text{экв}} = 0,064 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C}).$$

Повторяем расчет температурного поля. Итоги второго приближения также заносим в таблицу.

Т а б л и ц а 2

Температуры в узлах (2-е приближение), $^\circ\text{C}$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
А	-26,00	-26,02	-26,13	-26,30	-26,39	-26,44	-26,47	-26,51	-26,57
Б	-21,89	-22,13	-23,03	-23,72	-24,19	-24,44	-24,52	-24,59	-24,63
В	2,89	2,07	-11,93	-16,76	-18,94	-19,33	-19,31	-18,38	-17,69
Г	12,39	12,84	14,44	15,21	15,76	16,01	16,18	16,25	16,31
Д	17,41	17,56	17,87	18,17	18,38	18,51	18,57	18,60	18,59

В связи с тем, что температуры на поверхности воздушной прослойки изменились, для уточнения значения сопротивления теплопередаче воздушной прослойки необходимо повторить расчет $\lambda_{\text{экв}}$, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$:

$$\tau_1 = -18,79^\circ\text{C};$$

$$\tau_2 = -24,33^\circ\text{C};$$

$$\tau_1 - \tau_2 = 5,54^\circ\text{C} \approx 5^\circ\text{C};$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 0,043 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C});$$

$$\alpha_{\text{л}} = 0,962 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C});$$

$$\lambda_{\text{экв}} = 0,072 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C});$$

$$R_{\text{вп}} = 0,417 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

Определим невязку относительно предыдущего значения $\lambda_{\text{экв}}$, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$:

$$\frac{0,469 - 0,417}{0,469} \cdot 100 \% = 11,1 \%.$$

В связи с большой невязкой ($11,1 \% > 5 \%$), продолжаем расчет до получения приемлемой невязки.

Т а б л и ц а 3

Температуры в узлах (3-е приближение), $^\circ\text{C}$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
А	-26,00	-26,03	-26,13	-26,29	-26,38	-26,42	-26,46	-26,51	-26,57
Б	-21,92	-22,14	-23,04	-23,67	-24,13	-24,37	-24,46	-24,55	-24,63
В	2,91	2,07	-12,00	-17,14	-19,37	-19,76	-19,75	-18,75	-17,84
Г	12,40	12,87	14,46	15,24	15,79	16,05	16,21	16,29	16,34
Д	17,42	17,57	17,88	18,18	18,40	18,53	18,59	18,62	18,61

Произведем расчет воздушной прослойки повторно с изменившимися температурами:

$$\tau_1 = -19,21^\circ\text{C};$$

$$\tau_2 = -24,27^\circ\text{C};$$

$$\tau_1 - \tau_2 = -5,06^\circ\text{C} \approx 5^\circ\text{C};$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 0,043 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C});$$

$$\alpha_{\text{л}} = 0,959 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C});$$

$$\lambda_{\text{экв}} = 0,072 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C});$$

$$R_{\text{вп}} = 0,417 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

Определим невязку относительно предыдущего значения:

$$\frac{0,417 - 0,417}{0,417} \cdot 100 \% = 0 \ \%.$$

Невязка крайне незначительна, поэтому расчет окончен.

За истинное сопротивление теплопередаче принимаем значение $R_{\text{вп}} = 0,417 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

За истинные значения температур принимаем значения из табл. 3.

Определение эффективности расчета произведем двумя способами: по температурам в узлах и по разнице сопротивлений теплопередаче конструкций. Сравнить будем 2 варианта: расчет с уточнением сопротивления теплопередаче воздушной прослойки (см. табл. 3) и расчет температурного поля без уточнения сопротивления теплопередаче воздушной прослойки (см. табл. 1).

Для оценки эффективности расчета путем сравнения температур определим абсолютную и относительную невязку двух вариантов.

Т а б л и ц а 4

Абсолютные невязки температур в узлах, $^\circ\text{C}$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
А	0,02	0,01	0,04	0,06	0,06	0,04	0,06	0,08	0,08
Б	0,04	0,11	0,15	0,41	0,23	0,2	0,26	0,46	0,31
В	0,04	0,12	0,34	1,83	2,5	2,5	2,43	1,46	0,55
Г	0,09	0,02	0,1	0,06	0,16	0,13	0,15	0,09	0,1
Д	0,01	0,04	0	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,02

Т а б л и ц а 5

Относительные невязки температур в узлах, $^\circ\text{C}$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
А	0,08	0,04	0,15	0,23	0,23	0,15	0,23	0,30	0,30
Б	0,18	0,50	0,65	1,75	0,96	0,82	1,07	1,89	1,27
В	1,37	5,98	2,79	10,16	12,17	11,94	11,63	7,51	3,04
Г	0,73	0,16	0,69	0,39	1,02	0,81	0,93	0,55	0,61
Д	0,06	0,23	0,00	0,22	0,16	0,27	0,22	0,22	0,11

Как видно из табл. 4 и 5, температуры на поверхностях ограждающей конструкции практически не меняются. Наибольшая невязка температур наблюдается на поверхностях воздушной прослойки.

Для определения сопротивления теплопередаче воспользуемся следующим алгоритмом:

1) Вычисляем величину среднего теплового потока, проходящего через конструкцию ограждения, $\text{Вт}/\text{м}^2$:

$$q_{\text{ср}} = \frac{q_{\text{в}} + q_{\text{н}}}{2}, \quad (5)$$

где $q_{\text{в}}$ – тепловой поток, проходящий через внутреннюю поверхность ограждения, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

$q_{\text{н}}$ – тепловой поток, проходящий через внешнюю поверхность ограждения, $\text{Вт}/\text{м}^2$,

$$q_b = \alpha_b (t_b - \tau_{b\text{ ср}}), \quad (6)$$

где α_b – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°C); t_b – температура внутреннего воздуха, °C; $\tau_{b\text{ ср}}$ – средняя температура внутренней поверхности ограждающей конструкции, °C;

$$q_n = \alpha_n (t_n - \tau_{n\text{ ср}}); \quad (7)$$

здесь α_n – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°C); t_n – температура наружного воздуха, °C; $\tau_{n\text{ ср}}$ – средняя температура наружной поверхности ограждающей конструкции, °C.

2) Находим сопротивление теплопередаче, Вт/(м²·°C), ограждающей конструкции по формуле

$$R_o^{\text{пр}} = \frac{(t_b - t_n)}{q_{\text{ср}}}. \quad (8)$$

Определяем сопротивление теплопередаче по значениям из табл. 1:

$$\tau_{n\text{ ср}} = -26,14 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\tau_{b\text{ ср}} = 17,70 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$q_b = 8,7 (20 - 17,70) = 20,01 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_n = 23 (-26,14 - (-27)) = 19,78 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{\text{ср}} = \frac{20,01 + 19,78}{2} = 19,895 \text{ Вт/м}^2;$$

$$R_o^{\text{пр}} = \frac{(20 - (-27))}{19,895} = 2,36 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}.$$

Определяем сопротивление теплопередаче по значениям из табл. 3:

$$\tau_{n\text{ ср}} = -26,19 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\tau_{b\text{ ср}} = 17,67 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$q_b = 8,7 (20 - 17,67) = 20,27 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_n = 23 (-26,19 - (-27)) = 18,63 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{\text{ср}} = \frac{20,27 + 18,63}{2} = 19,45 \text{ Вт/м}^2;$$

$$R_o^{\text{пр}} = \frac{(20 - (-27))}{19,45} = 2,42 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}.$$

Сравниваем полученные значения: $q_{\text{ср}}$ (Вт/м²)

$$H_R = \frac{19,895 - 19,45}{19,895} \cdot 100 = 2,3 \text{ } \%$$

Как видим, невязки значений сопротивлений теплопередаче являются незначительными, следовательно, нерационально производить расчет воздушной прослойки с целью уточнения сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции. Однако этой методикой следует воспользоваться, если требуется обеспечить существенное увеличение точности расчета температуры на поверхности воздушной прослойки в составе ограждающей конструкции.

Список литературы

1. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – М., 2012.

2. Королева, Т.И. Исследование влажностного состояния неоднородных конструкций наружных ограждений / Т.И. Королева, Н.В. Аржаева, И.Е. Мельников // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 4 (35). – С. 159–166.

3. Королева, Т.И. Исследование возможности конденсации водяного пара в толще многослойной конструкции наружного ограждения / Т.И. Королева, Н.В. Аржаева // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 2 (35). – С. 152–158.

4. Королева, Т.И. Исследование условий возникновения конденсата в толще ограждений и его влияние на внутренний микроклимат помещений / Т.И. Королева, Г.И. Грейсх, Н.В. Аржаева, Е.Г. Ежов // International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), Paper Code 49434. – Delhi, INDIA, 2016. – Vol. 11, № 21. – P. 10402–10407.

5. Гагарин, В.Г. Теплозащита наружных стен здания с облицовкой из кирпичной кладки / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов, С.И. Крышов, О.И. Пономарев // АВОВ. – 2009. – №9.

6. Корниенко, С.В. Оценка влажностного режима многослойной стеновой конструкции в годовом цикле / С.В. Корниенко, Н.И. Ватин, М.Р. Петриченко, А.С. Горшков // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – №6.

References

1. SP 50.13330.2012. Thermal protection of buildings. Updated revision SNiP 23-02-2003. – M., 2012.

2. Koroleva, T.I. Investigation of the moisture state of heterogeneous structures of external fences / T.I. Koroleva, N.V. Arzhayeva, I.E. Melnikov // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 4 (35). – P. 159–166.

3. Koroleva, T.I. Study of the possibility of condensation of water vapor in the thickness of the multi-layered structure of the outer fence / T.I. Koroleva, N.V. Arzhayeva // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 2 (35). – P. 152–158.

4. Koroleva, T.I. Investigation of conditions for the occurrence of condensate in the thickness of fences and its impact on the indoor indoor climate / T.I. Koroleva, G.I. Gray-sukh, N.V. Arzhayeva, E.G. Yezhov // International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), Paper Code 49434. – Delhi, INDIA, 2016. – Vol. 11, № 21. – P. 10402–10407.

5. Gagarin, V.G. Thermal protection of the exterior walls of the building with brickwork cladding / V.G. Gagarin, V.V. Kozlov, S.I. Kryshov, O.I. Ponomarev // AVOK. – 2009. – №9.

6. Kornienko, S.V. Evaluation of the moisture regime of a multi-layer wall structure in the annual cycle / S.V. Kornienko, N.I., Vatin M.R. Petrichenko, A.S. Gorshkov // Construction of unique buildings and structures. – 2015. – №6.

УДК 658.567.1: 533.1

*Белгородский государственный
технологический университет
им. В.Г. Шухова*

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46,
тел.: (4722) 42-08-19

Ильина Татьяна Николаевна,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: ilina50@rambler.ru

Гольцов Александр Борисович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: abgoltcov@gmail.com

Емельянов Дмитрий Александрович,
кандидат технических наук,
инженер кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: dimon8-8@mail.ru

*Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov*

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St.,
tel.: (4722) 42-08-19

Il'ina Tatyana Nikolaevna,
Doctor of Sciences, Associate Professor,
Professor of the department «Heat, gas supply
and ventilation»
E-mail: ilina50@rambler.ru

Goltsev Aleksandr Borisovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Heat, gas supply and
ventilation»
E-mail: abgoltcov@gmail.com

Emel'anov Dmitry Aleksandrovich,
Candidate of Sciences, engineer
of the department «Heat, gas supply and
ventilation»
E-mail: dimon8-8@mail.ru

АНАЛИЗ АЭРОДИНАМИКИ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ В АСПИРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Т.Н. Ильина, А.Б. Гольцов, Д.А. Емельянов

Представлен анализ материальных потоков технологического комплекса для переработки целлюлозно-бумажных отходов с получением гранулированной продукции. Показана целесообразность предварительной стадии микрогранулирования частиц в пневмомеханическом аппарате. Определены параметры двухфазного потока, и проведен аэродинамический расчет аспирационной системы комплекса до и после модернизации. Установлены аэродинамические характеристики пневмомеханического аппарата.

Ключевые слова: техногенные волокнистые материалы, двухфазные потоки, массовая концентрация, агломерация, потери давления, пневмомеханический аппарат

ANALYSIS OF TWO-PHASE AERODYNAMICS FLOWS IN ASPIRATION SYSTEM OF TECHNOLOGICAL COMPLEX

T.N. Il'ina, A.B. Goltsov, D.A. Emel'anov

The analysis of material flows in a technological complex for pulp-and-paper waste processing and granulated product manufacturing is presented. The feasibility of the preliminary stage of particles micro-granulation in a pneumatic-mechanical apparatus is demonstrated. The parameters of a two-phase flow are determined and aerodynamic calculation of the aspiration system of the complex before and after modernization is carried out. The aerodynamic characteristics of the pneumatic-mechanical apparatus are determined.

Keywords: technogenic fibrous materials, two-phase flows, weight concentration, agglomeration, pressure loss, pneumatic-mechanical apparatus

Введение. Основную массу техногенных волокнистых материалов (ТВМ) составляют целлюлозно-бумажные отходы (ЦБО). Целлюлоза – самый распространенный полимер на земле, который играет важную роль в природном круговороте углерода. Однако ежегодное увеличение отходов целлюлозно-бумажной промышленности и за-

грязнение ими окружающей среды ставят ряд задач по утилизации ЦБО. Целлюлоза – это органическое соединение, состоящее из нерастворимых волокон, которые не расщепляются обычными ферментами желудочно-кишечного тракта млекопитающих. Расщепление целлюлозы в производственных условиях требует колоссальных энергетических затрат [1]. Поэтому процесс утилизации ТВМ с получением тел заданной геометрической формы и последующим их использованием в различных отраслях промышленности является в настоящее время одним из приоритетных направлений [2–6].

Одним из перспективных способов утилизации техногенных волокнистых материалов является производство стабилизирующих добавок для щебеночно-мастичного асфальтобетона. Анализ технологической линии производства экструдированных техногенных материалов, разработанной в БГТУ им. В.Г. Шухова [7], показал необходимость совершенствования комплекса с учетом физико-химических свойств волокнистых материалов.

Основная часть

Волокнистые материалы состоят преимущественно из частиц удлиненной формы – волокон, промежутки между которыми заполнены воздухом у непитанных материалов и синтетическими смолами у пропитанных. Структура волокнистой массы ЦБО представлена растительными волокнами, на внешней поверхности которых находится тонкая оболочка, внутри которой расположена полость (люмен), заполненная протоплазмой, состоящей из, белковых веществ (протеинов и протеидов). В протоплазме различают клеточное ядро (кариоплазма) и внеядерную часть (цитоплазма), включающую митохондрии и хроматофоры.

В клеточной стенке образуется до 50 тонких слоев, называемых ламелями, а внутренняя часть клеток заполнена клеточной стенкой. Многочисленные рентгенографические и электронографические исследования показали что мицеллярные соединения составлены из отдельных группировок макромолекул нитеобразной формы [8].

Одним из способов утилизации целлюлозно-бумажных отходов является производство гранулированных стабилизирующих добавок для щебеночно-мастичного асфальтобетона (ГСД ЩМА), введение которых обеспечивает однородность асфальтобетона и повышает долговечность дорожного покрытия. В БГТУ им. В.Г. Шухова разработан технологический комплекс для получения экструдированных техногенных материалов различного функционального назначения, в том числе и ГСД ЩМА. Исходным сырьем являются отходы бумаги, картона [7].

Технологический комплекс для переработки ЦБО и их гранулирования с минеральными добавками и связующими включает основные технологические операции, а именно двухстадийное измельчение ЦБО с введением в измельченный материал после шредера добавок; осаждение измельченных ЦБО в аспирационной системе; гранулирование композиционной смеси в плоскоматричном грануляторе с последующей сушкой и классификацией готового продукта в барабанно-винтовом сушильном агрегате.

Проведенный анализ материальных потоков показал, что более 20 % материала теряется в циклоне-разгрузителе и классификаторе. Для повышения эффективности работы комплекса и уменьшения потерь материала необходимо провести анализ аспирационных систем и дополнить комплекс устройством для предварительного пневмомеханического гранулирования техногенных материалов, которое позволит повысить степень улавливания материала в циклоне-разгрузителе, а также утилизировать некондиционный материал из классификатора.

Методология исследований. Аспирационная система технологического комплекса включает воздухопровод для пневмотранспорта измельченного в роторной дробилке картона в циклонную установку. Удаляемый из циклона двухфазный поток поступает в рукавный фильтр для улавливания мелких частиц пыли с последующим удалением воздуха в окружающую среду. Для расчета потерь давления в аспирационной системе были определены скорости воздуха на входе в дробилку (v , м/с) при различной ее

производительности (G_t , кг/ч). Для замера скорости использовали анемометра Testo 416, крыльчатку которого помещали в щель перед роторной дробилкой. В зависимости от расхода подаваемого из шредера материала изменялась ширина щели и площадь сечения (F , м²). Зная плотность и расход твердого, рассчитывали массовую концентрацию двухфазного потока ($\mu = G_t/G_b$, кг/кг_в), плотность газодисперсной смеси и скорости двухфазного потока на различных участках аспирационной системы. Результаты замеров и расчетов представлены в таблице, где v_1 , м/с, и v_2 , м/с, – скорости двухфазного потока в трубопроводе системы пневмотранспорта и в цилиндрической части циклонной установки соответственно.

Параметры двухфазного потока технологического комплекса

№ п/п	F , м ²	v , м/с	L_b , м ³ /с	G_b , кг/с	G_{b_1} , кг/ч	G_t , кг/ч	μ , кг/кг	$G_{2ф}$, кг/ч	$\rho_{2ф}$, кг/м ³	$L_{2ф}$, м ³ /с	v_1 , м/с	v_2 , м/с
1	0,0440	5,6	0,246	0,314	1132	0	0	1132	1,28	0,246	20,20	2,54
2	0,0407	4,0	0,163	0,208	748	160	0,21	908	1,54	0,163	13,38	1,68
3	0,0330	3,7	0,122	0,156	561	180	0,32	741	1,68	0,122	10,02	1,26
4	0,0296	3,5	0,104	0,132	476	200	0,42	676	1,81	0,104	8,49	1,07

Результаты определения скорости двухфазного потока в трубопроводе системы пневмотранспорта (v_1 , м/с) и циклоне-разгрузителе (v_2 , м/с), а также массовой концентрации ($\mu = G_t/G_b$, кг/кг_в) показали, что при производительности комплекса 160–200 т/час скорость газодисперсного потока в системе пневмотранспорта до циклона снижается от 13,5 до 8,5 м/с. При этом массовая концентрация твердого в смеси (μ) увеличилась от 0,2 до 0,5 кг/кг_в. Скорость двухфазного потока в циклонной установке составляет 1,1–1,7 м/с.

Объектом исследования являются измельченные частицы картона плотностью 680 кг/м³ и ватмана плотностью 889 кг/м³ с длиной волокон менее 2 мм. Удельная поверхность частиц, определенная на автоматизированном приборе ПСХ-12, составляет для дисперсных частиц, поступающих в циклон, 530–580 м²/кг, для частиц пыли после циклона 840–900 м²/кг. Средний размер частиц, поступающих в циклон, составляет 15–20 мкм, после циклона – 9–11 мкм. Размер некондиционного материала, т.е. просыпи из классификатора, составляет 1–2 мм.

Измельченные частицы имеют волокнистую структуру, что осложняет их осаждение в циклоне-разгрузителе. Эффективность осаждения составляла 72–75 %. При производительности дробилки $G_t = 160–200$ кг/ч потери материала в виде унесенной пыли составляли 45–50 кг/ч.

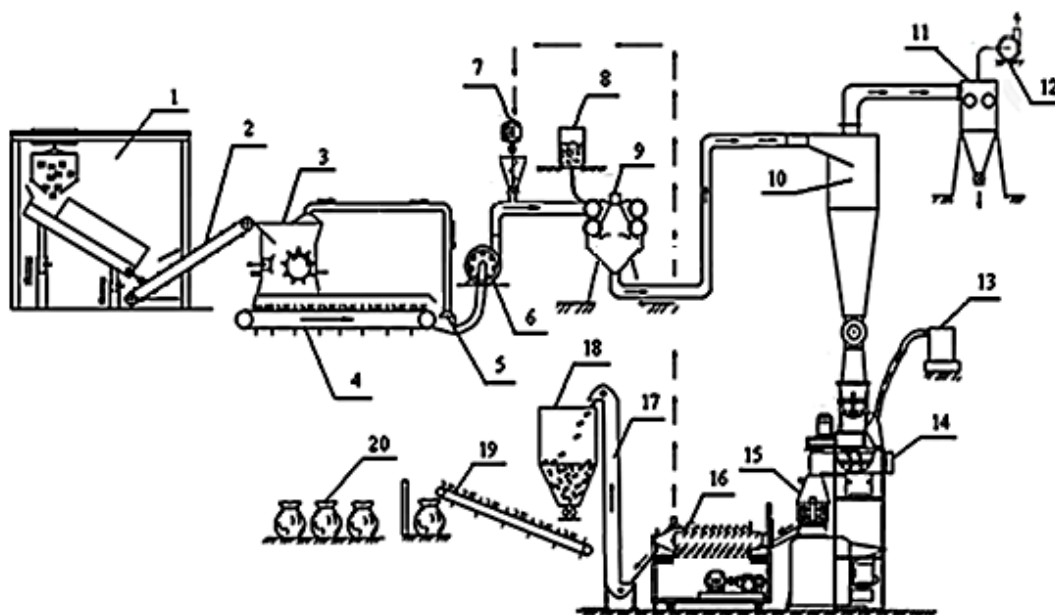
Для увеличения эффективности осаждения «легких» частиц волокнистого материала необходимо увеличить плотность дисперсной фазы, поступающей в циклон, а также скорость их витания, т.е. провести агломерацию частиц. Проведенные нами теоретические исследования [8] показали, что наиболее эффективно проводить агломерацию волокнистых частиц в центробежном поле торообразных камер.

С этой целью был разработан пневмомеханический аппарат [9], проведены его экспериментальные исследования, выбран аэродинамический режим его работы. Установлено, что скорость потока на входе в аппарат должна быть 6–8 м/с, в торообразных камерах 4–6 м/с.

Для получения микрогранул, заданного размера и плотности разработан состав смеси, включающий измельченный картон, некондиционную продукцию и связующий материал. Добавка 10±5 % некондиционной продукции выполняет роль центров гранулообразования в процессе агломерации. В качестве связующей добавки использовали раствор натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы в количестве 1,2±0,2 % к исходному материалу. В процессе агломерации в пневмомеханическом устройстве получены гранулы повышенной плотности ($\rho = 400 \pm 30$ кг/м³) и размеров ($d = 2,0–3,5$ мм).

Установка в технологическую линию комплекса устройства для пневмомеханического гранулирования (см. рисунок, поз. 9) перед циклоном-разгрузителем и

увеличение размеров агломератов, поступающих в циклонную установку, привели к повышению степени их улавливания до 90–92 %, что снизило потери материала в виде пыли до 16–18 кг/ч.



Модернизированный технологический комплекс
для производства гранулированной продукции:

- 1 – устройство подачи материала; 2 – ленточный конвейер; 3 – шредер; 4 – конвейер;
5 – аспирационное укрытие; 6 – роторная дробилка; 7 – шнековый дозатор; 8 – бак со
связующей добавкой; 9 – устройство для пневмомеханического гранулирования; 10 – циклон-
разгрузитель; 11 – рукавный фильтр; 12 – вентилятор; 13 – бак с органическими добавками;
14 – система смесителей; 15 – гранулятор; 16 – классификатор; 17 – нория; 18 – бункер-
запасник; 19 – скребковый конвейер; 20 – упаковка готовой продукции

Произведен аэродинамический расчет аспирационной системы до и после модернизации. Расчет потерь давления двухфазных потоков произведен по разработанной нами методике [11, 12] в зависимости от содержания волокнистых материалов с учетом их удельной поверхности и плотности. Определен коэффициент гидравлического трения двухфазного потока, который составил 0,32, коэффициент местных сопротивлений пневмомеханического устройства ($\xi_{\text{пму}}=88$). Полные потери давления в аспирационной системе составили 7360 Па до модернизации и 9440 Па после установки в технологический комплекс пневмомеханического аппарата ($\Delta P_{\text{пму}}=3900$ Па). Для повышения эффективности работы аспирационной системы был установлен вентилятор ВЦ 5-35 №4 после рукавного фильтра (см. рисунок, поз. 12). Проведенные экономические расчеты показали, что ориентировочный эффект работы модернизированного комплекса составит 541 тыс. руб./год при его производительности 327 т/год готовой продукции.

Вывод. Проведенный анализ аэродинамического режима работы установок технологического комплекса по переработке техногенных материалов показал целесообразность предварительного микрогранулирования измельченных частиц волокнистой структуры в пневмомеханическом аппарате. Это позволило повысить эффективность работы комплекса за счет снижения потерь материала при аспирации, а также за счет утилизации некондиционной продукции в процессе агломерации. Предложен модернизированный технологический комплекс, представлены результаты аэродинамического расчета аспирационной системы до и после модернизации.

1. Никитин, Н.И. Химия древесины и целлюлозы / Н.И. Никитин. – М.: Изд. АН СССР, 1962. – 630 с.
2. Сиваченко, Л.А. Проблемные задачи в области ресурсо- и энергосберегающих технологий / Л.А. Сиваченко, В.С. Севостьянов, Т.Н. Ильина // Энергетические системы: сб. трудов II Междунар. науч.-техн. конф. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. – С. 548–553.
3. Макаренков, Д.А. Особенности выбора гранулирующего оборудования многокомпонентных полидисперсных шихт со вторичными материальными ресурсами на основе системного анализа / Д.А. Макаренков, В.И. Назаров, А.М. Гонопольский, Я.А. Трефилова // Вестник МГОУ. Серия “Естественные науки”. – 2013. – № 1. – С. 49–64.
4. Глаголев, С.Н. Технологические модули для комплексной переработки техногенных материалов / С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, Т.Н. Ильина, В.И. Уральский // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – №9. – С. 43–45.
5. Sevostyanov, M.V. Methodological Principles of Agglomeration Processes Improvement in Technologies of Disperse Materials Processing / M.V. Sevostyanov, T.N. Il'ina, W.S. Sevostyanov, D.A. Emel'yanov // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – Vol. 11. – P. 738–744.
6. Глаголев, С.Н. Ресурсо-энергосберегающие модули для комплексной утилизации техногенных материалов / С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, А.М. Гридчин, В.И. Уральский, М.В. Севостьянов, В.В. Ядыкина // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. – 2013. – № 6. – С. 102–106.
7. Пат. 2567519 Российская Федерация, МПК А23К 1/20. Технологическая линия и способ для экструдирования техногенных волокнистых материалов / С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, А.М. Гридчин, М.В. Севостьянов, П.А. Трубаев, В.И. Уральский, В.И. Филатов, А.В. Кошуков; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2014149776/13, заявл. 09.12.2014; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31. – 10 с.
8. Корда, И. Разлом бумажной массы: пер. с чеш. / И. Корда, З. Либнар, И. Прокоп. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1967. – 421 с.
9. Ильина, Т.Н. О взаимодействии частиц волокнистых материалов в воздушном потоке / Т.Н. Ильина, И.П. Бойчук, Д.А. Емельянов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 6. – С. 116–121.
10. Пат. 2538579 Российская Федерация, МПК В01F13/10. Устройство для пневмомеханического гранулирования техногенных материалов / В.С. Севостьянов, Т.Н. Ильина, М.В. Севостьянов, Д.А. Емельянов, А.В. Кошуков; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2013137715/05, заявл. 12.08.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1. – 7 с.
11. Minko, V.A. Metodological bases for calculation of the aspiration ventilation systems / V.A. Minko, T. N. Il'ina, D.A. Emel'yanov // International Journal of Pharmacy Technology. – 2016. – Vol.8, №.4. – P. 26644–26652.
12. Минко, В.А. К расчету воздухопроводов для двухфазных потоков / В.А. Минко, Т.Н. Ильина, А.В. Минко, Д.А. Емельянов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – Т.22, №4. – С. 648–656.

References

1. Nikitin, N.I. Wood and cellophane chemistry / N.I. Nikitin. – M.: Ed. AN USSR, 1962. – P. 630.
2. Sivachenko, L.A. Problematic tasks in the field of resource-saving technologies / L.A. Sivachenko, V.S. Sevost'yanov, T.N. Il'ina // Energy systems: sb. trudov II International scientific-tehn. conf. – Belgorod: Ed. BGTU, 2017. – P. 548–553.
3. Makarenkov, D.A. Peculiarities of selection of granular equipment of multi-component polydisperse charges with secondary material resources on the basis of system

analysis / D.A. Makarenkov, V.I. Nazarov, A.M. Gonopol'skiy, Ya. A. Trefilova // Bulletin of MGOU. Series "Science". – 2013. – № 1. – P. 49–64.

4. Glagolev, S.N. Technological modules for complex processing of technogenic materials / S.N. Glagolev, V.S. Sevostyanov, T.N. Il'ina, V.I. Ural'skiy // Chemical and oil-and-gas engineering. – 2010. – №9. – P. 43–45.

5. Sevostyanov, M.V. Methodological principles of agglomeration processes improvement in technologies of disperse materials processing / M.V. Sevostyanov, T.N. Il'ina, W.S. Sevostyanov, D.A. Emel'yanov // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – Vol. 11. – P. 738–744.

6. Glagolev, S.N. Resource and energy saving modules for complex utilization of technogenic materials / S.N. Glagolev, V.S. Sevost'yanov, A.M. Gridchin, V.I. Ural'skiy, M.V. Sevostyanov, V.V. Yadykina // Bulletin of BGTU named after V.G. Shukhov. – 2013. – № 6. – P. 102–106.

7. Pat. 2567519 Russian Federation, MPK A23K 1/20. Production line and method for extruding manmade fibrous materials / S.N. Glagolev, V.S. Sevostyanov, A.M. Gridchin, M.V. Sevostyanov, P.A. Trubaev, V.I. Ural'skiy, V.I. Filatov, A.V. Kosh'ukov; заявитель i патентообладатель BGTU named after V.G. Shukhova. – № 2014149776/13, заявл. 09.12.2014; opubl. 10.11.2015, Bul. № 31. – P. 10.

8. Korda, I. Paper pulp fracture: translated from Czeck / I. Korda, Z. Libnar, I. Prokop. – M.: Ed. «Timber industry», 1967. – P. 421.

9. Il'ina, T.N. On the interaction of particles of fibrous materials in the air flow / T.N. Il'ina, I.P. Boychuk, D.A. Emel'yanov // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2016. – № 6. – P. 116–121.

10. Pat. 2538579 Russian Federation, MPK V01F13/10. Device for pneumatic granulation of technogenic materials / V.S. Sevost'yanov, T.N. Il'ina, M.V. Sevost'yanov, D.A. Emel'yanov, A.V. Koshukov; applicant and patentholder BGTU named after V.G. Shukhov. № 2013137715/05, applied 12.08.2013; publ. 10.01.2015, Bul. № 1. – P. 7.

11. Minko, V.A. Metodological bases for calculation of aspiration ventilation systems / V.A. Minko, T.N. Il'ina, D.A. Emel'yanov // International Journal of Pharmacy Technology. – 2016. – Vol.8, №4. – P. 26644–26652.

12. Minko, V.A. For two-phase flow duct calculation / V.A. Minko, T.N. Il'ina, A.V. Minko, D.A. Emel'yanov // Tambov Staty Technical University Bulletin. – 2016. – Vol.8, №4. – P. 648–656.

УДК 728.37

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Васин Леонид Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Информационно-
вычислительные системы»
E-mail: leo@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Vasin Leonid Anatolievich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the department «Information-
computing systems»
E-mail: leo@pguas.ru

ОТКРЫТАЯ ПЛАТФОРМА УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМИ СЕТЯМИ: ОРГАНИЗАЦИЯ ВИДЕОСИСТЕМЫ СМАРТ-ДОМА

Л.А. Васин

Представлен вариант организации системы управления инженерными видеосистемами в смарт-доме. Определены основные функции, выполняемые системой управления, и сформулированы требования, предъявляемые к подобным системам.

Показаны варианты построения системы управления различными видеосистемами, и определены требования к системным платформам, необходимые для обеспечения обработки видеосигналов различного назначения в инженерных системах. Рассмотрено аппаратное и программное обеспечение, используемое в системах управления. Их особенностью является использование при реализации открытых проектов. Выполнен выбор необходимых компонентов для автоматизации инженерных сетей. Показана система управления для видеонаблюдения с потоковым видеосигналом.

Сформулированы принципы управления инженерными сетями, обрабатывающими различные источники видеосигнала в жилых зданиях. Показаны варианты использования системы на основе поведенческих подходов к управляющим алгоритмам.

Ключевые слова: строительство, инженерные системы, умный дом, системы управления, открытая платформа, видеосистема, стандарты, операционная система, видеоустройства, интерфейс управления

OPEN PLATFORM OF ENGINEERING NETWORK MANAGEMENT: SMART HOME VIDEO SYSTEM ORGANIZATION

L.A. Vasin

Presents a variant of the organization of the management system engineering video systems in the smart home. Formulated the main functions performed by the control system and the requirements for such systems.

The options for building a control system for various video systems are shown and the requirements for a system platform necessary to support the processing of video signals for various purposes in engineering systems are defined. Considered hardware and software used in control systems. Their feature is the use in the implementation of open projects. The selection of the necessary components for use in the automation of engineering networks. A control system for video surveillance and a streaming video signal is shown.

The principles of management of engineering networks that process various video signal sources in residential buildings are formulated. The variants of using the system based on behavioral approaches to control algorithms are shown.

Keywords: construction, engineering systems, smart home, control systems, video systems, standards, operating system, video devices, control interface

Введение

Развитие информационных технологий и ориентированность современного общества на использование электронных систем различного назначения для создания комфортного жизненного пространства привели к возникновению так называемых «умных домов», или «смарт-домов», предназначенных для обеспечения безопасности, энергосбережения и комфортных условий проживания. Для этого существуют специализированное информационное обеспечение, позволяющее интегрировать бытовые технические устройства в единое информационное поле с помощью телекоммуникационных систем [1].

Главной задачей интеллектуальных систем управления жилым зданием является обеспечение безопасной и комфортной среды. Для этого используют комплекс технических средств, входящих в общую систему инженерных сетей. Условия нахождения и проживания людей регламентируются строительными и санитарными нормами, а также регламентами безопасности.

Инженерные системы можно разделить на несколько категорий:

- обеспечивающие комфортные условия (теплоснабжение, водоснабжение, канализации, электроснабжение, освещение, вентиляция, газоснабжение);
- создающие безопасную среду (видеонаблюдение, охранные, противопожарные системы);
- предоставляющие развлекательные функции (потокосное видео, TV);
- организующие коммуникационные функции (телекоммуникационные системы доступа).

Главные преимущества использования систем управления в смарт-домах [2]:

- обеспечение энергосбережения;
- эффективное управление бытовыми приборами;
- создание охраняемого жилого пространства;
- управление различными информационными потоками.

Структурная организация смарт-дома состоит из следующих компонент:

- система электропитания;
- система микроклимата;
- охранный система;
- система организации связи (телефонные линии связи, SMS-оповещение, телевидение, Internet);
- подсистема управления освещением;
- подсистема управления отоплением;
- подсистема видеонаблюдения;
- удаленный доступ к устройствам;
- подсистема управления электричеством и приборами;
- подсистема управления вентиляцией и влажностью;
- подсистема информационной безопасности.

При построении систем управления смарт-домом необходимо придерживаться принципа единого центра управления всеми техническими устройствами, которые входят в инженерные сети, а также различными бытовыми пространствами. Важным аспектом является реализация систем с учетом энергосберегающих технологий и перспективного развития. Для этого необходимо использовать открытую архитектуру, способную расширять функциональность путем добавления новых управляющих элементов в процессе создания и обеспечения условий проживания.

Управление всеми подсистемами производится на основе одного или нескольких центров управления. Информационные технологии позволяют создать такие центры на основе открытого программного обеспечения и системных архитектур. В качестве аппаратной платформы могут использоваться различные типы вычислительных устройств, зависящие от необходимой мощности и используемого программного обеспечения.

При построении подсистем охраны и развлечения возникает необходимость управлять потоками видеоданных, поступающих как с камер видеонаблюдения, так и с локальных и удаленных мест хранения развлекательного мультимедийного контента. Для системы охраны жилого помещения процесс управления заключается в обработке видеоданных с камер наблюдения, установленных на охраняемых пространствах. При этом необходимо выделять приоритетные периметры видеонаблюдения. Так, наружное охраняемое пространство жилого здания является более важным, чем внутреннее. При этом обработка видеоданных должна проводиться постоянно, особенно в отсутствие проживающих. Внутренние камеры видеонаблюдения активируются по мере необходимости, например при пустых помещениях [3].

Развлекательный контент состоит из набора мультимедийных файлов, воспроизведение которых производится на пользовательских устройствах. Управление ими заключается в организации доступа к внешним местам их хранения (например облачные хранилища), а также к мультимедийным сервисным службам, таким, как онлайн-кинотеатры и радиостанции, а также аналогичные сервисы интернет-вещания. Доступ производится через каналы связи, организованные с использованием проводных и беспроводных технологий на основе телекоммуникационных протоколов. Для жилых помещений загородного типа обычно используются радиоканалы фиксированной или мобильной связи. Внутри помещения используется беспроводная или проводная локальная сеть. Лучшим вариантом для развертывания смарт-дома является беспроводной вариант сети, так как он требует меньших затрат на развертывание и может быть использован в управлении бытовыми приборами, такими, как светильники, розетки и другие устройства, относящиеся к «интернету вещей».

Локальный мультимедийный контент, относящийся и к развлечению, и к безопасности, может быть сохранен внутри помещения, при условии отсутствия частой смены проживающих. При этом организуется локальное мультимедийное хранилище на основе программного обеспечения с необходимыми сетевыми протоколами доступа, поддерживаемыми пользовательскими устройствами, например телевизорами, планшетными компьютерами и смартфонами. Хранением видеоконтента, поступающего из системы безопасности, занимается специализированное программное обеспечение, задачи которого заключаются в фиксации событий и управлении видеокамерами, хранении и поиске необходимых видеозаписей.

Построение системы управления предусматривает использование открытой платформы, на основе которой может функционировать система управления видеонаблюдением, а также размещаться локальный мультимедийный контент. Ее особенностью является использование доступной системной архитектуры, которая имеет открытые системные порты ввода-вывода. Также необходимо учитывать использование открытого и доступного программного обеспечения. Преимуществом такой системы управления является более низкая стоимость компонентов по сравнению с закрытой платформой одного производителя.

Основная часть

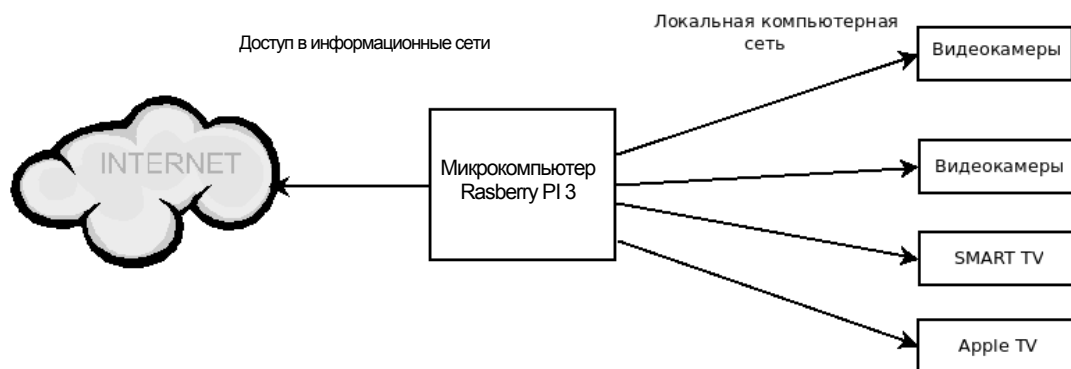
Для организации системы управления видеопотоками в инженерных системах смарт-дома необходима интеграция как аппаратного, так и программного обеспечения для получения, передачи и хранения видеоконтента различного назначения. Это обеспечивается поддержкой различных компонентов системной платформой необходимых мультимедийных и сетевых стандартов и протоколов. Это необходимо учитывать при выборе соответствующего оборудования и программной части системы управления.

Концептуальная организации при построении системы управления видеотрафиком базируется на основе универсальной системы, обеспечивающей обработку данных от различных подуровней инженерных систем. При таком подходе имеется только один управляющий центр для всех инженерных систем. В этом случае необходима совместимость системных компонентов между собой при обработке различных данных. Второй подход заключается в использовании нескольких управляющих центров для

различных инженерных систем. При этом используется несколько специализированных контроллеров, обрабатывающих данные с датчиков, видеoinформацию и управляющих регулируемыми элементами. Использование данного подхода является более предпочтительным по причине более высоких требований к вычислительным свойствам управляющих центров при обработке данных, поступающих с видеокамер. Кроме этого, наличие нескольких управляющих контроллеров делает возможным организацию распределенной обработки видео данных на нескольких контроллерах.

Для передачи видеоданных через телекоммуникационные каналы передачи данных существуют специальные форматы данных, позволяющие осуществить их сжатие. Это необходимо для уменьшения объема передаваемых данных. Наиболее распространенным при работе с видеокамерами является формат H.264. По этой причине все используемое оборудование должно быть с ним совместимо и иметь необходимые сертификаты.

Структурная схема системы управления видеоконтентом показана на рисунке.



Структурная схема центра управления инженерными системами

Система управления состоит из следующих составляющих: видеоустройств, генерирующих видеотрафик, среды передачи и устройств хранения и обработки. Функции обработки реализуют контроллеры управления, выполненные на основе универсальных вычислительных устройств. Это является преимуществом перед специализированными устройствами, работа которых ограничена программными функциями, заложенными при их изготовлении, программной логикой и не может быть модифицирована пользователем для расширения функциональных возможностей [4].

Правила функционирования системы управления ориентированы на использование модели поведения пользователя модели. Процесс управления и обработки трафика зависит от нахождения проживающих в здании людей. В этом случае происходит выбор необходимых источников видеосигналов. Также происходит регулирование временных интервалов работы системы в зависимости от времени суток. Например, при краткосрочном отсутствии (в пределах небольшого временного интервала) проживающих может не производиться включение видеонаблюдения внутреннего охраняемого периметра. При длительном отсутствии включение внутренних видеокамер является обязательным. При долгосрочном отсутствии проживающих может выполняться передача записанных с видеокамер видеокладов во внешнее сетевое облачное хранилище, что значительно повышает защиту от потери данных. В этом случае исключен вариант потери важных данных о работе системы, а также видеофиксации событий.

Аналогичным образом производится управление источниками потоковых видео. На основе сигналов, определяющих присутствие проживающих, производится запуск контроллера, отвечающего за доступ к внешним источникам мультимедийных данных. Производится включение необходимых пользовательских видеоустройств, телевизоров, мультимедийных центров на основании ранее использованных источников мультимедийного контента.

Система управления реализует модель работы, основанную на анализе различных ситуаций в поведении проживающих, их предпочтений в использовании видеофайлов и мультимедийных потоковых источников. Дополнительно производится тестирование существующих телекоммуникационных каналов.

Основу системы управления составляет микрокомпьютер, реализованный на основе открытого проекта Raspberry Pi 3. Его использование позволяет осуществлять использование открытых проектов управления смарт-домом, а также проводить расширения необходимых функций. Также доступно изменение алгоритмов работы существующих программ, так как используются проекты с открытым кодом. Данный микрокомпьютер имеет открытую архитектуру, что делает возможным расширение обрабатываемых источников данных. Микрокомпьютер Raspberry Pi 3, используемый в системе, имеет следующие системные характеристики:

- процессор: 64-битный 4-ядерный ARM Cortex-A53 с тактовой частотой 1,2 ГГц на однокристальном чипе Broadcom BCM2837;
- оперативная память: 1ГБ LPDDR2 SDRAM;
- цифровой видеовыход: HDMI;
- композитный выход: 3,5 мм (4 pin);
- USB порты: USB 2.0×4;
- сеть: WiFi 802.11n, 10/100 Мб RJ45 Ethernet;
- Bluetooth: Bluetooth 4.1, Bluetooth Low Energy;
- разъем дисплея: Display Serial Interface (DSI);
- разъем видеокамеры: MIPI Camera Serial Interface (CSI-2);
- порты ввода-вывода: 40.

Для организации управления мультимедийными файлами используется открытое программное обеспечение PLEX. Оно выполняет следующие функции:

- ведение каталога медиатеки, содержащего различные мультимедийные файлы;
- автоматическое распознавание файлов в медиатеке и формирование для них обложки и аннотации;
- трансляция содержимого медиатеки на пользовательские устройства (Smart TV, Apple TV) а также через HTML 5 плеер, через локальную компьютерную сеть.

В качестве системы видеонаблюдения используется открытый проект ZoneMinder. Данное программное обеспечение:

- обеспечивает поддержку локальных и сетевых видеокамер;
- поддерживает pan/Tilt/Zoom (управление камерами);
- ведет гибкое формирование необходимых зон наблюдения;
- имеет возможность осуществления записи по наличию движения в зоне наблюдения;
- обеспечивает высокую устойчивость к сбоям в работе;
- имеет удобный визуальный интерфейс пользователя для управления системой;
- поддерживает режим различных уровней доступа для пользователей;
- расширяется для поддержки дополнительных протоколов управления.

Таким образом, реализуется полноценное управление видеоданными на основе открытого аппаратного и программного обеспечения. Использование платформы Raspberry Pi 3 позволяет реализовать более энергоэффективный центр управления за счет низкой стоимости компонентов системы и открытой лицензии на программное обеспечение

Выводы:

1. Разработана структурная схема системы управления видеоданными в инженерных системах в жилом помещении на основе открытой платформы.
2. Определено аппаратное обеспечение, используемое в системе, и приведены выполняемые им функции.

3. Сформулирован принцип управления на основе поведения проживающих.
4. Показана возможность построения системы управления на основе открытой системной платформы.

Список литературы

1. Элсенпитер, Р.К. Умный Дом строим сами / Р.К. Элсенпитер, Т.Дж. Велт. – М.: Кудиц-образ, 2005. – 384 с.
2. Гололобов, В.Н. Умный дом своими руками / В.Н. Гололобов. – М.: НТ-Пресс, 2007. – 416 с.
3. Сопер, М.Э. Практические советы и решения по созданию «Умного дома» / М.Э. Сопер. – М.: НТ Пресс, 2007. – 432 с
4. Харке, В. Умный дом. Объединение в сеть бытовой техники и систем коммуникаций в жилищном строительстве / В. Харке. – М.: Техносфера, 2006. – 287 с.

Referances

1. R.K. Elsenpiter, R.K. Smart home we build ourselves / R.K. Elsenpiter, T.J. Welt. – M.: Kudits-image, 2005. – 384 p.
2. Gololobov, V.N. Smart home do it yourself / V.N. Gololobov. – M.: NT-Press, 2007. – 416 p.
3. Soper, M. Practical advice and solutions for creating a “smart home” / M. Soper. – M.: NT Press, 2007. – 432 p.
4. Harke, W. Smart home. Networking home appliances and communications systems in housing construction / W. Harke. – M.: Technosphere, 2006. – 287 p.

УДК 628.3

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Андреев Сергей Юрьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Водоснабжение, водоотведение
и гидротехника»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Ласьков Николай Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Строительные
конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

*Пензенский государственный
технологический университет*

Россия, 440039, г. Пенза,
проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а / 11,
тел. (8412) 49-54-41; факс (8412) 49-60-86

Яхкин Михаил Ильич,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник отдела
научных исследований
E-mail: yah@sura.ru

*Акционерное общество «Научно-
производственное предприятие «Рубин»*
440000, Россия, Пенза, Байдукова, 2,
тел.: +7-8412-20-48-08

Князев Владимир Александрович,
кандидат технических наук,
инженер 1-й категории

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Andreev Sergey Yuryevich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Water supply, sewerage and
hydraulic engineering»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Laskov Nikolay Nikolaevich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
departament «Building construction»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Penza State Technological University

Russia, 440039, Penza,
1A / 11 Baidukova / Gagarin St.,
tel. (8412) 49-54-41; fax (8412) 49-60-86

Yakhkind Michael Il'ich,
Candidate of Sciences, Senior Reseacher
Research department
E-mail: yah@sura.ru

*Joint Stock Company «Research And
Production Enterprise "Rubin»*
440000, Russia, Penza, 2, Baidukova,
tel: + 7-8412-20-48-08

Knyazev Vladimir Aleksandrovich,
Candidate of Sciences,
1st Category Engineer

НОВАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОФИЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ОСРЕДНЕННЫХ МЕСТНЫХ СКОРОСТЕЙ ПО СЕЧЕНИЮ НАПОРНОГО ТРУБОПРОВОДА

С.Ю. Андреев, М.И. Яхкин, Н.Н. Ласьков, В.А. Князев

Приведены результаты исследований закономерностей распределения величин осредненных местных скоростей по радиусу напорного трубопровода круглого сечения. Получена математическая зависимость, позволяющая определять величину отношения значения осредненной местной скорости на границе пристеночного подслоя турбулентного потока жидкости $\bar{u}_{s*}$ к динамической скорости U_* . Полученная математическая зависимость может быть использована при проектировании напорных сетей водопровода и канализации.

Ключевые слова: логарифмический закон распределения; параболический закон распределения; динамическая скорость; относительная шероховатость; пристеночный подслей; переходный подслей; ядро потока

NEW METHOD OF CALCULATING THE DISTRIBUTION PROFILE OF RELATIVE AVERAGED LOCAL VELOCITIES BY SECTION OF A PRESSURE PIPE

S.Y. Andreev, M.I. Yakhkind, N.N. Laskov, V.A. Knyazev

The results of studies of the regularities of distribution of averaged local velocities by the radius of a pressure circular pipe are presented. A mathematical dependence is obtained, which allows to determine the ratio of the averaged local velocity at the wall sublayer boundary of the turbulent fluid flow $\bar{u}_{\delta*}$ to the dynamic velocity v_* . The obtained mathematical dependence can be used in the design of pressure networks of water supply and sewerage.

Keywords: logarithmic distribution law; parabolic distribution law; dynamic velocity; relative roughness; wall sublayer; transition sublayer; flow kernel

В практике инженерного расчета технологических трубопроводов возникают две основные задачи: определение величины потерь давления на трение по длине трубопровода и установление характера профиля распределения осредненных величин местных скоростей потока жидкости по радиусу его сечения.

Величина потерь давления на трение в трубопроводе в значительной степени определяется режимом течения жидкости и характером профиля распределения осредненных величин местных скоростей.

При равномерном ламинарном напорном движении жидкости в трубе круглого поперечного сечения радиусом r_0 поток жидкости можно рассматривать как совокупность бесконечно тонких концентрических слоев толщиной dr , удаленных от оси симметрии на расстояние r , движущихся относительно стенки трубы со скоростью u_r . Относительно друг друга соседние слои жидкости перемещаются со скоростью du_r , при этом величина градиента скорости на расстоянии r от оси потока будет иметь значение

$$G_r = \frac{du_r}{dr}, \text{ с}^{-1}. \quad (1)$$

Максимальное значение величина градиента скорости будет иметь в слое жидкости, граничащем со стенкой трубы (в пристеночном подслое) G_* , и с изменением расстояния от оси потока r величина градиента скорости G_r в ламинарном потоке жидкости будет уменьшаться по закону

$$G_{rл} = G_* \frac{r}{r_0}, \text{ с}^{-1}. \quad (2)$$

При ламинарном режиме движения жидкости в трубе круглого сечения выполняется параболический закон изменения величины местной скорости потока u_r по текущему радиусу r , названный именем английского физика и математика Джорджа Габриэля Стокса (1818–1903):

$$u_r = 2v \left[1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right], \text{ м/с}. \quad (3)$$

Дифференцирование уравнения Стокса (3) с учетом $r_0 = 2R$ (где R – величина гидравлического радиуса) позволит получить формулу (2)

$$G_r = \frac{du}{dr} = \frac{4vr}{r_0^2} = \frac{2v}{R} \frac{r}{r_0} = G_* \frac{r}{r_0}, \text{ с}^{-1},$$

откуда

$$G_* = \frac{2v}{R}, \text{ с}^{-1}. \quad (4)$$

Наряду с ламинарным и турбулентным режимами Л.Прандтль выделял и режим движения жидкости при $Re < 1$, названный им «ползущим течением» [1].

Ползущее течение наблюдается в тонком прилегающем к стенке трубы подслое жидкости, в котором силы вязкого трения превышают силы инерции, вследствие чего величина градиента скорости в пределах подслоя имеет постоянное значение ($G_* = \text{const}$), а величина местной скорости потока u_y (м/с) в зависимости от расстояния от стенки трубы y (м) меняется по линейному закону

$$u_y = G_* y, \text{ м/с.} \quad (5)$$

На расстоянии $y = \delta_*$ от стенки трубы величина местной скорости потока u_{δ_*} (м/с) равна величине динамической скорости v_* (м/с) ($u_{\delta_*} = v_*$).

Из формулы (5) при $y = \delta_*$ и $u_y = v_*$ с учетом формулы (4) может быть определена величина толщины пристеночного подслоя

$$\delta_* = \frac{v_*}{G_*} = R \frac{v_*}{2v} = R \frac{v \sqrt{\frac{\lambda}{8}}}{2v} = R \sqrt{\frac{\lambda}{32}}, \text{ м,} \quad (6)$$

где v_* – величина динамической скорости, определяемая по формуле

$$v_* = \sqrt{igR} = v \sqrt{\frac{\lambda}{8}}, \text{ м/с;} \quad (7)$$

здесь i – гидравлический уклон; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; λ – коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси).

На расстоянии $y = \delta_*$ от стенки потока формула (3) позволяет получить значение местной скорости u_{δ_*} , величина которой отлична от значения динамической скорости v_* ($u_{\delta_*} \neq v_*$). Пересечение эпюры реального распределения величин местных скоростей ламинарного потока и эпюры скоростей, построенной по формуле (3), осуществляется на границе переходного подслоя с ядром потока.

Переходный подслои имеет толщину δ_{**} , равную толщине пристеночного подслоя δ_* ($\delta_{**} = \delta_*$).

Пристеночный и переходный подслои вместе образуют вязкий слой, имеющий толщину

$$\delta = \delta_* + \delta_{**} = 2\delta_*, \text{ м.} \quad (8)$$

Величина местной скорости на оси ламинарного потока при $r = 0$ и $y = r_0$ в соответствии с формулой (3) будет иметь максимальное значение $u_{\text{max л}} = 2v$.

При переходе движения жидкости в трубе круглого сечения в турбулентный режим величина местной скорости уменьшится и будет иметь значение $u_{\text{max т}} = 2v\beta$. Коэффициент β характеризует отношение величины максимальной местной скорости на оси турбулентного потока $u_{\text{max т}}$ к величине максимальной местной скорости на оси ламинарного потока $u_{\text{max л}}$ в трубе круглого сечения радиусом r_0 при одинаковой величине средней скорости v , но разных значениях кинематических коэффициентов вязкости пропускаемых через трубу жидкостей (разных значениях числа Рейнольдса Re):

$$\beta = \frac{u_{\text{max т}}}{u_{\text{max л}}} = \frac{2v\beta}{2v}. \quad (9)$$

В [2] по аналогии с формулой (3) представлены модифицированный параболический закон, описывающий изменение величины усредненного значения местной скорости турбулентного потока жидкости в трубе круглого сечения

$$\bar{u}_r = 2\nu \left[\beta - (2\beta - 1) \frac{r^2}{r_0^2} \right], \text{ м/с}, \quad (10)$$

и формула для определения величины коэффициента β_1

$$\beta_1 = \frac{a - \sqrt{a^2 - 4\epsilon}}{2}, \quad (11)$$

где

$$a = \frac{4 \left(1 - \sqrt{\frac{\lambda}{32}} \right) - 2 \sqrt{\frac{\lambda}{32}} - 1}{4 \left(1 - \sqrt{\frac{\lambda}{32}} \right)^2 - 2}; \quad \epsilon = \frac{\left(1 - \sqrt{\frac{\lambda}{32}} \right)^2 + 2 \sqrt{\frac{\lambda}{32}}}{4 \left(1 - \sqrt{\frac{\lambda}{32}} \right)^2 - 2}.$$

В соответствие с формулой (3) относительный дефицит местной скорости u_r от максимальной $u_{\max \text{ л}}$ для ламинарного потока будет иметь значение

$$\frac{u_{\max \text{ л}} - u_r}{u_{\max \text{ л}}} = \frac{r^2}{r_0^2}, \quad (12)$$

а для турбулентного потока его величина в соответствии с формулой (10) будет иметь значение

$$\frac{u_{\max \text{ т}} - u_r}{2u_{\max \text{ т}} - u_{\max \text{ л}}} = \frac{r^2}{r_0^2}. \quad (13)$$

Дифференцирование уравнения (10) позволит получить формулу для определения величины градиента скорости в ядре турбулентного потока жидкости.

$$G_{r\tau} = -\frac{du}{dr} = 4\nu(2\beta - 1) \frac{r}{r_0^2} = \frac{2\nu}{R}(2\beta - 1) \frac{r}{r_0} = G_*(2\beta - 1) \frac{r}{r_0}, \text{ с}^{-1}. \quad (14)$$

Величина касательного напряжения сил продольного внутреннего трения в ядре потока жидкости по аналогии с формулами (2) и (14) также будет увеличиваться по линейному закону при увеличении значения r и при величине $r = r_0 - 2\delta_*$ будет иметь значение:

– в ламинарном потоке

$$\tau_{\delta \text{ л}} = \tau_* \frac{r_0 - 2\delta_*}{r_0}, \text{ Н/м}^2; \quad (15)$$

– в турбулентном потоке

$$\tau_{\delta \text{ т}} = \tau_* (2\beta - 1) \frac{r_0 - 2\delta_*}{r_0}, \text{ Н/м}^2, \quad (16)$$

где τ_* – величина касательного напряжения силы продольного трения в пристеночном подслое.

$$\tau_* = \frac{F_{\tau}}{S} = \mu_* G_* = \frac{\nu_*^2}{\rho} = \frac{igR}{\rho}, \text{ Н/м}^2, \quad (17)$$

где F_t – сила трения жидкости на поверхности стенки трубы (Н); S – площадь поверхности раздела фаз «поток жидкости – стенка трубы» (м^2); $\mu_* = \alpha\mu$ – общий динамический коэффициент вязкости в пристеночном подслое ($\text{Па}\cdot\text{с}$); ρ – плотность жидкости ($\text{кг}/\text{м}^3$).

Имеющиеся данные, полученные в ходе исследования турбулентного потока вблизи стенки трубы с помощью современной аппаратуры, показывают, что, в отличие от ламинарного потока, в турбулентном потоке жидкости величина местной скорости $\bar{u}_\delta$ на границе пристеночного и переходного подслоев на расстоянии $y = \delta_*$ от стенки трубы не равна значению динамической скорости $\bar{u}_{\delta_*} \neq v_*$.

Отношение величины местной скорости на границе пристеночного подслоя $\bar{u}_\delta$ к величине динамической скорости v_* принято называть числом Никурадзе:

$$N = \frac{\bar{u}_{\delta_*}}{v_*}. \quad (18)$$

Число Никурадзе является пульсирующей величиной, изменяющей свое значение во времени от $N=2,3$ до $N=18$ [3]. Осредненное за достаточно большой промежуток времени число Никурадзе имеет постоянное значение.

Процесс зарождения турбулентных вихрей в переходном подслое приводит к его разрушению, что также обуславливает пульсирование толщины пристеночного слоя δ_* . При разрушении переходного подслоя происходят интенсивный выброс элементарных объемов жидкости (турбулентных вихрей) в ядро потока и увеличение местной скорости на границе пристеночного подслоя до значения

$$\bar{u}_{\delta_*} = Nv_*, \text{ м/с}. \quad (19)$$

Средняя величина градиента скорости в пристеночном подслое в процессе пульсации увеличивает свое значение с величины G_* до $\bar{G}_* = NG_*$.

В переходном подслое турбулентного потока жидкости наблюдается скачкообразное уменьшение величины касательного напряжения сил продольного внутреннего трения, в результате чего упругая потенциальная энергия, накопленная в пристеночном подслое, переходит в энергию зарождающихся в переходном подслое элементарных турбулентных вихрей и в увеличение кинетической энергии движения жидкости на границе переходного подслоя и ядра потока (увеличение значения градиента скорости G_{**}).

В работе [2] было показано, что наибольшая величина удельной массовой диссипации энергии (рассеивания энергии и превращения ее в тепло) связанная с касательным напряжением сил вязкого трения и наблюдается в пристеночном подслое:

$$\varepsilon_{\tau_*} = \frac{v_*^2}{2} = \frac{\tau_*}{2\rho}, \text{ м}^2/\text{с}^2. \quad (20)$$

По аналогии с формулой (20), используя формулы (15) и (16), можно определить величину относительной разности удельной массовой диссипации энергии на границе переходного подслоя и ядра турбулентного потока жидкости, являющуюся количественной характеристикой доли удельной энергии, высвобождающейся в переходном подслое в результате изменения величины касательного напряжения силы продольного трения

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_\tau = \frac{\varepsilon_{\tau_{\delta_*}} - \varepsilon_{\tau_{\delta T}}}{\varepsilon_{\tau_{\delta_*}}} &= \left[\frac{\tau_*}{2\rho} \frac{r_0 - 2\delta_*}{r_0} - \frac{\tau_*}{2\rho} (2\beta - 1) \frac{r - 2\delta_*}{r_0} \right] \cdot \left(\frac{\tau_*}{2\rho} \frac{r_0 - 2\delta_*}{r_0} \right)^{-1} = \\ &= 1 - (2\beta - 1) = 2 - 2\beta = 2(1 - \beta) \end{aligned} \quad (21)$$

С учетом формулы, приведенной в работе [2],

$$G_{**} = \frac{3G_*}{2\beta - 1}, \text{ с}^{-1}; \quad (22)$$

средняя величина градиента скорости, устанавливающаяся в пристеночном подслое турбулентного потока жидкости в результате взаимодействия пристеночного и переходного подслоев, может быть определена по формуле

$$\bar{G}_* = G_{**} \bar{\varepsilon}_\tau = G_{**} 2(1 - \beta) = G_* \frac{3}{2\beta - 1} 2(1 - \beta) = G_* \frac{6(1 - \beta)}{2\beta - 1}. \quad (23)$$

Учитывая (18), а также, что $v_* = G_* \delta_*$; $\bar{u}_{\delta_*} = \bar{G}_* \delta_*$, величина числа Никурадзе может быть определена по формуле

$$N = \frac{\bar{G}_* \delta_*}{G_* \delta_*} = G_* \delta_* \frac{6(1 - \beta)}{2\beta - 1} \cdot \frac{1}{G_* \delta_*} = \frac{6(1 - \beta)}{2\beta - 1}. \quad (24)$$

Прандтлем Л. было получено уравнение для определения величины градиента скорости в ядре турбулентного потока жидкости на расстоянии y от стенки трубы [1]:

$$G_y = \frac{d\bar{u}_y}{dy} = \frac{v_*}{\chi y}, \text{ с}^{-1}, \quad (25)$$

где $\chi = 0,4$ – постоянная Кармана (первая константа турбулентности).

Интегрирование уравнения (25) позволяет получить зависимость для определения осредненного значения величины местной скорости в ядре турбулентного потока жидкости:

$$\bar{u}_y = v_* \left(\frac{1}{\chi} \ln y + C \right), \text{ м/с}, \quad (26)$$

где C – постоянная интегрирования.

Рассматривая граничные условия на расстоянии толщины «ламинарного подслоя» (пристеночного подслоя) $y = \delta_*$ и на расстоянии выступов эквивалентной равномерно-зернистой шероховатости $y = \Delta_*$, учитывая экспериментальные данные, полученные И.Никурадзе, Л.Прандтль получил формулы для определения значения величин местной скорости в ядре турбулентного потока жидкости в гидравлически гладких трубах [1]

$$\bar{u}_y = v_* \left(\frac{1}{\chi} \ln \frac{v_* y}{v} + 5,5 \right), \text{ м/с}, \quad (27)$$

и вполне шероховатых трубах [1]

$$\bar{u}_y = v_* \left(\frac{1}{\chi} \ln \frac{y}{\Delta} + 8,48 \right), \text{ м/с}. \quad (28)$$

Полученные зависимости (27) и (28) не позволяют описывать наиболее важную для практических целей переходную область между гидравлически гладким и вполне шероховатым трением.

В соответствии с формулами (27) и (28) относительный дефицит местной скорости от максимальной для турбулентного потока жидкости, протекающего как в гидравлически гладких, так и во вполне шероховатых трубах, будет иметь значение

$$\frac{\bar{u}_{\max} - \bar{u}_y}{v_*} = \frac{1}{\chi} \ln \frac{r_0}{y}. \quad (29)$$

Величина относительного дефицита средней скорости от максимальной может быть найдена через величину расхода жидкости Q , определяемого как сумма элемен-

тарных расходов dQ в кольцевых сечениях площадью $d\omega$, имеющих толщину dr и удаленных от оси потока на расстояние $r = r_0 - y$.

$$Q = \int_0^{r_0} f(r) 2\pi r dr = \nu \pi r_0^2, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (30)$$

где $\bar{u}_r = f(r)$ – закон распределения осредненных величин местных скоростей турбулентного потока по радиусу трубы круглого сечения.

Заменив в (30) r на $r_0 - y$ и подставляя в качестве $\bar{u}_r = f(r)$ функцию, полученную из (29),

$$\bar{u}_y = \bar{u}_{\max \tau} - \frac{\nu_*}{\chi} \ln \frac{r_0}{y}, \quad (31)$$

имеем

$$Q = \int_0^{r_0} \left(\bar{u}_{\max \tau} - \frac{\nu_*}{\chi} \ln \frac{r_0}{y} \right) 2\pi (r_0 - y) dy = \pi r_0^2 \left(\bar{u}_{\max \tau} - \frac{3}{2\chi} \nu_* \right), \quad (32)$$

откуда с учетом $\omega = \pi r_0^2$ и $Q = \omega \nu$ получим

$$\nu = \frac{Q}{\omega} = \bar{u}_{\max \tau} - \frac{3}{2\chi} \nu_*$$

и

$$D = \frac{\bar{u}_{\max \tau} - \nu}{\nu_*} = \frac{3}{2\chi} = 3,75 = \text{const}, \quad (33)$$

где D – величина относительного дефицита средней скорости от максимальной.

С учетом формулы (7) из (33) имеем

$$\beta_2 = \frac{\bar{u}_{\max \tau}}{u_{\max \text{ л}}} = \frac{\nu + 3,75\nu_*}{2\nu} = \frac{1 + 3,75\sqrt{\frac{\lambda}{8}}}{2} = \frac{1 + 1,326\sqrt{\lambda}}{2}. \quad (34)$$

Подставив в (18) формулы (27) и (28) с учетом $y = \delta_*$ получим уравнения для определения числа Никурадзе в гидравлически гладких и вполне шероховатых трубах:

$$N_2 = \frac{\bar{u}_{\delta_*}}{\nu_*} = \frac{1}{\chi} \ln \frac{\nu_* \delta_*}{\nu} + 5,5; \quad (35)$$

$$N_3 = \frac{\bar{u}_{\delta_*}}{\nu_*} = \frac{1}{\chi} \ln \frac{\delta_*}{\Delta} + 8,48. \quad (36)$$

В табл. 1 приведены значения критериев Рейнольдса, вычисленные по формуле

$$\text{Re} = \frac{\nu d}{\nu} \quad (37)$$

для трубы круглого сечения диаметром $d=0,05$ м, работающей в области гидравлически гладких русел, при различных значениях средней скорости ν (м/с), коэффициентов гидравлического трения λ , вычисленных по формуле Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}, \quad (38)$$

а также величин: динамической скорости v_* (м/с), вычисленной по формуле (7); толщины пристеночного слоя δ_* (м), вычисленной по формуле (6); коэффициентов β_1 и β_2 , вычисленных по формулам (11) и (34); чисел Никурадзе N_1 и N_2 , вычисленных по формулам (24) и (35).

Т а б л и ц а 1

Результаты вычислений характеристик турбулентного потока жидкости в трубе диаметром $d=0,05$ м, работающей в области гидравлически гладких русел

Средняя скорость потока жидкости v (м/с)	0,202	0,303	0,404	0,606	0,808
Значения числа Re	10000	15000	20000	30000	40000
Коэффициент гидравлического трения λ	0,03160	0,02855	0,02657	0,02401	0,02235
Динамическая скорость v_* (м/с)	0,0127	0,01810	0,02328	0,03320	0,04271
Толщина пристеночного подслоя δ_* (м)	0,0003928	0,0003734	0,0003602	0,0003424	0,0003304
Коэффициент β_1 , вычисленный по формуле (11)	0,6344	0,6236	0,6179	0,6096	0,6043
Коэффициент β_2 , вычисленный по формуле (34)	0,6179	0,6120	0,6081	0,6027	0,5991
Число Никурадзе N_1 , вычисленное по формуле (24)	8,1607	9,1359	9,7227	10,6061	11,3811
Число Никурадзе N_2 , вычисленное по формуле (35)	9,4930	10,2521	10,7914	11,5521	12,0926

В табл. 2 приведены значения критериев Рейнольдса, вычисленные по формуле (37) для труб круглого сечения диаметром $d=0,05$ м, работающих в области вполне шероховатых русел, при различных значениях средней скорости v (м/с), имеющих различную величину относительной гладкости поверхности d/Δ , и их коэффициентов гидравлического трения $\lambda_{\text{кв}}$ в области квадратического закона сопротивления, вычисленных по формуле Прандтля – Никурадзе

$$\lambda_{\text{кв}} = \frac{0,25}{\left(\lg 3,7 \frac{d}{\Delta} \right)^2}, \quad (39)$$

а также величин: динамической скорости v_* (м/с), вычисленной по формуле (7); толщины пристеночного слоя δ_* (м), вычисленной по формуле (6); коэффициентов β_1 и β_3 , вычисленных по формулам (11) и (34); чисел Никурадзе N_1 и N_3 , вычисленных по формулам (24) и (36).

Результаты вычислений характеристик турбулентных потоков жидкости в напорных трубах диаметром $d=0,05$ м, работающих в области вполне шероховатых русел и имеющих различную величину относительной гладкости поверхности d/Δ_s

Средняя скорость потока жидкости U (м/с)	4,2420	6,8680	9,2920	11,9180	14,5440
Значения числа Re	21000	340000	460000	590000	720000
Относительная гладкость поверхности трубы d/Δ_s	500	750	1000	1250	15000
Коэффициент гидравлического трения λ	0,02342	0,2109	0,01964	0,01860	0,01783
Динамическая скорость U_* (м/с)	0,2295	0,3526	0,4604	0,5748	0,6867
Толщина пристеночного подслоя δ_* (м)	0,000338 1	0,0003209	0,0003096	0,5892	0,5885
Коэффициент β_1 , вычисленный по формуле (11)	0,6077	0,6002	0,5955	0,5922	0,5891
Коэффициент β_3 , вычисленный по формуле (34)	0,6015	0,5963	0,5929	0,9892	0,5885
Число Никурадзе N_1 , вычисленное по формуле (24)	10,9253	11,9701	12,7068	13,2696	13,7779
Число Никурадзе N_3 , вычисленное по формуле (36)	11,5254	12,4086	13,0382	13,597	13,9319

На рис. 1 представлены зависимости величин относительных осредненных местных скоростей $\frac{\bar{U}_y}{U_*}$ турбулентного потока в гидравлически гладкой трубе диаметром $d=0,05$ м от значения параметра $\lg \frac{U_* y}{\nu}$.

На рис. 2 представлены профили распределения относительных осредненных местных скоростей $\frac{\bar{u}_y}{u_{\max \text{ л}}}$ и относительных градиентов скоростей $\frac{G_y}{G_*}$ по сечению гидравлически гладкой трубы диаметром $d=0,05$ м.

Линия A на рис. 1 и 2 построена по формуле (27) логарифмического закона распределения величин осредненных значений местных скоростей. Линия B на рис. 1 и 2 построена по формуле (10) квадратического закона распределения величин осредненных значений местных скоростей в ядре турбулентного потока жидкости. Линия C на рис. 2 построена по формуле (3) квадратического закона распределения величин осредненных значений местных скоростей в ядре ламинарного потока жидкости. Линия D на рис. 2 является линией средней скорости U .

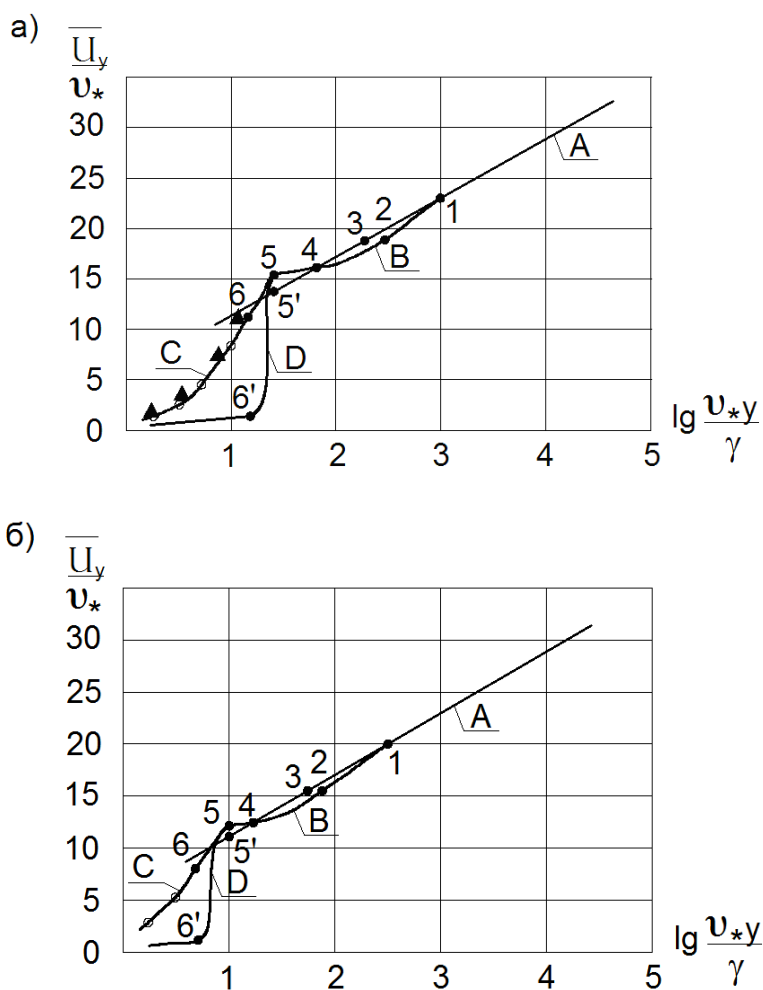


Рис. 1. Зависимости величин относительных осредненных местных скоростей $\frac{\bar{u}_y}{v_*}$

турбулентного потока в гидравлически гладкой трубе диаметром $d=0,05$ м

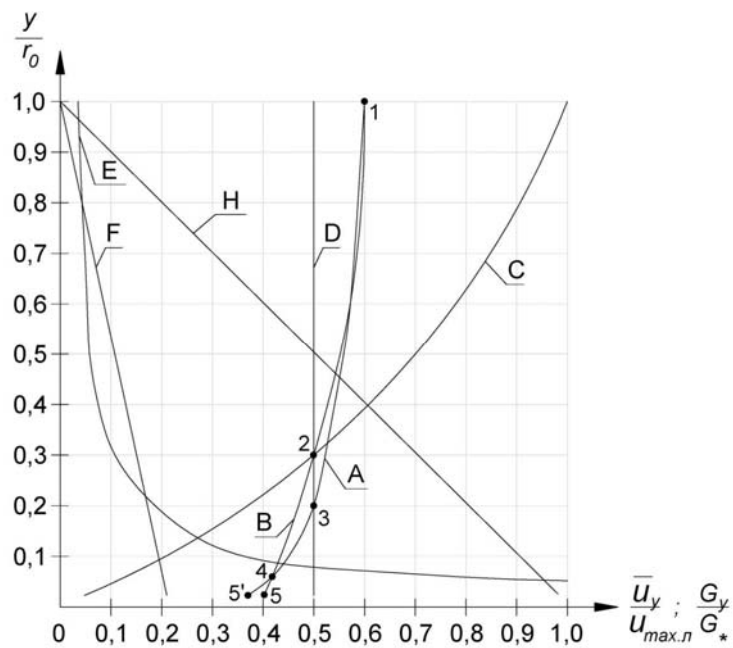
от значения параметра $\lg \frac{v_* y}{\gamma}$:

а – $Re=4000$; б – $Re=10000$;

▲ – данные опытов Рейхардта [3]; ○ – данные, полученные по формуле (40)

Линия E на рис. 2 построена по формуле определения величины градиента скорости G_y в ядре турбулентного потока жидкости Л.Прандтля (25). Линия F на рис. 2 построена по формуле определения величины градиента скорости G_y в ядре турбулентного потока (14).

a



б

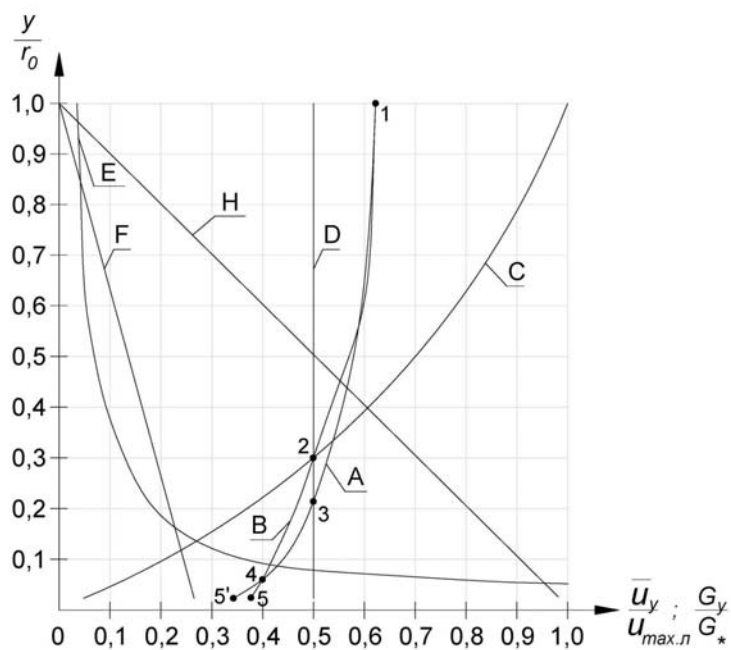


Рис. 2. Профили распределения относительных осредненных местных скоростей $\frac{\bar{u}_y}{u_{\max, \text{л}}}$ (A, B)

и относительных градиентов скоростей $\frac{G_y}{G_*}$ (E, F)

по сечению гидравлически гладкой трубы диаметром $d=0,05$ м:
а – $Re=4000$; б – $Re=10000$

Линия Н на рис. 2 построена по формуле определения величины градиента скорости $G_{r,l}$ в ядре ламинарного потока (2).

Расчетные точки • на рис. 1 были вычислены по формуле

$$\bar{u}_y = \bar{G}_* y = G_* \frac{6(1-\beta)}{2\beta-1} y, \text{ м/с.} \quad (40)$$

Данные, представленные на рисунках, свидетельствуют о том, что пересечение эпюры величин осредненных местных скоростей, построенной по логарифмическому закону (27), с линией средней скорости потока жидкости в гидравлически гладкой трубе диаметром $d=0,05$ м происходит на расстоянии $y_{cp} = 0,204r_0$ от стенки как при числе Рейнольдса $Re=10000$, так и при числе Рейнольдса $Re=40000$.

Наряду с зависимостью (27) Прандтлем на основе обработки экспериментальных данных была получена формула для определения величины коэффициента гидравлического трения при движении жидкости в гидравлически гладких трубах [1]:

$$\frac{1}{\lambda} = 2 \lg(Re \sqrt{\lambda}) - 0,8. \quad (41)$$

В своей работе [5] Л.Д. Ландау приводит уточненную редакцию формулы (27), позволяющую более корректно описывать имеющиеся экспериментальные данные:

$$\bar{u}_y = v_* \left(\frac{1}{\chi} \ln \frac{v_* y}{v} + 5,1 \right). \quad (42)$$

В работе [4] было показано, что данные, полученные по формулам Прандтля (27) и (41), описывающим напорное движение жидкости в гидравлически гладких трубах круглого сечения, будут соответствовать друг другу при величине расстояния y_{cp} от стенки трубы до слоя, где значение осредненной местной скорости $\bar{u}_y$ достигает величины средней скорости потока v , равного $y_{cp} = 0,240r_0$, а данные, полученные по формулам (41) и (42), будут соответствовать друг другу при величине расстояния $y_{cp} = 0,293r_0$.

Положение о равенстве величины местной скорости потока u_r средней скорости в напорной трубе, имеющей радиус r_0 , на расстоянии $y_{cp} = 0,293r_0$ от ее стенки имеет универсальный характер и справедливо как для ламинарного, так как для турбулентного потоков движения жидкости.

Графики, приведенные на рис. 2, показывают, что профили распределения относительных осредненных местных скоростей потока по сечению гидравлически гладкой трубы диаметром $d=0,05$ м, построенные по формулам (10) и (27), совпадают друг с другом в приосевой области и имеют различия в пристеночной области потока.

Профиль распределения относительных осредненных местных скоростей потока по сечению гидравлически гладкой трубы, построенный по формуле (10), более корректно описывает движение пока жидкости, чем профиль, построенный по формуле (27), поскольку величина его площади соотносится с величиной расхода жидкости Q .

Приведенные в табл. 1 и 2 данные показывают, что:

1. Полученная нами формула для определения величины коэффициента β (11) позволяет получать корректные результаты, как в области гидравлически гладких русел, так и в области вполне шероховатых русел.

2. Относительная разность величин коэффициентов β , вычисленных по формулам (11) и (34) для турбулентных потоков жидкости в трубе диаметром $d=0,05$ м, работающей в области гидравлически гладкого русла, уменьшается с 2,6 % до 0,9 % при увеличении средней скорости v с 0,202 м/с до 0,808 м/с.

3. Относительная разность величин коэффициентов β , вычисленных по формулам (11) и (34) для турбулентных потоков жидкости в трубе диаметром $d=0,05$ м, работающей в области вполне шероховатого русла, уменьшается с 1,01 % до 0,1 % при увеличении средней скорости v с 4,2 м/с до 14,5 м/с.

Список литературы

1. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика./ Л. Прандтль. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.
2. Андреев, С.Ю. Гидродинамические закономерности распределения величин местных осредненных скоростей турбулентного потока жидкости в поперечном сечении трубчатого гидродинамического устройства / С.Ю. Андреев, М.И. Яхкинд, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №2. – С. 178–190.
3. Андреев, С.Ю. Уточненная методика определения осредненных местных скоростей потока жидкости в гидравлически гладких и вполне шероховатых трубах / С.Ю. Андреев, М.И. Яхкинд, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №1. – С. 193–203.
4. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Гидродинамика./ Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2006. – 736 с.

References

1. Prandtl, L. Hydroaeromechanics / L. Prandtl. – Izhevsk: Research centre “Regular and chaotic dynamics”, 2000. – 576 p.
2. Andreev, S.Yu. Hydrodynamic regularities of distribution of local averaged speed values of turbulent liquid flow in cross-section of tubular hydrodynamic device / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 2. – P. 178–190.
3. Andreev, S.Yu. Specified technique for determining medium area local flow rate speeds in hydraulic smooth and quite rough pipes / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, V.A. Knyazev // Regional architecture and engineering. – 2019. – No. 1. – P. 193–203.
4. Landau, L.D. Theoretical physics. Hydrogasodynamics / L.D. Landau, E.M. Lifshitz. – M.: Physmatlit, 2000. – 736 p.

УДК 54:544.7

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Вилкова Наталья Георгиевна,
доктор химических наук, профессор
кафедры «Физика и химия»
E-mail: ngvilkova@mail.ru

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, Пенза, ул. Красная, д.40,
тел. (8412) 368209; факс (8412) 368400

Мишина Светлана Ивановна,
кандидат химических наук,
доцент кафедры «Химия и теория
и методика обучения химии»
E-mail: elancv@mail.ru

Депутатов Евгений Дмитриевич,
студент
E-mail: evgen-depytatov@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Vilkova Natalya Georgievna,
Doctor of Chemical Sciences, Professor
of the department «Physics and Chemistry»
E-mail: ngvilkova@mail.ru

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.
tel. (8412) 368209; fax (8412) 368400

Mishina Svetlana Ivanovna,
Candidate of Chemical Sciences, Associate
Professor of the department «Chemistry
and Theory and Methodology Teaching
Chemistry»
E-mail: elancv@mail.ru

Deputatov Evgeniy Dmitrievich,
Student
E-mail: evgen-depytatov@mail.ru

ПЕНЫ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ ОКСИДОМ ТИТАНА: ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА

Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина, Е.Д. Депутатов

Тонкодисперсные порошки различной химической природы могут служить хорошими стабилизаторами дисперсных систем. Наиболее распространенными твердыми веществами-стабилизаторами являются нерастворимые ни в воде, ни в органических жидкостях вещества: глина, уголь, кремнезем, стекло, оксиды и гидроксиды многих металлов. Научные исследования таких дисперсных систем в настоящее время обусловлены новыми возможностями их применения: удаление из водной суспензии частиц нанометрических размеров (например, углеродных нанотрубок, представляющих собой полые цилиндрические структуры углерода диаметром от десятых до нескольких десятков нанометров); стабилизация пен в процессах нефтеотдачи EOR (enhanced oil recovery); проявление ярко выраженного антивирусного эффекта нанокompозитами на основе оксида титана и др.

Исследованы свойства пен, содержащих оксид титана, при изменении pH среды и степени гидрофобизации частиц. Показана существенная зависимость возможности образования и времени жизни данных дисперсных систем от водородного показателя. Наиболее устойчивые системы образовывались только при значениях водородного показателя pH=5, который близок к изоэлектрической (и.э.т.) точке оксида, и возрастании относительной гидрофобизации поверхности от 0,38 до 1,27 ммоль/г. При повышении степени гидрофобизации поверхности до 4,6 ммоль/г и таком же значении pH пенообразование было незначительным ($h \leq 0,2$ см), а время жизни слоя $t \approx 10$ с. При pH=5 и 2 максимальные и средние радиусы были меньше по сравнению с размерами частиц в щелочной среде. Однако при pH= 2 пенообразование было незначительным, а пена была малоустойчивой. В частности, при значениях водородного показателя pH=2 и 3 и повышении степени гидрофобизации от 0,15 до 4,6 ммоль/г высота столба пены составляла 0,1-0,2 см, а время ее жизни не превышало 10 минут. Кроме того, положительный заряд поверхности оксида титана в кислых средах, возможно, не обеспечивает химического взаимодействия с ПАВ – гидрофобизатором.

Таким образом, было установлено, что устойчивые пены, содержащие TiO_2 , могут быть получены только при определенном значении водородного показателя pH=5. При

уменьшении водородного показателя до pH= 2 образуются тонкие слои малоустойчивой пены.

Ключевые слова: пена, оксид титана, гидрофобные частицы, получение, свойства

FOAMS STABILIZED BY TITANIUM OXIDE: OBTAINING AND PROPERTIES

N.G. Vilkova, S.I. Mishina, E.D. Deputatov

Fine powders of different chemical nature can serve as good stabilizers for disperse systems. Usually the most common solid substances – stabilizers are insoluble in water or in organic liquids substances: clay, coal, silica, glass, oxides and hydroxides of many metals. Scientific studies of such dispersed systems are currently due to new opportunities for their use: removal of nanometer-sized particles from an aqueous suspension (for example, carbon nanotubes representing hollow cylindrical carbon structures with a diameter from tenths to several tens of nanometers; improved oil recovery foam (EOR)); manifestation of a pronounced antiviral effect by nanocomposites based on titanium oxide and others.

In this work, properties of foams containing titanium oxide were obtained and investigated, depending on the pH of the medium and the particles' hydrophobicity. The substantial dependence of the possibility of formation and the lifetime of these dispersed systems on the pH are shown. The most stable systems were formed only at pH values of pH = 5, which is close to the isoelectric (ee) point of the oxide and the increase in the relative hydrophobization of the surface from 0.38 to 1.27 mmol / g. With an increase in the degree of surface hydrophobization to 4.6 mmol/g and the same pH value, foaming was insignificant ($h \leq 0.2$ cm), and the layer lifetime $t \approx 10$ sec. At pH = 5 and 2, the maximum and average radii were smaller compared with the particle sizes in an alkaline medium. However, at pH = 2, foaming was insignificant, and the foam was low-resistant foam. In particular, with the values of hydrogen pH=2 and 3 and an increase in the degree of hydrophobization from 0.15 mmol/g to 4.6 mmol/g, the height of the foam column was 0.1-0.2 cm, and its life time did not exceed 10 minutes. In addition, the positive charge of the surface of titanium oxide in acidic media may not provide chemical interaction with surfactant hydrophobizer.

Thus, it was proved that stable foams containing TiO_2 can be obtained only at a certain value of the hydrogen index pH=5. With the decrease in the hydrogen index to pH = 2, thin layers of low-resistant foam are formed.

Keywords: foam, titanium oxide, particles' hydrophobicity, obtaining, properties, foam stability

Тонкодисперсные нерастворимые порошки различной химической природы могут служить хорошими стабилизаторами дисперсных систем, например эмульсий и пен. Обычно в качестве твердых веществ-стабилизаторов используются нерастворимые ни в воде, ни в органических жидкостях вещества: глина, уголь, кремнезем, стекло, оксиды и гидроксиды многих металлов (железа, титана, кальция, цинка и др.). Известно, что частицы твердого стабилизатора адсорбируются на поверхности вода/воздух, образуя межфазный слой, который замедляет процесс диффузионного переноса газа в пене. Причинами устойчивости пен в присутствии твердой фазы являются [1–7]: 1) адсорбция частиц-стабилизаторов и образование межфазных слоев на поверхности пенных пузырьков; 2) капиллярное давление в пенной пленке, содержащей твердую фазу; 3) стерические или электростатические взаимодействия в адсорбционных слоях; 4) механическая прочность и упругость структур, которые формируются в дисперсионной среде обычно в результате взаимодействия твердых частиц, поверхностно-активных веществ и воды.

Образование плотного слоя частиц, которое определяется энергией адсорбции отдельной частицы на межфазной поверхности, рассмотрено в [1, 8]:

$$\Delta G = \pi R^2 \sigma (1 \pm \cos \theta)^2, \quad (1)$$

где R – радиус частиц; σ – поверхностное натяжение жидкость/газ; θ – краевой угол, который образуется при расположении твердой частицы на границе раздела жидкость – газ.

Научные исследования таких дисперсных систем в настоящее время обусловлены новыми возможностями их применения [9–16].

Например, в работе [9] рассматривается устойчивость пен, образованных из водных растворов, содержащих нефтепродукты, при добавлении к ним поверхностно-активного вещества (ПАВ) и диспергированных частиц геля. Устойчивость пены зависела от количества ПАВ, концентрации частиц, содержания солей, концентрации нефти и соотношения газа и жидкости.

Авторы работы [10] для удаления из водной суспензии углеродных нанотрубок, представляющих собой полые цилиндрические структуры углерода диаметром от десятых до нескольких десятков нанометров и длиной от одного микрометра до нескольких сантиметров, предложили метод их агрегирования на поверхности раздела нефть / вода. Интересно, что агрегация данных структур на границе раздела органическая жидкость / вода была возможна при определенном значении pH или при добавлении катионного поверхностно-активного вещества. Метод флотации был применен для обработки эмульсий типа «масло-в-воде» (эмульсии O / W), полученных из синтетических масел путем добавления химических веществ, таких, как катионное поверхностно-активное вещество ЦТАБ (цетилтриметиламмонийбромид), и коагулянтов [11]. В работе [12] пенную флотацию, работающую в непрерывном режиме, применяли для очистки нефтесодержащих сточных вод. Использовали модельную эмульсию (загрязняющее масло в воде) и додецилсульфат натрия в качестве пенообразователя. Было изучено влияние электролита, скорости потока воздуха, времени удержания гидравлической жидкости на производительность процесса. Стабилизация пен в процессах нефтеотдачи EOR (enhanced oil recovery) также является актуальной задачей. В таких процессах к растворам поверхностно-активных веществ добавляют полимеры, такие, как частично гидролизированный полиакриламид, гуаровая камедь. В результате исследований установлено, что смесь анионного поверхностно-активного вещества (додецилсульфата натрия) и катионного полимера (поливиниламина) улучшает стабильность пены, но затрудняет процесс пенообразования. Пены, стабилизированные наночастицами, представляют собой перспективные заменители полимеров. В [13] стабильность пены повышена с помощью наночастиц, таких, как оксид кремния и оксид железа в сочетании с полимером – гуаровой камедью. В работе [16] отмечается противовирусное действие TiO_2 -нанокompозитов на модели культуры клеток, инфицированных вирусом гриппа. Было установлено, что нанокompозиты на основе данного оксида проявляют ярко выраженный антивирусный эффект. Проведенный анализ делает изучение дисперсных систем, содержащих твердую фазу оксида титана, очень актуальным.

Цель работы – получение и изучение свойств пен, содержащих оксид титана, в зависимости от pH среды и степени гидрофобизации частиц.

Для получения дисперсных систем (пен и эмульсий) используют оксиды различной химической природы, которые обычно подвергаются агрегированию в присутствии ПАВ и электролитов. Известно влияние радиуса частиц и фракционного состава исходных суспензий на устойчивость формируемых дисперсных систем. Зависимость радиусов частиц оксида кремния и краевых углов смачивания θ_w от концентрации гидрофобизатора (C_g) и электролита показана в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Зависимость радиусов частиц оксида кремния и краевых углов смачивания θ_w от концентрации гидрофобизатора (C_g) и электролита

Состав суспензии	$R_{\max}$, мкм	R_1 , мкм	R_2 , мкм (более 50 %)	θ_w	C_g , ммоль/л	n_g
1	2	3	4	5	6	7
2 %LudoxHS-40	14	8,5	12	42	40	2
2 %LudoxHS-40+0,1 моль/л NaCl	14	8,5	12	46	40	2
2 %LudoxHS-40 +0,01 моль/лNaCl	11,9	5,5	5	30	10	0,5
2 %LudoxHS-40 +0,1 моль/л NaCl	14,8	6,5	9	39	10	0,5

1	2	3	4	5	6	7
2 % Ludox HS-40 + 0,4 моль/л NaCl	9,73	6,5	4		10	0,5
2 % Аэросил-380 + 0,1 моль/л NaCl	14,8	8,5	12		10	0,5
2 % Аэросил-380 + 0,4 моль/л NaCl	21	10	15	49	10	0,5

П р и м е ч а н и е : $R_{\max}$, R_1 , R_2 – максимальный, средний и радиус частиц во фракциях с содержанием более 50 %.

Как видно из табл. 1, повышение степени гидрофобизации людокс от 0,5 до 2 при одинаковой концентрации электролита увеличивало значение краевого угла смачивания от 39° до 46° . Изменение краевых углов оттекания воды в суспензиях следующего состава: 2 % людокс с добавкой электролита и без него – на границах раздела вода – воздух и вода – октан подробно рассмотрено в работе [14]. Приведенные значения средних радиусов частиц, определенные седиментационным анализом, изменялись от 5,5 до 8,5 мкм в суспензиях людокс при изменении концентрации электролита и гексилamina (см. табл. 1). Очевидно, что пленки толщиной 12,9 мкм и 13,1 мкм, полученные из суспензий составов 2 % и 20 % людокс ($C_g = 55$ ммоль/л и 22 ммоль/л гексилamina, $C_{\text{NaCl}} = 0,1$ моль/л), образованы двумя слоями гидрофобизованных частиц. Подобная структура пленок сохраняется при изменении степени гидрофобизации поверхности 20 % людокс от 0,055 до 0,22 ммоль/г. Такие пленки при утоньшении полностью разрушаются, объемные пены также малоустойчивы. Отметим, что при дальнейшем повышении степени гидрофобизации поверхности устойчивость пен возрастала, что обусловлено гелеобразованием в пенных пленках. Повышение степени гидрофобизации аэросила с массовым содержанием твердой фазы 2-4 % приводило к росту среднего радиуса агрегированных частиц и устойчивости пен. Например, при повышении степени гидрофобизации поверхности от 1,85 до 2,45 ммоль/г процент разрушения пенного слоя снижался от 70 до 45 %. Как видно из табл. 1, средний радиус частиц 2 % аэросила составлял 8,5 и 10 мкм при $C_{\text{NaCl}} = 0,1$ моль/л и 0,4 моль/л соответственно и малой степени гидрофобизации (0,5 ммоль/г). Агрегации аэросила при степени гидрофобизации поверхности 2,5 ммоль/г уже соответствуют средние радиусы частиц 65-70 мкм, пленки толщиной более 100 мкм и высокоустойчивые пены. Пены с содержанием аэросила 2 % и $n_g = 0,9-2,75$ очень устойчивы и существуют несколько месяцев при условии отсутствия каких-либо внешних воздействий. При увеличении концентрации гексилamina до 60 мМ ($n_g = 3$) время жизни пен снижалось до 2 суток, а при дальнейшем росте концентрации гексилamina ($n_g \geq 4,75$) пены разрушались мгновенно. Одной из причин ускоренного разрушения считали рост радиуса агрегатов выше 100 мкм [6]. Таким образом, существует определенное значение степени гидрофобизации поверхности, превышение которого делает пену неустойчивой. Для пен, полученных из более концентрированных суспензий, например 4 % SiO_2 , при увеличении степени гидрофобизации поверхности до $n_g = 1,63$ наблюдается переход пены в гель, который в гравитационном поле живет сколь угодно долго. Но при дальнейшем увеличении количества гидрофобизатора (для 4 % > 120 мМ, n_g более 3) вязкость системы начинает снижаться, и в результате образуется подвижная суспензия, при встряхивании которой получается объемная, но быстро разрушающаяся пена [17]. Устойчивость пен из кремнезема может сильно снижаться при увеличении относительной степени гидрофобизации $n_g \geq 3$ как вследствие роста средних радиусов частиц до 100 мкм, так и по причине снижения вязкости суспензии [17]. Необходимо отметить, что для указанных форм оксида кремния изоэлектрическая точка и точка нулевого заряда соответствуют значению водородного показателя $\text{pH} = 1,8-2,2$ [18].

При $\text{pH} < 2$ частицы заряжены положительно, а при $\text{pH} > 2$ – отрицательно. При добавлении гексилamina к суспензиям кремнезема (даже в самых малых количествах) значения водородного показателя соответствовали щелочной области. В частности, в суспензиях людокс с массовым содержанием кремнезема 3 % и при концентрациях гидрофобизатора 10; 20; 40 ммоль/л $\text{pH} = 8, 10, 11$ соответственно. То есть во всех

опытах взаимодействие гексилamina происходило с отрицательно заряженной поверхностью кремнезема.

Исследование устойчивости пен, содержащих оксид титана, показало существенную зависимость возможности образования и времени жизни данных дисперсных систем от водородного показателя. Наиболее устойчивые системы образовывались только при значении водородного показателя $pH=5$, который близок к изоэлектрической (и.э.т.) точке оксида. Значение и.э.т. составляет 6,3 и 5,8 ($\pm 0,2$) при изменении концентрации электролита KNO_3 от 0,001 до 0,1 моль/л [15]. Зависимость величины электрокинетического потенциала золя оксида титана (в форме анатаза) от pH при добавлении 0,2 М раствора гидроксида лития была проанализирована в [16]. Установлено, что при повышении pH золь меняет заряд (противоион H^+ меняется на OH^-) и проходит через изоэлектрическую точку при $pH=5$. Очевидно, что повышение pH выше изоэлектрической точки не только приводит к перезарядке поверхности, но и может сопровождаться пептизацией. Подобным образом наиболее устойчивые дисперсные системы образовывались при значении водородного показателя, который близок к изоэлектрической точке гидроксида алюминия. Известно, что растворы солей алюминия (сульфат алюминия, хлорид алюминия) образуют золи различного заряда при изменении реакции среды. В частности, при добавлении щелочи до $pH = 5$ образуется золь гидроксида алюминия. Точка нулевого заряда частиц $Al(OH)_3$, приготовленных выщелачиванием водорастворимых солей алюминия, равна 6,7 [19]. Отметим также, что пены получались только при добавлении масляной кислоты к раствору сульфата алюминия и дальнейшем изменении pH до 4,8-5 двумолярным раствором гидроксида натрия [17].

В табл. 2 представлены устойчивые пены, стабилизированные оксидом титана, полученные при $pH = 5$ и возрастании относительной гидрофобизации поверхности от 0,38 до 1,27 ммоль/г.

Т а б л и ц а 2

Устойчивость пен, содержащих оксид титана

Массовое содержание оксида титана, %	Степень относительной гидрофобизации поверхности n_g , ммоль/г	Время жизни, сут	Высота столба пены, см
19,2	0,399	4-7	1
20	0,38	3	1
10	0,76	3	2
6	1,27	3	0,7

При повышении степени гидрофобизации поверхности до 4,6 ммоль/г и таком же значении pH пенообразование было незначительным ($h=0,2$ см), а время жизни слоя $t \approx 10$ с. Методом седиментации изучено распределение частиц по размерам, которые образуются при взаимодействии оксида титана с гексилamiном в средах с различными значениями водородных показателей.

Т а б л и ц а 3

Радиусы частиц гидрофобизованного оксида титана.

Состав суспензии: TiO_2 (0,736 % масс.) + 7,5 ммоль/л гексилamina, $n_g=1$ ммоль/г

№	pH	R_{min}	R_{max}	R_{cp}
1	2-3	4,3	13	8,65
2	5	2	11,8	6,9
3	9,5-10	1-2	21	11
4	2-3 электролит	2	9,2	5,6

Для объяснения возможных причин значительного изменения устойчивости пен, содержащих оксид титана, с изменением водородного показателя было изучено рас-

пределение частиц методом седиментационного анализа. Установлено, что при значении водородного показателя 9,5 доля частиц радиусом 2 мкм и менее составляла 25 %, одновременно максимальный и средний радиусы составляли 21 и 11 мкм соответственно; значение краевого угла смачивания частиц было равно $40,75^\circ$. В работах [17, 20, 21] представлен анализ влияния размера частиц на устойчивость пен. Показано, что мелкие частицы твердых веществ не приводят к формированию устойчивых пен, как и частицы больших размеров. Кроме того, установлено [4], что максимальная устойчивость тонких слоев пены, полученной из суспензии, включающей людокс и гексилламин, соответствует гелеобразованию в пенной пленке и наблюдается при максимальной степени гидрофобизации твердых частиц, соответствующей краевому углу 46° . Необходимо подчеркнуть, что гидрофобизация частиц людокса гексилламином, превышающая краевой угол 50° , сопровождалась коагуляцией и не приводила к образованию устойчивых пен. Подобный результат наблюдался и при гидрофобизации частиц аэросила. Вероятно, отсутствие гелеобразования в дисперсионной среде пен, образованных гидрофобным оксидом титана, не приводит к повышению их устойчивости даже при больших значениях краевого угла смачивания.

При pH=5 и 2 максимальные и средние радиусы были меньше ($r_{\max} = 11,8$ и 13 , $r_a = 6,9$ и $8,5$ соответственно) по сравнению с размерами частиц в щелочной среде, однако низкие ($14,68^\circ$) значения краевого угла их смачивания при pH = 2 могут являться причиной малой устойчивости пен в кислой среде.

В частности, при значениях водородного показателя 2 и 3 и повышении степени гидрофобизации от 0,15 до 4,6 ммоль/г пенообразование было незначительным (высота столба пены составляла 0,1-0,2 мм), а время ее жизни не превышало 10 минут. Кроме того, положительный заряд поверхности оксида титана в кислых средах, возможно, не обеспечивает химического взаимодействия с ПАВ – гидрофобизатором.

Таким образом, было установлено, что устойчивые пены, содержащие оксид титана, могут быть получены только при значениях водородного показателя pH = 5. Низкие значения краевого угла смачивания частиц-стабилизаторов ($\Theta=14,68^\circ$) при pH = 2 могут являться причиной малой устойчивости пен в кислой среде.

Список литературы

1. Aveyard, R. Emulsions stabilized by solely colloidal particles / R. Aveyard, B.P. Binks, J. Clint // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2003. – Vol. 100–102. – P. 503–546.
2. Binks, B.P. Phase inversion of particle-stabilized materials from foams to dry water / B.P. Binks, R. Murakami // *Nature Materials.* – 2006. – Vol. 5. – P. 865–869.
3. Kruglyakov, P.M. About mechanism of foam stabilization by solid particles / P.M. Kruglyakov, S.I. Elaneva, N.G. Vilkova, S.I. Karakashev // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2011. – Vol.165, N. 2. – P. 108–116.
4. Vilkova, N.G. Foam films from hexylamine stabilized by the silica particles / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, P.M. Kruglyakov, S.I. Karakashev // *Mendelevov Communication.* – 2011. – Vol.21, N 6. – P. 344–345.
5. Vilkova, N.G. Effect of hexylamine concentration on the properties of foams and foam films stabilized by ludox / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, S.I. Karakashev // *Mendelevov Communication.* – 2012. – Vol.22, N 4. – P. 227–228.
6. Вилкова, Н.Г. Влияние гидрофобности частиц кремнезема на устойчивость пен и пенных пленок / Н.Г. Вилкова, С.И. Еланева // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология.* – 2013. – Т. 56, № 9. – С. 62–66.
7. Kaptey, G. On the equation of the maximum capillary pressure induced by solid particles to stabilize emulsions and foams and on the emulsion stability diagrams / G. Kaptey // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* – 2006. – Vol.282–283. – P. 387–401.

8. Kruglyakov, P.M. Hydrophile-lipophile balance of surfactants and solid particles. Physicochemical aspects and applications / P.M. Kruglyakov. – Amsterdam: Elsevier, 2000. – 391 p.
9. Zhao, G. Stability mechanism of a novel three-phase foam by adding dispersed particle gel / G. Zhao, C. Dai, D. Wen, J. Fang // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* – 2016. – Vol.497. – P. 214–224.
10. Lili, G. Separation of dispersed carbon nanotubes from water: effect of pH and surfactants on the aggregation at oil/ water interface / G. Lili, Y. Huayi, Z. Hua, M. Xuhui // *Separation and Purification Technology*. – 2014. – Vol.129, N 29. – P. 113–120.
11. Karhu, M. Enhanced DAF in breaking up oil-in-water emulsions / M. Karhu, T. Leiviskä, J. Tanskanen // *Separation and Purification Technology*. – 2014. – Vol.122. – P. 231–241.
12. Apichay, B. Cutting oil removal by continuous froth flotation with packing media under low interfacial tension conditions / B. Apichay, P. Orathai, N. Suchaya, C. Jittipan // *Separation and Purification Technology*. – 2013. – Vol.107, N 2. – P. 118–128.
13. Emrani, A.S. An experimental study of nanoparticle-polymer-stabilized CO₂ foam / A.S. Emrani, H.A. Nasr-El-Din // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2017. – Vol.524. – P. 17–27.
14. Вилкова, Н.Г. Влияние электролита на снижение межфазного натяжения и изменение краевого угла смачивания / Н.Г. Вилкова, А.В. Нуштаева, Л.С. Горбунова // *Известия вузов. Поволжский регион. Естественные науки*. – 2014. – №1 (5). – С. 52–59
15. Русакова, С.М. / Изучение свойств TiO₂ в контексте решения научно-практических проблем промышленного производства / С.М. Русакова, И.Г. Горичев, И.В. Артамонова, Е.О. Забенькина // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2010. – №2 (10). – С. 179–185.
16. Бессуднова, Е.В. Синтез и исследование наноразмерных частиц диоксида титана для применения в катализе и нанобиотехнологиях: дис. ... канд. хим. наук / Е.В. Бессуднова. – Новосибирск: Институт катализа им. Г. К. Борескова, 2014.
17. Мишина, С.И. Исследование устойчивости и синерезиса пен, стабилизированных частицами коллоидального кремнезема и гидроксида алюминия: дис. ... канд. хим. наук / С.И. Мишина. – М.: Московский государственный университет тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, 2013.
18. Айлер, Р.К. Химия кремнезема: Растворимость, полимеризация, коллоидные и поверхностные свойства, биохимия: пер. с англ / Р.К. Айлер; ред. пер. В.П. Прянишников. – М.: Мир, 1982. – 416 с.
19. Kosmulski, M. The pH-dependent surface charging and the point of zero charge / M. Kosmulski // *Journal of Colloid Interface Sciences*. – 2002. – Vol.253. – P. 77–87.
20. Vilkova, N.G. Influence of hydrophobized solid particles on the reduction of the interfacial tension or surface tension / N.G. Vilkova, A.V. Nushtaeva // *Mendelev commun.* – 2013. – Vol.23. – N 3. – P. 155–156.
21. Вилкова, Н.Г. Агрегация гидрофобизованных частиц кремнезема и ее влияние на устойчивость образующихся дисперсных систем / Н.Г. Вилкова, В. Дорчина, А.А. Шумкина, М. А. Карев // *Региональная архитектура и строительство*. – 2014. – № 2 (19). – С. 30–35.

References

1. Aveyard, R. Emulsions stabilized by solely colloidal particles / R. Aveyard, B.P. Binks, J. Clint // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2003. – Vol. 100–102. – P. 503–546.
2. Binks, B.P. Phase inversion of particle-stabilized materials from foams to dry water / B.P. Binks, R. Murakami // *Nature Materials*. – 2006. – Vol. 5. – P. 865–869.
3. Kruglyakov, P.M. About mechanism of foam stabilization by solid particles / P.M. Kruglyakov, S.I. Elaneva, N.G. Vilkova, S.I. Karakashev // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2011. – Vol.165, N. 2. – P. 108–116.

4. Vilkova, N.G. Foam films from hexylamine stabilized by the silica particles / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, P.M. Kruglyakov, S.I. Karakashev // *Mendelev Communication*. – 2011. – Vol.21, N 6. – P. 344–345.
5. Vilkova, N.G. Effect of hexylamine concentration on the properties of foams and foam films stabilized by ludox / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, S.I. Karakashev // *Mendelev Communication*. – 2012. – Vol.22, N 4. – P. 227–228.
6. Vilkova, N.G. Influence of silica particles on foams and foam films stability / N.G. Vilkova, S.I. Elania // *Vestnik of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology*. – 2013. – Vol. 56, No. 9. – P. 62-66.
7. Kaptey, G. On the equation of the maximum capillary pressure induced by solid particles to stabilize emulsions and foams and on the emulsion stability diagrams / G. Kaptey // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2006. – Vol.282–283. – P. 387–401.
8. Kruglyakov, P.M. Hydrophile-lipophile balance of surfactants and solid particles. Physicochemical aspects and applications / P.M. Kruglyakov. – Amsterdam: Elsevier, 2000. – 391 p.
9. Zhao, G. Stability mechanism of a novel three-phase foam by adding dispersed particle gel /G. Zhao, C. Dai, D. Wen, J. Fang // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* – 2016. – Vol.497. – P. 214–224.
10. Lili, G. Separation of dispersed carbon nanotubes from water: effect of pH and surfactants on the aggregation at oil/ water interface / G. Lili, Y. Huayi, Z. Hua, M. Xuhui // *Separation and Purification Technology*. – 2014. – Vol.129, N 29. – P. 113–120.
11. Karhu, M. Enhanced DAF in breaking up oil-in-water emulsions / M. Karhu, T. Leiviskä, J. Tanskanen // *Separation and Purification Technology*. – 2014. – Vol.122. – P. 231–241.
12. Apichay, B. Cutting oil removal by continuous froth flotation with packing media under low interfacial tension conditions / B. Apichay, P. Orathai, N. Suchaya, C. Jittipan // *Separation and Purification Technology*. – 2013. – Vol.107, N 2. – P. 118–128.
13. Emrani, A.S. An experimental study of nanoparticle-polymer-stabilized CO₂ foam / A.S. Emrani, H.A. Nasr-El-Din // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2017. – Vol.524. – P. 17–27.
14. Vilkova, N.G. The effect of electrolyte on reducing interfacial tension and changing the wetting angle / N.G. Vilkova, A.V. Nushtaeva, L.S. Gorbunova // *News of universities. Volga region. Natural Sciences*. – 2014. – N 1 (5). – P. 52–59
15. Rusakova, S.M. / Studying the properties of TiO₂ in the context of solving scientific and practical problems of industrial production / S.M. Rusakova, I.G. Gorichev, I.V. Artamonova, E.O. Zabenkina // *News MGTU «MAMI»*. – 2010. – N2 (10). – P. 179–185.
16. Bessudnova, E.V. Synthesis and study of titanium dioxide nanoparticles for use in catalysis and nanobiotechnology: dis. ... cand. chemical sciences. – Novosibirsk: Institute of Catalysis G. K. Boreskova, 2014.
17. Mishina, S.I. Investigation of the stability and syneresis of foams stabilized by particles of colloidal silica and aluminum hydroxide: dis. ... cand. chemical sciences. – M.: Moscow State University of Fine Chemical Technologies named after M.V. Lomonosov, 2013.
18. Ailer, R.K. Chemistry of silica: Solubility, polymerization, colloidal and surface properties, biochemistry: translation from English / R.K. Ailer; editorial translation by V.P. Pryanishnikov. – M.: Mir, 1982. – 416 p.
19. Kosmulski, M. The pH-dependent surface charging and the point of zero charge / M. Kosmulski // *Journal of Colloid Interface Sciences*. – 2002. – Vol.253. – P. 77–87.
20. Vilkova, N.G. Influence of hydrophobized solid particles on the reduction of the interfacial tension or surface tension / N.G. Vilkova, A.V. Nushtaeva // *Mendelev commun*. – 2013. – Vol.23. – N 3. – P. 155–156.
21. Vilkova, N.G. Aggregation of hydrophobic silica particles and its effect on the stability of the resulting dispersed systems / N.G. Vilkova, O.V. Dorchina, A.A. Shumkina, M.A. Karev // *Regional architecture and engineering*. – 2014. – N 2 (19). – P. 30–35.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК [72+69] : 620.91 – 049.35

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Береговой Александр Маркович,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Городское
строительство и архитектура»
E-mail: ambereg@rambler.ru

Береговой Виталий Александрович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: vabereg@rambler.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Beregovoy Aleksander Markovich,
Doctor of Sciences,
Professor of the department «Urban
construction and Architecture»
E-mail: ambereg@rambler.ru

Beregovoy Vitaliy Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Technology of building materials
and wood processing»
E-mail: vabereg@rambler.ru

СИСТЕМА ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ В ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ БИОДОМА

А.М. Береговой, В.А. Береговой

На основе трех систем уравнений исследовался механизм взаимосвязей естественной вентиляции, экологических показателей внутренней воздушной среды и других факторов влияния в единой энергетической системе здания: воздухопроницаемости и влажностного состояния наружных ограждений, теплового режима помещений. Первая система уравнений дает оценку влияния механизма вентиляции и продолжительности солнечной инсоляции на экологические показатели воздушной среды. Взаимосвязь воздухопроницаемости наружных ограждений с поступающим объемом приточного воздуха и получаемый при этом эффект энергосбережения показаны на основе второй системы уравнений. Третья система используется для случая, когда слабофункционирующая естественная вентиляция помещений приводит не только к ухудшению экологического состояния воздуха помещений, но и к накоплению в материале наружных ограждений капельно-жидкой влаги, что при наступлении похолодания и фазовых переходах влаги приводит к дополнительным тепловым потерям.

Ключевые слова: биодом, естественная вентиляция, экологические и теплоэнергетические параметры воздуха, единая энергетическая система здания, наружные ограждения, воздухопроницаемость, влажностное состояние, тепловые потери

SYSTEM OF NATURAL VENTILATION, ECOLOGICAL AND HEAT-ENERGY PARAMETERS IN THE UNIFIED ENERGY SYSTEM OF THE BIOHOUSE

A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy

Based on the use of three systems of equations, the mechanism of interconnection of the natural ventilation system with the ecological indicators of the internal air, as well as with other factors, influencing the unified energy system of the building: air permeability and the humidity condition of the outer enclosures, thermal conditions of the rooms was studied. The first system of equations gives the estimate of the influence of the ventilation system and the duration of solar insolation on the ecological indicators of air environment. The relationship of the air permeability of outer enclosures with the incoming supply air volume and the resulting energy-saving effect are shown on the basis of the second system of equations. The third system is used for the case, when poorly functioning natural ventilation of the rooms leads not only to deterioration of the environmental condition of the indoor air, but also to accumulation of drip liquid moisture in the outer enclosures, that with the onset of cold snap and moisture phase transitions leads to additional heat losses.

Keywords: biodome, natural ventilation, ecological and heat-energy parameters of air, unified energy system of a building, outer enclosures, air permeability, moisture state, heat loss

В проекте экологически чистого здания, так называемого биодома с признаками энергоэффективного здания, должны быть учтены требования по созданию комфортных условий микроклимата помещений и минимальному расходу энергоресурсов. Если первое требование не обеспечивается, то здание имеет признаки синдрома «больного» здания («Sick house»). Результаты многочисленных исследований отечественных и зарубежных специалистов указывают, что этому синдрому подвержена почти половина эксплуатируемого массива жилых и значительная часть общественных зданий.

В [1–3] отмечается, что основными причинами этого являются несбалансированность системы вентиляции с тепловым режимом помещений, присутствие в их воздушной среде загрязняющих и токсических веществ. Однако анализ опубликованных результатов исследований и нормативов по санитарно-экологическому сопровождению объектов указывает на более сложный характер взаимосвязей экологических, теплоэнергетических параметров, показателей системы вентиляции и климатических факторов в единой энергетической системе здания (ЕЭС) [4–9].

Цель проведенного исследования заключалась в дальнейшем развитии представлений о взаимосвязи экологических показателей внутренней воздушной среды с другими факторами влияния ЕЭС: системой вентиляции, воздухопроницаемостью и влажностным состоянием наружных ограждений, тепловым режимом помещений.

Механизм взаимосвязи факторов ЕЭС исследовался путем использования трех систем уравнений.

- Экологическое состояние воздушной среды

$$K_{ui} = \sum_{j=1}^n g_{ij}, \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n. \quad (1)$$

где k_{ij} – локальные критерии эффективности в виде безразмерных величин.

В оценке критерия K_{ui} , обеспечивающего функционирование ЕЭС при наименьших энергетических затратах и формирование комфортных условий микроклимата помещений, следует учитывать экологическую составляющую Z :

$$Z = f(Z_{en}(k_1, \dots, k_n), \dots, Z_{ec}(k_1, \dots, k_n)), \quad (2)$$

где Z_{en} и Z_{ec} – целевые функции соответственно энергетических и экологических подсистем ЕЭС здания.

С учетом коэффициентов весомости α_j целевую функцию экологической подсистемы ЕЭС здания можно представить в следующем виде:

$$Z_{ec} = \sum_{j=1}^n g_j^{ec} k_j^{ec}, \quad (3)$$

где, в соответствии с составом документов санитарно-экологического паспорта строительной продукции, $k_{пр}^{ec}$ – поток радона; k_x^{ec} – концентрация вредных химических веществ в воздушной среде помещений; k_m^{ec} – параметры микроклимата, k_p^{ec} – содержание радионуклидов в строительных материалах, изделиях, грунтах; k_γ^{ec} – уровень γ -излучения после завершения отделочных работ; $k_{ш}^{ec}$ – шум и вибрация от инженерного оборудования; k_o^{ec} – естественная и искусственная освещенность.

• Система естественной вентиляции и воздухопроницаемость наружных ограждений

$$k_{вент} = 0,28c(L_{вент} \rho_v^{вент} n_{вент} (1 - k_{эф}) + G_{инф} n_{инф}) / (168V_{от}); \quad (4)$$

здесь $k_{вент}$ – удельная вентиляционная характеристика здания.

$$\Delta Q_{вент} = 0,28 \cdot \Delta w_{вент} \cdot \gamma_n \cdot c_v \cdot (t_v - t_n), \quad (5)$$

где $\Delta Q_{вент}$ – количество тепла, уходящего на подогрев холодного вентиляционного воздуха,

$$\Delta w_{вент} = w_{вент} - w \quad w = \Delta P / \sum R_{и}, \quad (6)$$

$$\tau_v = t_n + (t_v - t_n) \cdot \frac{e^{c_n \cdot w \cdot R} - 1}{e^{c_v \cdot w \cdot R_0} - 1}, \quad (7)$$

$$q_u = \frac{c_v \cdot w \cdot e^{c_v \cdot w \cdot R}}{e^{c_v \cdot w \cdot R_0} - 1} \cdot (t_v - t_n), \quad (8)$$

$$t_n < \tau < t_v, \quad (9)$$

где τ_v и q_v – температура и тепловой поток на внутренней поверхности наружного ограждения при инфильтрации; $w_{инф}$ – количество инфильтрующегося воздуха через пористую структуру материала наружного ограждения.

• Влажностное состояние наружных ограждений

$$c \cdot \gamma_0 \cdot \frac{\partial t}{\partial z} = \text{div}(\lambda \cdot \nabla t) + \frac{\xi_{жл}}{1 - \xi_{жл}} \cdot r \cdot \gamma_0 \cdot \frac{\partial u_{ж}}{\partial z}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \text{div}(a_m \cdot \nabla u_{ж} + a_m \cdot \delta \cdot \nabla t), \quad (11)$$

$$r \cdot i \cdot u_{ж} \cdot \gamma_0 \cdot \frac{d\delta_3}{dz} = \lambda_3 \cdot \frac{\partial t_3}{\partial x} - \lambda_v \cdot \frac{\partial t_v}{\partial x}, \quad (12)$$

$$\lambda_3 \cdot \frac{t_3 - t_n}{\delta_3} - \lambda_v \cdot \frac{t_v - t_3}{\delta - \delta_3} = 0. \quad (13)$$

В первой системе уравнений по экологическому состоянию воздушной среды в соответствии с санитарно-экологическим паспортом объекта дается перечень экологических показателей, в дополнение к которым имеет смысл добавить еще два локальных критерия: $k_{мф}$, оценивающий количество микрофлоры, в том числе болезнетвор-

ной, в воздушной среде, и $k_{инс}$, показывающий продолжительность инсоляции помещения. На величину первого показателя основное влияние оказывают два фактора. Во-первых, он находится в обратной зависимости от второго, непосредственно связанного с архитектурно-строительным решением здания, ориентацией и светопропускаемостью лучепрозрачных ограждений, степенью их затенения. Ультрафиолетовый диапазон прямых солнечных лучей оказывает обеззараживающее действие на микроорганизмы в воздушной среде. Во-вторых, поскольку болезнетворная микрофлора обычно накапливается в плохо вентилируемых, застойных зонах помещений, то качество работы системы вентиляции здания непосредственно влияет на показатель состояния воздушной среды $k_{мф}$, оценивающий количество микрофлоры. Кроме того, кратность воздухообмена в помещениях связана также с экологическими показателями по потоку радонового газа $k_{пр}^{ec}$ и по концентрации вредных химических веществ k_x^{ec} .

Устройство эффективно функционирующих продухов в подпольях, подвальных помещениях, а также приточных и вытяжных отверстий в помещениях обеспечивает вынос диффундирующего из грунта радонового газа и пыли с осажденными электрически заряженными атомами радона и его дочерних продуктов в атмосферу.

При проектировании экодума целесообразно руководствоваться показателем насыщенности помещения полимерными материалами $\xi = f/V$, m^2/m^3 , где f и V – соответственно площадь отделки поверхностей этими материалами и объем помещения. Опубликованные результаты натурных обследований показывают следующее:

- увеличение показателя ξ на 0,5 вызывает возрастание концентрации основных химических веществ в воздухе помещений в 2 и более раза;
- в жилых помещениях при $\xi = 1,35$ увеличиваются концентрации этилбензола, фенола, формальдегида, стирола и других веществ в несколько раз больше ПДК.

Во второй системе уравнений показана взаимосвязь системы вентиляции, оказывающей непосредственное влияние на экологическое состояние внутренней воздушной среды, с теплоэнергетическими параметрами ЕЭС здания и воздухопроницаемостью наружных ограждений.

В нормативной формуле (4) удельной вентиляционной характеристики здания $k_{вент}$, Вт/($m^3 \cdot ^\circ C$), определяется количество инфильтрующегося воздуха в здание $G_{инф}$, кг/ч, с учетом требуемого сопротивления воздухопроницанию окон, балконных дверей и входных наружных дверей, а также количество приточного воздуха $L_{вент}$, $m^3/ч$. Формула (5) показывает расход тепла $\Delta Q_{вент}$ на нагревание здания, который при холодной температуре наружного воздуха может достигать 50 % и более от тепловой потребности помещения.

Однако в нормативной методике расчета вентиляционной характеристики $k_{вент}$ не учитывается процесс теплообмена противоточных потоков тепла и холодного воздуха, происходящий в массиве наружного ограждения, что приводит к завышению показателя $\Delta Q_{вент}$. Последний можно уменьшить, если учесть экономайзерный эффект, возникающий в пористой структуре материала наружного ограждения при инфильтрации воздуха [10]. Количество инфильтрующегося воздуха w , кг/($m^2 \cdot ч$), а также температура τ_v и тепловой поток q_v на внутренней поверхности наружного ограждения определяются по формулам (6)-(8). Формула (9) показывает, что температура воздуха, поступающего с внутренней поверхности ограждения, будет больше, чем температура холодного приточного воздуха в системе естественной вентиляции, но меньше по сравнению с внутренним воздухом.

Подогретый при инфильтрации в результате экономайзерного эффекта воздух в количестве $w_{вен}$, кг/($m^2 \cdot ч$), уменьшает как необходимое количество наружного воздуха в системе вентиляции здания на величину $\Delta w_{вен}$, кг/($m^2 \cdot ч$), так и количество тепла на его подогрев.

По результатам расчетного моделирования экономия тепла для жилой комнаты с наружной стеной из керамзитобетона плотностью 900 кг/ m^3 в 12-этажном здании может достигать 10 %, а в 2-этажном – около 3 %.

Третья система уравнений для решения поставленной задачи исследования используется в том случае, когда слабофункционирующая вентиляция помещений приводит не только к ухудшению экологического состояния воздуха помещений, но и к накоплению в материале наружных ограждений капельно-жидкой влаги.

С наступлением периода низких температур в наружном слое увлажненных конструкций возникает подвижная граница промерзания толщиной δ_3 .

Уравнения (10)-(12) для однослойной конструкции по Лыкову А.В. и Богословскому В.Н. описывают тепло- и массоперенос при отсутствии фильтрационного движения и процесс выделения тепла льдообразования на границе мерзлой и влажной зон, а уравнение (13), значительно упрощающее данный механизм тепло- и массопереноса, показывает тепловой баланс на этой границе исходя из условий стационарной теплопередачи. Из последнего уравнения можно определить приближенное значение коэффициентов теплопроводности мерзлой и влажной зон λ_3 и λ_v , а затем оценить величину тепловых потерь через конструкцию ограждения [11].

Результаты расчета показали, что через наружную стену из кирпичной кладки и такую же конструкцию с вентилируемой воздушной прослойкой под сайдингом в случае указанных фазовых переходов влаги тепловые потери превышают найденные по стандартной методике соответственно на 11 и 16 %.

Таким образом, рассмотрение факторов единой энергетической системы биодома на основе систем уравнений по экологическому состоянию воздушной среды, показателям естественной вентиляции и теплозащитным характеристикам наружных ограждающих конструкций позволяет улучшить качество внутреннего воздуха, повысить энергосбережение в здании, имеющем наружные ограждения с «дышащей» структурой материала, оценить рост тепловых потерь через эти конструкции при фазовых переходах влаги.

Список литературы

1. Свод правил СП 60.13330.2012 «СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» (утв. приказом Министерства регионального развития РФ от 30 июня 2012 г. N 279). Heating, ventilation and conditioning Дата введения 1 января 2013 г. – URL: <https://www.kantiana.ru/upload/iblock/78b/sp-60.13330.2012.pdf> (дата обращения: 04.04.2019).
2. АВОК. Стандарт. Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена. Переиздание АВОК. Стандарт-1-2002 с дополнениями и изменениями. НП «Инженеры по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строительной теплофизике» (НП «АВОК») Москва – 2004. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/44/44812/> (дата обращения: 04.04.2019).
3. Береговой, А.М. Наружные ограждающие конструкции в системе воздухообмена жилого многоэтажного здания / А.М. Береговой, М.А. Дерина // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: www.science-education.ru/121-17257 (дата обращения: 04.02.2015).
4. ТСН – 2001.5 – 11. Сборник 11. Экологическое сопровождение объектов строительства и составление санитарно-экологического паспорта. Сборник строительных нормативов (на основе сборника МТСН 81.5-11-98). – URL: <http://goct.info/Data1/50/50176/index.htm> (дата обращения: 15.02.15 г.).
5. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). – URL: <http://dom.dacha-dom.ru/gas-radon.shtml> (дата обращения: 18.02.15).
6. Гигиеническое значение микрофлоры воздуха. – URL: <http://www.my-ref.net/gigienicheskoe-znachenie-mikroflory-vozduha/> (дата обращения: 25.02.15).
7. Губернский, Ю.Д. Жилище для человека. Раздел 7. Критерии световой среды жилища / Ю.Д. Губернский, В.К. Лицкевич. – URL: <http://www.bibliotekar.ru/zhilishe/8.htm> (дата обращения: 25.02.15).

8. Наша опасная квартира // Безопасность жизнедеятельности. – 2006. – №11. – URL: <http://www.mikrasna.narod.ru/russian/dangerous.htm> (дата обращения: 22.02.2015).
9. Береговой, А.М. Энергоэкономичные и энергоактивные здания в архитектурно-строительном проектировании / А.М. Береговой, А.В. Гречишкин, В.А. Береговой. – 3-е изд., перераб. и доп. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 200 с.
10. Береговой, А.М. Строительные материалы и наружные ограждающие конструкции зданий повышенной тепловой эффективности / А.М. Береговой, В.А. Береговой, А.В. Мальцев, А.В. Гречишкин, М.А. Дерина. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 180 с.
11. Береговой, А.М. Эффект энергосбережения в помещении с естественной вентиляцией в условиях инфильтрации воздуха через наружную стену / А.М. Береговой, А.В. Мальцев, М.А. Дерина, А.В. Гречишкин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №3. – С. 140–144.

References

1. The code of rules SP 60.13330.2012 «SNiP 41-01-2003. Heating, ventilation and air conditioning» (approved by order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation dated June 30, 2012 N 279). Entered on January 1, 2013 – URL: <https://www.kantiana.ru/upload/iblock/78b/sp-60.13330.2012.pdf> (access date: 04/04/2019).
2. AVOK .Standard. Residential and public buildings. Air exchange rates. Reprint AVOK. Standard-1-2002 with additions and changes. NP «Engineers for Heating, Ventilation, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics» (NP «AVOK») Moscow-2004. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/44/44812/>(access date: 04/04/2019).
3. Beregovoy, A.M. External enclosing structures in the air exchange system of a residential high-rise building / A.M. Beregovoy, M.A. Derina // Modern Problems of Science and Education. – 2015. – № 1. – URL: [www.science-education.ru / 121–17257](http://www.science-education.ru/121-17257) (access date: February 4, 2015).
4. TSN – 2001.5 – 11. Sourcebook of 11. Environmental support of construction projects and preparation of sanitary and ecological passports. A collection of building codes (based on the collection of MTSN 81.5–11–98). – URL: <http://goct.info/Data1/50/50176/index.htm> (access date: 15.02.15).
5. SP 2.6.1.2612–10. Basic sanitary rules for ensuring radiation safety (OSPORB 99/2010). – URL: <http://dom.dacha-dom.ru/gas-radon.shtml> (access date: February 18, 2015)
6. Hygienic value of air microflora.– URL: <http://www.my-ref.net/gigienicheskoe-znachenie-mikroflory-vozduha/> (access date: 25.02.15).
7. Gubernsky, Yu.D. Residence for man / Yu.D. Gubernsky, V.K. Litskevich. – M.: Stroiizdat. Section 7. Criteria for the light environment of the home. – URL: <http://www.bibliotekar.ru/zhilishe/8.htm> (access date: 02/25/15).
8. Our dangerous apartment // Life Safety. – 2006. – №11.– URL: <http://www.mikrasna.narod.ru/russian/dangerous.htm> (access date: 02.22.2015).
9. Beregovoy, A.M. Energy-efficient and energy active buildings in architecture and building engineering / A.M. Beregovoy, A.V. Grechishkin, V.A. Beregovoy. – 3-e edition., revised and enlarged. – Пенза: State University of Architecture and Construction, 2012. – 200 p.
10. Beregovoy, A.M. Building materials and external enclosing structures of buildings with increased thermal efficiency / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy, A.V. Maltsev, A.V. Grechishkin, M.A. Derin. – Пенза: PGUAS, 2014.– 180 p.
11. Beregovoy, A.M. The effect of energy saving in room with natural ventilation in terms of air infiltration through exterior wall / A.M. Beregovoy, A. V. Maltsev, M.A. Derina, A.V. Grechishkin // Regional architecture and engineering. – 2013. – №3. – P. 140–144.

УДК [72+69] : 620.91 – 049.35

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Береговой Александр Маркович,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Городское
строительство и архитектура»
E-mail: ambereg@rambler.ru

Береговой Виталий Александрович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: vabereg@rambler.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Beregovoy Aleksander Markovich,
Doctor of Sciences,
Professor of the department «Urban
construction and Architecture»
E-mail: ambereg@rambler.ru

Beregovoy Vitaliy Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Technology of building materials
and wood processing»
E-mail: vabereg@rambler.ru

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В РАЗНОТИПНЫХ ЗДАНИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

А.М. Береговой, В.А. Береговой

Определены подходы к энергосбережению в четырех группах зданий городской застройки: энергоактивного типа, с ориентацией на господствующий ветер в холодное время года, небольшой этажности после длительного срока эксплуатации, с ограждающими конструкциями, имеющими различное значение тепловой инерции.

Для первой группы зданий предложен критерий энергосбережения с использованием возобновляемых источников энергии и соответствующее дополнение к нормативной формуле по определению расчетной удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания. Представлены результаты исследований по использованию упрощенной конструкции плоского солнечного коллектора в малоэтажном здании, рассмотрено влияние размеров подземного пространства на эффективность использования тепла грунта. Для второй группы зданий дано обоснование по учету результатов расчета экономайзерного эффекта в методе по определению влияния инфильтрации воздуха на их тепловую потребность. В зданиях третьей группы предложено учитывать тепловые потери в процессе эксфильтрации воздуха через наружные ограждения верхнего этажа. Для четвертой группы зданий показано влияние тепловой инерции ограждающих конструкций на теплотери здания в период резкого похолодания.

Ключевые слова: городская застройка, энергосбережение, инфильтрация и эксфильтрация воздуха, экономайзерный эффект, тепловая инерция конструкции, удельная характеристика расхода тепловой энергии

ENERGY SAVING IN MULTI-TYPE BUILDINGS OF URBAN DEVELOPMENT

A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy

The approaches to energy saving in four groups of buildings of urban development are defined: energy-active type with orientation to the prevailing wind in the cold season, with a small number of storeys after a long service life, with enclosing structures, having different thermal lag.

For the first group of buildings an energy saving criterion were proposed with the use of renewable energy sources and the corresponding addition to the normative formula for determining the calculated specific heat consumption for heating and ventilation of the building.

The results of studies on the use of a simplified construction of a flat solar collector in a low-rise building are presented, and the influence of the size of underground space on the efficiency of ground

heat utilization is considered. For the second group of buildings, a rationale was given for recording the results of the calculation of the economizer effect in the method for determining the effect of air infiltration on their heat demand. In buildings of the third group, it was proposed to take into account heat losses in the process of air exfiltration through the outer enclosures of the upper floor. For the fourth group of buildings the effect of thermal lag of enclosing structures on the heat loss of a building during a cold snap is shown.

Keywords: urban development, energy saving, infiltration and exfiltration of air, economizing effect, thermal lag of the structure, specific characteristic of heat energy consumption

Жилые массивы, состоящие во многих городах России из домов, построенных в 30-х и 40-х годах прошлого века, а также по типовым сериям 60-х годов, и более современных зданий, характеризуются разнообразием планировочных и конструктивных схем.

В зависимости от архитектурно-строительных решений, ориентации, интенсивности нестационарных воздействий окружающей среды здания, в том числе имеющие одинаковый уровень тепловой защиты, различаются удельной величиной потребления тепловой энергии. На эту величину влияют циклический характер изменений температуры наружного воздуха, ветра различных направлений, уровня солнечной радиации и не совпадающие по времени процессы нагрева-охлаждения наружной оболочки зданий жилого массива. Последний может быть обеспечен надежной системой автоматического регулирования тепла и состоять из нескольких характерных групп зданий [1]:

1 группа – архитектурно-строительное решение и ориентация зданий позволяют наружным ограждениям активно поглощать и передавать тепло солнечного излучения во внутренние помещения;

2 группа – наружные стены имеют небольшое сопротивление воздухопроницанию, а продольные фасады ориентированы на доминирующий ветер в холодное время года;

3 группа – дома небольшой этажности с длительным сроком эксплуатации;

4 группа – наружные ограждения имеют разную величину тепловой инерции при одинаковом сопротивлении теплопередаче.

Задача энергосбережения в этих условиях заключается в оценке величины тепловых потоков через наружные ограждения с целью перераспределения возможного избытка тепловой энергии из одних зданий в другие, испытывающие ее дефицит. Такую единую энергетическую систему из нескольких групп зданий по степени масштабности, разнообразию взаимозависимых факторов влияния на расход тепловой энергии можно классифицировать как сложную. Управление многоцелевыми сложными системами рассмотрено в [2].

В первой группе зданий эффективность использования возобновляемых источников энергии при определении теплопотерь можно оценить с помощью следующего критерия энергосбережения:

$$K_{hv}^{ren} = q_{hv}^{des} / q_{hv}^{ren}, \quad (1)$$

где q_{hv}^{des} – расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, Вт/(м³·°C) [3]; q_{hv}^{ren} – та же величина, но с учетом использования возобновляемых источников энергии, Вт/(м³·°C).

Для определения величины q_{hv}^{ren} необходимо добавить к правой части формулы по определению q_{hv}^{des} слагаемое k_{ren} , учитывающее применение возобновляемых источников энергии. В качестве них используется тепло солнечной радиации и земляного массива под зданием или в виде насыпи вокруг здания

$$q_{hv}^{des} = k_{hs} + k_v - \beta_{HUC} (k_{ih} + k_{rad} + k_{ren}), \quad (2)$$

где k_{hs} – удельная теплозащитная характеристика здания, Вт/(м³·°C); k_v – удельная вентиляционная характеристика здания, Вт/(м³·°C); β_{HUC} – коэффициент использования тепла; k_{ih} – удельная характеристика внутренних теплопоступлений в здание, Вт/(м³·°C); k_{rad} – удельная характеристика теплопоступлений в здание от солнечной

радиации, Вт/(м³·°C); k_{ren} – удельная характеристика теплопоступлений в здание от использования возобновляемых источников энергии, Вт/(м³·°C).

Применение возобновляемых источников энергии природной среды может принести наибольший эффект в проектном решении малоэтажного дома. Такие объемно-планировочные решения, повышающие тепловую эффективность многоэтажного здания, как увеличение этажности, ширины или длины корпуса, малоэффективны при разработке проекта одно-двухсемейного или блокированного дома с небольшим количеством квартир, который из функциональных соображений должен иметь относительно небольшие строительные объемы. С точки зрения компактности формы и теплопотерь малоэтажное здание, по сравнению с многоэтажным, имеет менее выгодный коэффициент компактности формы, характеризующий отношение площади наружных ограждающих конструкций к отапливаемому объему. Это приводит к значительному увеличению значения q_{hv}^{des} в зданиях малого объема строительства. В таких зданиях тепловая нагрузка традиционной системы отопления Q_h относительно невелика, и поэтому доля f тепла от возобновляемых источников энергии в общей величине Q_h будет значительно больше, чем в многоэтажном здании.

Результаты исследований по использованию тепла солнечного излучения с помощью упрощенной конструкции плоского коллектора с воздушным теплоносителем (ПСК) приведены в [4]. При использовании ПСК формула (2) приобретает вид:

$$q_{hv}^{des} = k_{hs} + k_v - \beta_{HUC} (k_{ih} + k_{rad} + k_{fsc}), \quad (3)$$

где k_{fsc} – удельная характеристика теплопоступлений в здание от плоского солнечного коллектора, Вт/(м³·°C).

Эффективность показателя k_{fsc} в работе [2] показана в виде доли f , %, от тепловой нагрузки здания в отопительный период. При общей площади модулей, равной 25 и 50 м², на южном фасаде жилого дома ($S_{общ} = 120$ м²) величина f по методу [5] составляет для климатических условий центральных регионов Российской Федерации 6,4 и 12,5 % соответственно. Для малоэтажного и многоэтажного зданий с тепловой нагрузкой 68 и 1057 КДж показатель f может составить соответственно 15 и 3,5 %.

В первой группе городской застройки могут быть здания с подземным этажом (подвалом). В эту часть здания можно перенести с надземных этажей ряд таких подсобных помещений, которые получают достаточный обогрев от тепла, поступающего со стороны земляного массива и цокольного перекрытия. Это позволит на стадии проектирования уменьшить площадь обогрева надземной части здания и его тепловую потребность.

Для надземной части обычного (не энергоактивного) здания наружные ограждающие конструкции в отопительный сезон являются теплопередающими поверхностями, тогда как для подземной части они воспринимают тепло земляного массива.

Анализ особенностей формообразования здания и поступления тепловых потоков в его подземные помещения позволил установить, что, в отличие от надземной части дома, снижение коэффициента компактности подземного пространства K^{us} является неблагоприятным фактором, влияющим на его тепловую эффективность, то есть $K^{us} = 1/K$ (где $K = S_{es} / V_{от}$; S_{es} – общая площадь наружных ограждающих конструкций, м²; $V_{от}$ – отапливаемый объем здания или помещения, м³) [4].

Наружные ограждающие конструкции во второй группе зданий имеют повышенную воздухопроницаемость, что, как известно, в условиях сильного температурно-ветрового напора может на 50-80 % увеличить их теплопотери.

В работе [6] предложены уравнение и метод определения теплопотерь через наружные ограждающие конструкции с учетом инфильтрации для группы однотипных зданий, расположенных в разных местах городской территории. Потери тепла Q_m для одного здания были представлены как

$$Q_m = F_b k_b \Delta t + F_n k_n \Delta t + V \Delta t c_v f. \quad (4)$$

Последнее слагаемое в уравнении (4) учитывает тепловые потери здания при инфильтрации.

Для группы аналогичных зданий предложено усредненное значение коэффициента $\dot{f}_1$, учитывающее фактическое изменение объемов воздуха,

$$\dot{f}_1 = \sum V_i f_i / \sum V_i, \quad (5)$$

где V_i – строительный объем соответствующего здания в группе, м³. Результаты расчетов показали, что разница в теплоснабжении аналогичных зданий, обусловленная в первую очередь инфильтрацией воздуха, составляет до 50 % при равных температурных условиях наружного воздуха.

Однако этот метод не учитывает тот факт, что некоторые здания этой группы могут иметь наружные стены, выполненные из пористых материалов с пониженным сопротивлением воздухопроницанию. Когда инфильтрующийся воздух проникает через поровое пространство таких стен в процессе противоточного движения теплого воздуха из помещения, может возникнуть экономайзерный эффект. Это обеспечивает уменьшение не только необходимого объема вентиляционного воздуха через приточные отверстия, но и количества тепловой энергии, затрачиваемой на его нагрев в пространстве помещения.

При выполнении расчетов использовались уравнения для определения значения температуры τ_{int} и теплового потока q_{int} на внутренней поверхности наружной стены при инфильтрации

$$\tau_{\text{в}} = t_{\text{н}} + (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot \frac{e^{c_{\text{в}} \cdot w \cdot R} - 1}{e^{c_{\text{в}} \cdot w \cdot R_0} - 1}, \quad (6)$$

$$q_{\text{и}} = \frac{c_{\text{в}} \cdot w \cdot e^{c_{\text{в}} \cdot w \cdot R}}{e^{c_{\text{в}} \cdot w \cdot R_0} - 1} \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}). \quad (7)$$

Расчеты показали, что для помещения площадью 12 м² примерный эффект экономии тепла при инфильтрации воздуха через стену может достигать значений от 3,4 % для 2-этажного дома до 10,3 % для 12-этажного [7].

Отличительная особенность *группы домов небольшой этажности с большим сроком эксплуатации*, как показали результаты натурных обследований, – невысокий уровень тепловой защиты наружной оболочки, особенно в тех зданиях, которые имеют насыпные утеплители на чердачных перекрытиях из деревянных сборно-балочных элементов.

Расчет эксфильтрации теплого воздуха по уравнению (7) показал, что через такие перекрытия величина тепловых потерь может быть в 3,5 раза больше той, которая определяется по стандартной методике в отсутствие эксфильтрации [8].

В *четвертой группе зданий* наружные ограждающие конструкции имеют разную величину тепловой инерции D , определяемую по формуле

$$D = \sum R_i S_i = \sum R_i \sqrt{(2\pi\gamma\lambda c / 4\Delta z)}. \quad (8)$$

Результаты исследования влияния показателя D на тепловые потери зданий в периоды резких похолоданий представлены в работе [9]. На примере отдельных конструктивных решений наружных стен показано, что с увеличением D в пределах 0,7...2,4 максимальные тепловые потери через эти конструкции с равной величиной сопротивления теплопередаче уменьшаются в 1,3 раза.

Особенность теплоснабжения зданий этой группы с начала периода резкого похолодания состоит в том, что чем меньше при прочих равных условиях величина D их наружных ограждений, тем раньше у них возникнет потребность в дополнительном тепле для поддержания требуемого теплового режима помещений. При наличии автоматически регулируемой системы отопления этой группы зданий городской застройки в целях энергосбережения важно соблюдать алгоритм перераспределения тепла между зданиями, имеющими наружные ограждения с разной тепловой инер-

цией. При этом учитывается сдвиг по времени Δz_{pn} максимальных теплотерь через данные конструкции у N -го здания по формуле Богословского В.Н.

$$\Delta z_{pn} = 4 z_{pn} (0,113 D_N - 0,017), \quad (9)$$

где z_{pn} – число дней с резким похолоданием.

В формуле (2) влияние энергосберегающих решений на удельные теплозащитные и вентиляционные характеристики здания можно учесть с помощью поправочных коэффициентов f_i :

$$q_{ihv}^{des} = k_{hs} f_i + k_v f_i - \beta_{HUC} (k_{ih} + k_{rad} + k_{ren}). \quad (10)$$

Тогда для рассмотренных энергосберегающих решений

$$q_{hv}^{des} = k_{hs} f_3 + k_v f_{t3} - \beta_{HUC} (k_{ih} + k_{rad} + k_{ren}), \quad (11)$$

где f_3 – коэффициент, учитывающий влияние экономайзерного эффекта; f_{t3} – коэффициент, учитывающий влияние компактности подземного помещения.

Эффект от использования энергосберегающих мероприятий для одного здания можно оценить по отношению, аналогичному формуле (1):

$$K_{hv} = q_{hv}^{des} / q_{hv}^{en}, \quad (12)$$

где q_{hv}^{des} – определяется по формуле (2) без слагаемого k_{ren} ; q_{hv}^{en} – расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания с учетом использованных энергосберегающих решений, Вт/(м³·°C);

$$q_{hv}^{en} = [k_{hs} f_i + k_v f_i - \beta_{HUC} (k_{ih} + k_{rad} + k_{fsc})]. \quad (13)$$

Выводы

1. Добавление в состав уравнения для расчета удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания нового показателя по учету влияния возобновляемых источников энергии позволяет снизить тепловую потребность здания. Так, доля тепла, подаваемого упрощенной конструкцией плоского коллектора с воздушным теплоносителем от тепловой нагрузки небольшого здания за отопительный период, может составить 6...12,5 % при площади его модулей 25 и 50 м² соответственно.

2. В методе по расчету влияния инфильтрации воздуха на тепловую потребность зданий желательно учитывать экономайзерный эффект, который возникает в наружных стенах, имеющих пониженное сопротивление воздухопроницанию. Экономия тепла при этом для помещения площадью 12 м² может достигать значений 3,4 % и 10,3 % для 2- и 12-этажных зданий соответственно.

3. Для группы домов старой застройки, имеющих чердачные перекрытия с небольшим сопротивлением воздухопроницанию, расчет тепловых потоков необходимо делать с учетом эксфильтрации воздуха. Через такие перекрытия величина тепловых потерь может быть в 3,5 раза больше той, которая определяется по стандартной методике в отсутствие эксфильтрации.

4. В группе домов с наружными ограждениями, имеющими одинаковое сопротивление теплопередаче, теплотери через эти конструкции при наступлении резкого похолодания оказываются тем больше, чем меньше их тепловая инерция D (например, с увеличением D в пределах 0,7...2,4 максимальные тепловые потери через эти конструкции уменьшаются в 1,3 раза).

5. Перераспределение избытка тепловой энергии из зданий одной группы в здания другой, испытывающие ее дефицит, возможно при наличии автоматически регулируемой системы теплоснабжения городской застройки.

Список литературы

1. Береговой, А.М. Показатели эффективности в системном анализе теплопотерь через энергосберегающие наружные ограждения / А.М. Береговой, О.Л. Викторова, В.А. Береговой // Известия Вузов. Строительство. – 2009. – № 5 (605). – С. 57–61.
2. Budylna, E. Control of multiobjective complex systems / E. Budylna, A. Danilov, I. Garkina. – 2015. – №8 (9–12). – P. 441–445.
3. СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23–02–2003 (с изменением №1 от 14.12.2018). – М.: НИИСФ РААСН, 2012. – 95 с.
4. Береговой, А.М. Энергоэкономичные и энергоактивные здания в архитектурно-строительном проектировании / А.М. Береговой, А.В. Гречишкин, В.А. Береговой. – 3-е изд., перераб. и доп. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 200 с.
5. Бэкман, У. Расчет систем солнечного теплоснабжения: пер. с англ. / У. Бэкман, С. Клейн, Дж. Дафф. – М.: Энергоиздат, 1982. – 80 с.
6. Левчев, А.П. Способ установления нормативов расхода тепла для зданий / А.П. Левчев, Б.М. Гришин, А.М. Береговой, В.В. Салмин // International Journal of Applied Research. – 2016. – Vol. 11, № 17. – P. 9154–9158.
7. Береговой, А.М. Строительные материалы и наружные ограждающие конструкции зданий повышенной тепловой эффективности / А.М. Береговой, В.А. Береговой, А.В. Мальцев, А.В. Гречишкин, М.А. Дерина. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 180 с.
8. Береговой, А.М. Оценка тепловых потерь при эксфильтрации воздуха через пористую структуру материала ограждения / А.М. Береговой, М.А. Дерина, В.А. Береговой, А.В. Мальцев // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2. – С. 79–83.
9. Береговой, А.М. Моделирование теплоустойчивости наружных ограждений для оценки тепловых потерь здания и микроклимата его помещений / А.М. Береговой, М.А. Дерина // Моделирование и механика конструкций. – 2016. – №3. – С. 16.

References

1. Beregovoy, A.M. Performance indicators in the system analysis of the heat losses through the exterior enclosure structures / A.M. Beregovoy, O.L. Viktorova, V.A. Beregovoy // News of higher educational institutions. – 2009. – No. 5 (605). – P. 57–61.
2. Budylna, E. Control of multiobjective complex systems / E. Budylna, A. Danilov, I. Garkina. – 2015. – №8 (9–12). – P. 441–445.
3. SP 50.13330.2012. Thermal protection of buildings. Actualized edition of SNiP 23-02-2003 (with change №1 from 14.12.2018). – M.: NIISF RAASN, 2012. – 95 p.
4. Beregovoy, A.M. Energy efficient and energy active buildings in architecture and building engineering / A.M. Beregovoy, A.V. Grechishkin, V.A. Beregovoy. – 3-e edition, revised and enlarged. – Penza: State University of Architecture and Construction, 2012. – 200 p.
5. Beckman, W. Calculation of solar heating systems / W. Beckman, S. Klein, J. Duffy. – M.: Energ, 1982. – 80 p.
6. Levtshev, A.P. The method of setting of heat consumption standard for buildings / A.P. Levtshev, B.M. Grishin, A.M. Beregovoy, V.V. Salmin // International Journal of Applied Research. – 2016. – Vol. 11, № 17. – P. 9154–9158.
7. Beregovoy, A.M. Building materials and external enclosing structures of buildings with increased thermal efficiency / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy, A.V. Maltsev, A.V. Grechishkin, M.A. Derina. – Penza: PGUAS, 2014. – 180 p.
8. Beregovoy, A.M. Evaluation of heat losses during exfiltration of air through the porous structure of the material of enclosure structure / A.M. Beregovoy, M.A. Derina, V.A. Beregovoy, A.V. Maltsev // Regional architecture and engineering. – 2014. – №2. – P. 79–83.
9. Beregovoy, A.M. Simulation of heat resistance of external enclosure structures to assess the heat loss of the building and the microclimate of its rooms / A.M. Beregovoy, M.A. Derina // Modeling and mechanics of structures. – 2016. – №3. – P. 16.
