

**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

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 исполь-  
зование в статьях данных, не подлежа-  
щих открытой публикации.  
Редакция может опубликовать статьи  
в порядке обсуждения, не разделяя точку  
зрения автора.

Подписано к печати 18.12.2018.  
Формат 60x84 1/8.  
Уч.-изд.л. 29,125. Тираж 500 экз. Первый завод 100.  
Заказ № 1135.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

# РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО 4(37)/2018

## Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ.....	5
<b>Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В.</b> ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СВОЙСТВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ .....	5
<b>Леснов В.В., Ерофеев В.Т.</b> РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА НАПОЛНЕННЫХ МАТРИЧНЫХ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ КАРКАСНЫХ КОМПОЗИТОВ .....	12
<b>Черкасов В.Д., Авдонин В.В., Волоцкой А.Н., Юркин Ю.В., Мансурова И.А.</b> ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭТИЛЕНВИНИЛАЦЕТАТА .....	20
<b>Черкасов В.Д., Авдонин В.В., Юркин Ю.В., Смиркин А.С., Тюрин М.В., Бородин А.В.</b> ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТА С УЧЕТОМ СВОЙСТВ МЕЖФАЗНОГО СЛОЯ .....	30
<b>Фомина Е.В., Лесовик В.С., Фомин А.Е., Абсиметов М.В., Елистраткин М.Ю.</b> ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОБЕТОНА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ОТХОДОВ УГЛЕДОБЫЧИ.....	38
<b>Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В.</b> КРАТКИЙ ОБЗОР АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ .....	48
<b>Низина Т.А., Чернов А.Н., Низин Д.Р., Горенкова А.И., Черушова Н.В.</b> АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИГМЕНТИРОВАННЫХ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ В ПРОЦЕССЕ НАТУРНОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ .....	55
<b>Рахимбаев Ш.М., Рахимбаев И.Ш., Хахалева Е.Н.</b> О МЕХАНИЗМЕ ГИДРОСУЛЬФОАЛЮМИНАТНОГО РАСШИРЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ.....	65
<b>Леснов В.В., Афонин В.В., Ерофеев В.Т.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ НАПОЛНЕННЫХ ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ МАТРИЦ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ КАРКАСНЫХ КОМПОЗИТОВ .....	71

© Авторы публикаций, 2018  
© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2018  
© ПГУАС, 2018

<b>Береговой В.А., Снадин Е.В.</b> УЛУЧШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕНОКЕРАМИЧЕСКОГО СЫРЦА ..... 80	<b>Андреев С.Ю., Ласьков Н.Н., Яхкин М.И., Князев А.А.</b> АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИИ ФЕРРАТА НАТРИЯ В РАСТВОРЕ ГИДРОКСИДА НАТРИЯ ПОСЛЕ АКТИВАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ В ЭЛЕКТРОЛИЗЕРЕ ..... 159
<b>Мажитов Е.Б., Скачков Ю.П.</b> ГОРЮЧЕСТЬ ЗОЛЬ-СИЛИКАТНЫХ ПОКРЫТИЙ ..... 85	<b>Фиговский О.Л., Пенский О.Г.</b> МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МНОГООТВЕТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ ОРУДИЙ ..... 166
<b>Матюхин П.В., Павленко В.И., Широков А.В.</b> ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ ПРЕССОВАНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ГЕМАТИТА И ЕГО ПОВЕДЕНИЕ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ..... 89	<b>Бодров В.И., Бодров М.В., Кузин В.Ю., Морозов М.С.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ БАЗОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ ЖИЛОГО ФОНДА ..... 178
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ ..... 98	<b>Леонтьев В.А.</b> ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ СТАНЦИИ, РАБОТАЮЩЕЙ НА БИОГАЗЕ ..... 186
<b>Гучкин И.С., Ласьков Н.Н., Скачков Ю.П.</b> КОНСТРУКЦИЯ, СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И РАСЧЕТ МНОГОПУСТОТНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ С ПРОЁМОМ ..... 98	<b>Кошев А.Н., Кузина В.В.</b> ОПТИМАЛЬНАЯ РАССТАНОВКА УЗЛОВ РАЗБИЕНИЯ ИНТЕРВАЛА ИНТЕГРИРОВАНИЯ ПРИ ЧИСЛЕННОМ РЕШЕНИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ МЕТОДОМ БОГОЛЮБОВА – КРЫЛОВА .. 193
<b>Селяев В.П., Селяев П.В., Алимов М.Ф., Горенков А.О.</b> ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕД ..... 103	АРХИТЕКТУРА ..... 198
<b>Бакушев С.В.</b> ГЛАВНЫЕ ПЛОЩАДКИ И ГЛАВНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ..... 109	<b>Берсенева М.А.</b> МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ КОМФОРТНОСТИ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ НА ПРИМЕРЕ Г. ПЕНЗЫ ..... 198
<b>Комаров В.А., Болдырева О.В.</b> СТЕРЖНЕВЫЕ МОДЕЛИ БЕТОННЫХ ПОЛОС КОНСОЛЬНЫХ ОПОР ..... 118	<b>Белякова Е.А., Уханов Д.А.</b> МЕТОД МНОГОВАРИАНТНОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ НА ПРИМЕРЕ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ Г. ПЕНЗЫ ..... 205
<b>Береговой А.М., Береговой В.А., Скачков Ю.П.</b> ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЖАРКОГО И ХОЛОДНОГО КЛИМАТА ..... 123	<b>Селютина Л.Ф., Емельянова Е.Г., Цветаев С.А.</b> ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАРКАСА ЗДАНИЯ С АВТОСТОЯНКОЙ В ЦОКОЛЬНОЙ ЧАСТИ В УСЛОВИЯХ СТЕСНЕННОЙ ЗАСТРОЙКИ ..... 211
<b>Миряев Б.В., Городнов И.И.</b> КУПОЛЬНОЕ ПОКРЫТИЕ ЖИЛОГО ДОМА .... 128	ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ..... 221
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ..... 135	<b>Васин Л.А., Глебова Т.А.</b> ОРГАНИЗАЦИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В АРХИТЕКТУРНО- СТРОИТЕЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ: ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ LINUX ..... 221
<b>Ерёмкин А.И., Фильчакина И.Н., Аверкин А.Г., Родионов Ю.В.</b> МЕТОДИКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ С ОППОЗИТНЫМИ ЩЕЛЕВИДНЫМИ НАСАДКАМИ ..... 135	Указатель статей, опубликованных в 2018 г. .... 228
<b>Еремкин А.И., Аверкин А.Г.</b> ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МНОГОКОМ- ПОНЕНТНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С КОНДИЦИОНИРОВАННЫМ ВОЗДУХОМ .... 143	
<b>Левцев А.П., Лапин Е.С., Бикуннова М.В., Салмин В.В.</b> КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ОЦЕНКА РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ..... 151	

# Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	<b>Mazhitov Y.B., Skachkov Y.P.</b> FLAMMABILITY OF ZOL SILICATE COATINGS.....	85
<b>Garkina I.A., Danilov A.M., Korolev E.V.</b> DESIGN AND OPTIMIZATION OF PROPERTIES OF COMPLEX SYSTEMS .....	6	<b>Matyukhin P.V., Pavlenko V.I., Shirokov A.V.</b> STUDY OF THE INFLUENCE OF HIGH PRESSURE COMPACTION ON THE CHANGE OF PHASE COMPOSITION OF HEMATITIS AND ITS BEHAVIOR AT HIGH TEMPERATURES.....	89
<b>Lesnov V.V., Erofeev V.T.</b> RHEOLOGICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF FILLED MATRIX OF CEMENT COMPOSITIONS, INTENDED FOR CARCASS COMPOSITES.....	12	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS .....	98
<b>Cherkasov V.D., Avdonin V.V., Volotskoy A.N., Yurkin Yu.V., Mansurova I.A.</b> THE INFLUENCE OF MODIFIED ADDITIVES ON DYNAMIC PROPERTIES OF POLYMERIC MATERIALS BASED ON ETHYLENE-VINYL ACETATE.....	20	<b>Guchkin I.S., Laskov N.N., Skachkov Y.P.</b> STRUCTURE, MANUFACTURING METHOD AND CALCULATION OF MULTI HOLLOW REINFORCED CONCRETE SLAB WITH AN OPENING.....	98
<b>Cherkasov V.D., Avdonin V.V., Yurkin Yu.V., Smirkin A.S., Tyurin M.V., Borodin A.V.</b> FORECASTING DAMPING PROPERTIES OF COMPOSITE TAKING INTO ACCOUNT THE PROPERTIES OF THE INTERPHASE LAYER.....	30	<b>Selyaev V.P., Selyaev P.V., Alimov M.F., Gorenkov A.O.</b> ASSESSMENT OF RELIABILITY OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WORKING IN CORROSIVE MEDIA .....	103
<b>Fomina E.V., Lesovik V.S., Fomin A.E., Absimetov M.V., Elistratkin M.Yu.....</b> IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE CONCRETE DUE TO THE USE OF WASTE COAL.....	38	<b>Bakushev S.V.</b> PRINCIPAL PLANES AND PRINCIPAL STRESSES IN CYLINDRICAL COORDINATE SYSTEM.....	109
<b>Garkina I.A., Danilov A.M., Korolev E.V.</b> OVERVIEW OF ANALYTICAL METHODS FOR THE SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS.....	48	<b>Komarov V.A., Boldyreva O.V.</b> ROD MODEL OF CONCRETE STRIPS OF CONSOLE SUPPORTS .....	118
<b>Nizina T.A., Chernov A.N., Nizin D.R., Gorenkova A.I., Cherushova N.V.</b> ANALYSIS OF PIGMENTED EPOXY COMPOSITES COLORIMETRIC CHARACTERISTICS CHANGES IN THE PROCESS OF NATURAL EXPOSURE .....	55	<b>Beregovoy A.M., Beregovoy V.A., Skachkov Y.P.</b> THERMOTECNICAL PROPERTIES OF EXTERNAL ENCLOSURE STRUCTURES IN THE CONDITIONS OF HOT AND COLD CLIMATE .....	123
<b>Alfimova N.I., Kovalchenko O.V., Nikiforova N.I.</b> ON THE MECHANISM OF HYDROSULPHALUMINATE EXPANSION OF CEMENT STONE .....	65	<b>Miryayev B.V., Gorodnov I.I.</b> THE DOME ROOF OF A RESIDENTIAL BUILDING.....	128
<b>Lesnov V.V., Afonin V.V., Erofeev V.T.</b> STUDY OF STRENGTH PROPERTIES OF THE FILLED PLASTICIZED CEMENT MATRICES INTENDED FOR carcass COMPOSITES.....	71	ENGINEERING SYSTEMS.....	135
<b>Beregovoi V.A., Snadin E.V.</b> IMPROVEMENT OF STRENGTH PARAMETERS OF RAW FOAM CERAMIC... ..	80	<b>Eremkin A.I., Filchakina I.N., Averkin A.G., Rodionov Y.V.</b> METHOD OF AERODYNAMIC CALCULATIONS OF AIR DISTRIBUTOR WITH OPPOSITE SANDWICH VESSELS..	135
		<b>Eremkin A.I., Averkin A.G.</b> STUDY OF THE PROCESS OF INTERACTION OF MULTICOMPONENT TEXTILE MATERIALS WITH CONDITIONED AIR.....	143
		<b>Levtsev A.P., Lapin E.S., Bikunova M.V., Salmin V.V.</b> DESIGN FEATURES AND EVALUATION OF EQUIPMENT FOR PULSED COOLANT ....	151

<b>Andreev S.Yu., Laskov N.N., Yakhkind M.I., Knyazev A.A.</b> ANALYSIS OF CONCENTRATION OF SODIUM FERRATE IN SOLUTION OF SODIUM HYDROXIDE AFTER ACTIVATION TREATMENT IN ELECTROLYSER.....	159	ARCHITECTURE .....	198
<b>Figovsky O.L., Pensky O.G.</b> MATHEMATICAL MODELS OF MULTI- BARRELED CONSTRUCTION ARTILLERY SYSTEM.....	166	<b>Berseneva M.A.</b> METHODOLOGICAL BASES FOR ASSESSING THE URBAN ENVIRONMENT COMFORT ON THE EXAMPLE OF PENZA .....	198
<b>Bodrov V.I., Bodrov M.V., Kuzin V.Y., Morozov M.S.</b> DETERMINATION OF BASIC INDICATORS OF ENERGY EFFICIENCY OF MICROCLIMATE SETTING SYSTEMS FOR OVERHAUL OF HOUSING STOCK .....	178	<b>Belyakova E.A., Ukhanov D.A.</b> METHOD OF MULTI-VARIANT EXPERTISE ON THE EXAMPLE OF QUALITY CONTROL OF URBAN ENVIRONMENT IN PENZA .....	205
<b>Leontev V.A.</b> ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THE COGENERATION STATION WORKING ON BIOGAS.....	186	<b>Selyutina L.F., Emel'yanova E.G., Tsvetaev S.A.</b> DESIGN FEATURES OF THE BUILDING FRAME WITH PARKING IN THE BASEMENT IN CONSTRAINED BUILDING CONDITIONS .....	211
<b>Koshev A.N., Kuzina V.V.</b> NUMERICAL SOLUTION OF INTEGRAL EQUATIONS BY THE BOGOLYUBOV – KRYLOV METHOD WITH AN OPTIMAL ARRANGEMENT OF THE NODES PARTITION OF THE INTEGRATION INTERVAL .....	193	ECONOMICS AND MANAGEMENT..	221
		<b>Vasin L.A., Glebova T.A.</b> ORGANIZATION OF THE EDUCATIONAL PROCESS AT UNIVERSITY ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION: APPLICATION OF THE LINUX OPERATING SYSTEM .....	221

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691:519.7

*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

**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

*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

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

*National Research Moskovsky State University  
of Civil Engineering*  
Russia, 129337, Moscow,  
26, Yaroslavskoe shosse,  
tel.: +7 (495) 781-80-07;  
fax: +7 (499) 183-44-38

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

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СВОЙСТВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев

Определены методологические принципы идентификации, синтеза и управления сложных систем с приложениями к разработке композиционных материалов. Границы системы, ее состав, системные свойства, взаимосвязи между элементами, иерархическая структура критериев качества системы определяются, исходя из надсистемы (национальные интересы страны; при предельно допустимых интегративных параметрах – системный кризис). Показана необходимость построения системы моделей по системообразующим классам: идентификация, синтез и управление в рамках какой-либо одной, даже очень сложной, модели невозможны; эффективность использования формальных методов идентификации, синтеза и управления ограничивается непрозрачностью отношений в системе и сложностью ее динамики. Указана возможность

использования результатов коллективной многовариантной экспертизы; при многокритериальной оптимизации может эффективно использоваться итеративный способ. Приводятся примеры реализованных на основе системного подхода проектов.

*Ключевые слова:* сложные системы, композиционные материалы, идентификация, управление, проектирование, системный подход, методологические принципы

## DESIGN AND OPTIMIZATION OF PROPERTIES OF COMPLEX SYSTEMS

I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev

The methodological principles of identification, synthesis and control of complex systems with applications to the development of composite materials are defined. The boundaries of the system, its composition, system properties, the relationship between the elements, the hierarchical structure of the system quality criteria are determined on the basis of a super-system (national interests of the country; with the maximum allowable integrative parameters – a system crisis). The necessity of building a system of models according to the system-forming classes is shown: identification, synthesis and management within the framework of any one, even a very complex model, is impossible; the effectiveness of the use of formal methods of identification, synthesis and control is limited by the opacity of relations in the system and the complexity of its dynamics. The possibility of using the results of a collective multivariate examination is indicated; with multi-criteria optimization, an iterative method can be effectively used. Examples of the projects implemented on the basis of a systematic approach are given.

*Keywords:* complex systems, composite materials, identification, control, design, systems approach, methodological principles

Имеются три взаимосвязанных класса задач, связанных с разработкой сложных систем: *идентификация* (основных составляющих системы, ее организационной структуры, процедур функционирования и т.д.), *синтез и управление* [1, 2]. В широком смысле идентификация – это определение модели при неполной информации, а синтез – построение системы управления по модели (не обязательно должна быть математической), которой она описывается. При этом реализация основных направлений идентификации, синтеза и использования знаний не осуществима в рамках какой-либо одной, даже очень сложной, модели. *Нужна система моделей.* Задачи идентификации связаны в основном с проблемами синтеза и функционирования системы в целом и отдельных ее компонент (подсистем и элементов). Часть задач идентификации формулируется и решается в контексте задач синтеза. Вопросы синтеза тесно связаны с техническими, математическими, философскими, гносеологическими проблемами автоматизации, компьютеризации и информатизации и являются центральными задачами теорий управления и синтеза. С точки зрения теории управления наиболее важными свойствами систем считаются: *активность, самоорганизация, нестационарность, неопределенность.* Эффективность использования формальных методов при моделировании и идентификации зависит от сложности динамики и прозрачности связей в системе; получить исчерпывающие объективные данные об исследуемой системе трудно. В связи с этим при идентификации систем используется не только количественная, но и *экспертная информация, получаемая методами коллективной многовариантной экспертизы.*

Начальным этапом и методологической базой определения механизма управления (связана взаимными отношениями с группой непротиворечивых способов управления для достижения заданных целей) в целом и отдельных его компонентов является построение *концептуальной модели.*

В сложной системе один и тот же элемент в разных случаях может выступать как управляющий или управляемый. Один и тот же элемент может входить в разные подсистемы и участвовать в одной или нескольких временных коалициях. Образование коалиций может быть одним из видов управления (средством достижения определенной цели) или спорадическим (так же преследующим определенную цель). Все это приводит к необходимости построения моделей, распределенных по системообра-

зующим классам, являющихся базой для формирования взаимосвязанных направлений синтеза (вертикальном, горизонтальном, компонентно-структурном и др.). Так, результатом логического синтеза является нормативная логическая модель процесса функционирования системы относительно фиксированных целей. Ввиду сложности логического синтеза обычно производится декомпозиция системы по различным аспектам управления. Особо выделяется абстрактный синтез – построение математической модели или комплекса математических моделей функционирования системы. Математические модели, описывающие процессы функционирования системы, могут быть непрерывными, детерминированными, стохастическими. Они используются для решения задач анализа, устойчивости, качества, эффективности, а также для получения других оценок технологического синтеза. Центральным является технологический синтез; логический и абстрактный имеют вспомогательный характер и выполняются в интересах технологического синтеза. Процессы синтеза и связанные с ними операции идентификации носят перманентный характер; определяются системой целей. Это относится и к созданию *перспективных материалов с регулируемой структурой и свойствами*: управление должно осуществляться на основе системного подхода (обычно качество системы определяется векторным критерием). *Иерархическая структура критериев качества является основой проектирования всей системы и отдельных ее подсистем.*

При исследовании систем под закономерностью понимается часто наблюдаемое, типичное свойство (связь или зависимость), присущее многим объектам, процессам и явлениям, устанавливаемое опытом (например, процессы формирования физико-механических характеристик материала). Выявление закономерностей позволяет в значительной степени облегчить перенос знаний об основных процессах, происходящих в сложных системах, из одной области в другую, независимо от их природы. Универсальные закономерности в синергетике сложных нелинейных неравновесных открытых систем позволяют при определенных условиях переносить знания о механизмах бифуркации, деградации, самоорганизации и т.п. с одних систем на другие. Универсальные закономерности помогают определять заранее, в каком направлении и в каких пределах может происходить развитие систем и в каких пределах и направлениях исключается их совершенствование. Универсальные системные закономерности определяют ограничения по управлению сложными открытыми системами различной природы аналогично тому, как известные универсальные законы термодинамики предопределяют рост энтропии, деградации и хаоса для закрытых систем (рост негэнтропии предопределяет процесс организации и самоорганизации открытых систем). Условия самоорганизации или дезорганизации открытых систем определяются на основе общесистемной закономерности возрастания и убывания энтропии. Для стабилизации открытых систем необходимо рационально управлять энтропийными процессами в системах, в том числе точкой энтропийного равновесия, или критическим уровнем организации систем, амплитудой и частотой энтропийных колебаний, отводом излишней энтропии из системы вовне и т. п. Из энтропийной закономерности вытекает важное следствие – зависимость потенциала системы от степени ее организованности или характера взаимодействия структурных элементов системы. Исходя из нее, можно определить зависимость потенциала системы от потенциала структурных элементов для хорошо, плохо и нейтрально организованной системы, что позволяет выработать рекомендации по рациональной организации и управлению системой. Пока среди различных теорий систем в настоящее время еще не существует универсальной, пригодной для различных практических приложений. Это относится и к общей теории систем Ю.А. Урманцева с ее высокой абстракцией (само определение системы включает более двух десятков признаков-атрибутов; главные признаки-атрибуты: целостность, интегративность, наличие двух и более совокупностей составных элементов, их взаимосвязей и отношений, наличие обмена информацией, энергией или веществом с другими системами или окружающей средой) и поэтому трудно приложимой к практическому решению системных задач. Что касается композиционных материалов, то признаки-атрибуты подробно рассматриваются в [3...5]. В соответствии с распро-

страненной мировоззренческой позицией мир устроен целостно и неделимо. Разделение мира на отдельные составные части – это структурирование чисто условное и делается исследователем ради достижения определенных целей, решения определенных задач. Во многих случаях структурирование привычно и общепринято. Существование системы определяется некоторыми основными определяющими ее параметрами. Их сохранение поддерживает существование самой системы и определяет ее гомеостаз. Системный (общий) гомеостаз обеспечивает сохранение интегративного качества, а частный – конкретной компоненты. Влияние изменения системных параметров на систему неодинаково и, в частности, зависит от диапазона изменения. Пока значение системообразующего параметра не выходит за некоторые пределы, сохраняется интегративное качество системы; выход за пределы области частичного гомеостаза ведет к переходу системы в новое качественное состояние без разрушения системы. С выходом параметра за пределы области системного гомеостаза система утрачивает интегративное качество и перестает существовать. Приближение интегративных параметров системы к предельно допустимым порождает системный кризис с непредсказуемыми последствиями и тогда дальнейшее существование системы оказывается под вопросом. Система вступает в зону бифуркации. Под влиянием внутренних или внешних флуктуаций она либо вернется в нормальное состояние, либо перейдет в другие, приобретая новое качество (например, больной острым воспалением легких (зона бифуркации) либо выздоравливает, либо болезнь приобретает хроническую форму, либо он умирает). Объект, как правило, изучается с разных точек зрения и с применением различных формализованных количественных или хотя бы концептуальных моделей при необходимых уточнениях и структурированиях сложного объекта (предварительно выделяются элементы, подсистемы, системы и надсистемы). При структурном исследовании строительных материалов предметом являются строение, фазовый состав, связи, топология и т.п.; при функциональном – динамические характеристики (кинетические процессы сорбции агрессивных сред, разрушения материала и др.), стойкость в эксплуатационной среде, экономическая эффективность (что при неизменной структуре системы зависит от свойств ее элементов и их отношений). Как видим, при решении любой возникающей проблемы прежде всего следует определить границы системы, ее состав, системные свойства, взаимосвязи между ее элементами суть системного подхода). При приближении интегративных параметров системы к предельно допустимым наступает системный кризис. Приложения указанного подхода достаточно полно приводятся в [6...9].

В случае больших *сложных систем*, сформированных по *модульному принципу* (в том числе и композиционных материалов), удастся производить декомпозицию системы на отдельные подсистемы, обладающие определенной степенью автономности (*интегративные свойства приближенно можно определить на основе автономных исследований отдельных подсистем*). Здесь каждый элемент иерархической структуры качества системы определяет автономное (без учета всех межсистемных связей) качество отдельной системы. Результаты автономных исследований модулей можно использовать для определения интегративных свойств (определяются связями между модулями, уровнями и на каждом из уровней; в основном лишь на качественном уровне). Возможность использования при конструировании системы в целом напрямую связана с необходимостью устранения межсистемных связей. Это можно сделать введением настраиваемых эталонных моделей с одновременной децентрализацией модулей по входам. Условия для переноса результатов автономных исследований на систему в целом определяются полнотой понимания процессов формирования структуры и свойств системы. В частности, при определении некоторых свойств материала в зависимости от гранулометрического состава можно использовать ингредиенты из других материалов, но с тем же гранулометрическим составом, что и в синтезируемом материале. Однако необходимо обеспечить аналогичные, по возможности точные, межсистемные связи (например, смачиваемость). При переносе результатов автономных исследований смачиваемости на формирование структуры и свойств материала необходимо знать параметры смачиваемости входящих компо-

нентов в стесненных условиях. Принципиально это можно обеспечить использованием настраиваемой эталонной модели, предусматривающей регулирование давления между компонентами. Настройку можно обеспечить использованием экспериментальных данных на образцах.

Используемые традиционно в строительном материаловедении данные о кинетических процессах формирования структуры и физико-механических характеристик материала [10...11] по существу являются результатом автономных исследований отдельных сепаратных модулей. Здесь требуемые параметры кинетических процессов определяются с учетом межсистемных связей. Неявно присутствуют эталонные модели, предусматривающие одновременную децентрализацию по входам. Алгоритмы определения параметров моделей составлялись исходя из характерных точек кинетических процессов [12].

Возможность создания композита и реализация технического задания первоначально определялись на этапе *когнитивного моделирования* с установлением интенсивных и экстенсивных свойств с выделением управляющих параметров. На основе когнитивной карты определялись *иерархические структуры* критериев качества, а в соответствии с выделенными критериями качества – соответствующие структурные схемы системы (для каждого выделенного масштабного уровня). Далее осуществлялась *формализация критериев* качества системы и разрабатывались *математические модели* в соответствии с каждым из критериев. Наконец, на основе решения задач *однокритериальной оптимизации* с использованием найденных *оптимальных значений* осуществлялась *формализация многокритериальной задачи* и ее решение (определялись *оптимальное строение и свойства системы – композита*).

Особо отметим, *польза системного подхода зависит от того, насколько успешно выделен системообразующий фактор и насколько полно установлено его значение для формирования системы*. Полезными будут лишь те математические выкладки, которые сформулированы с учетом приоритетных системообразующих факторов.

Так, результаты междисциплинарных исследований на основе системного подхода стали основой создания современных технологий получения материалов специального назначения с заданными свойствами [13...16].

#### Выводы

1. Определены методологические принципы идентификации, синтеза и управления с приложениями для разработки композиционных материалов как сложных систем.
2. Задачи и иерархическая структура критериев качества сложной системы определяются надсистемой.
3. Самоорганизация, нестационарность, неопределенность определяются как основные свойства системы. При идентификации, синтезе и управлении учитываются реально сложившиеся, а не нормативные составляющие системы.
4. Эффективность использования формальных методов идентификации, синтеза и управления ограничивается существенной и сложной динамикой, непрозрачностью отношений; часто основными являются экспертная информация и методы коллективной многовариантной экспертизы.
5. Идентификация, синтез и управление в рамках какой-либо одной, даже очень сложной, модели невозможны; требуется система моделей по системообразующим классам.
6. При многокритериальной оптимизации может эффективно использоваться итеративный способ.
7. Показана возможность представления строительных материалов как сложных систем с указанием системообразующих атрибутов.
8. Указана методика определения интегративных свойств композиционных материалов *на основе автономных исследований сепаратных подсистем*.
9. Предложена методика оптимизации рецептурно-технологических параметров материала как многоцелевой, сложной системы с использованием результатов однокритериальной оптимизации по каждому из частных критериев.

10. Приведенные для синтеза композитов методики можно использовать при разработке и управлении качеством и других сложных технических систем модульной структуры.

#### Список литературы

1. Прангишвили, И.В. Системный подход и общесистемные закономерности / И.В. Прангишвили. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 528 с.
2. Гарькина, И.А. Строительные материалы как системы / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2006. – № 7. – С.55–58.
3. Данилов, А.М. Современная общая методология идентификации систем: моделирование свойств материалов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – №1 (8). – 2010. – С.11–14.
4. Данилов, А.М. Приложение метода ПАТТЕРН к конструированию композиционных материалов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 1. – С.46–51.
5. Данилов, А.М. Сложные системы модульной структуры: композиты, автономные исследования сепаратных подсистем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Известия КазГАСУ. – 2011. – № 1(15). – С.152–156.
6. Гарькина, И.А. Когнитивное моделирование при синтезе композиционных материалов как сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Известия вузов. Строительство. – 2009. – №3/4. – С.30–37.
7. Гарькина, И.А. Управление качеством материалов со специальными свойствами / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Проблемы управления. – 2008. – № 6. – С. 67–74.
8. Гарькина, И.А. Системный подход к разработке материалов: модификация метода ПАТТЕРН / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Вестник МГСУ. – 2011. – № 2, Т.2. – С.400–405.
9. Гарькина, И.А. Флокуляция в дисперсных системах / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, В.А. Смирнов // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – № 2.3(32). – С.344–347.
10. Данилов, А.М. Сатурн-технология управления структурой и свойствами материалов как сложными системами / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: сб. статей XI Междунар. научно-техн. конф. – Пенза: ПДЗ, 2011. – С. 40–43.
11. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: МГСУ: Библиотека научных разработок и проектов, 2012. – 432 с.
12. Будылина, Е.А. Моделирование с позиций управления в технических системах / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – № 2(16). – 2013. – С. 138–143.
13. Гарькина, И.А. Системные методологии, идентификация систем и теория управления: промышленные и аэрокосмические приложения / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Э.В. Лапшин, Н.К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1(9). – С.3–11.
14. Данилов, А.М. Формализация оценки оператором характеристик объекта управления / А.М. Данилов, Э.Р. Домке, И.А. Гарькина // Информационные системы и технологии. – №2 (70). – 2012. – С.5–11.
15. Гарькина, И.А. Управление в сложных технических системах: методологические принципы управления / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – №1 (12). – 2012. – С.39–43.
16. Гарькина, И.А. Модификаторы для серных композитов специального назначения / И.А. Гарькина // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2008. – № 5, Т.51 – С.70–75.

## References

1. Prangishvili, I.V. System approach and system-wide laws / I.V. Prangishvili. – M.: SINTEG, 2000. – 528 p.
2. Garkina, I.A. Building materials as a system / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Building materials. – 2006. – № 7. – P.55–58.
3. Danilov, A.M. Modern general methodology for the identification of systems: modeling the properties of materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – №1 (8). – 2010. – P.11–14.
4. Danilov, A.M. Application of the PATTERN method to the design of composite materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Vestnik BSTU. V. G. Shukhov. – 2011. – № 1. – P.46–51.
5. Danilov, A.M. Complex systems of modular structure: composites, autonomous studies of separate subsystems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // News of KazGASU. – 2011. – № 1 (15). – P.152–156.
6. Garkina, I.A. Cognitive modeling in the synthesis of composite materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // News of universities. Building. – 2009. – № 3/4. – P.30–37.
7. Garkina, I.A. Quality management of materials with special properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Control Sciences. – 2008. – № 6. – P. 67–74.
8. Garkina, I.A. System approach to the development of materials: modification of the PATTERN method / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Vestnik MGSU. – 2011. – № 2, T.2. – P.400–405.
9. Garkina, I.A. Flocculation in dispersed systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.A. Smirnov // Control systems and information technologies. – 2008. – № 2.3 (32). – P.344–347.
10. Danilov, A.M. Saturn – technology of management structure and properties of materials as complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Problems of informatics in education, management, economics and technology: coll. Articles XI Intern. scientific and technical conf. – Penza: PDZ, 2011. – P. 40–43.
11. Bazhenov, Yu.M. Systems analysis in building materials science: monograph / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – M.: MGSU: Library of scientific research and projects, 2012. – 432 p.
12. Budylnina, E.A. Modeling with the positions of management in technical systems / E.A. Budylnina, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – № 2 (16). – 2013. – P. 138–143.
13. Garkina, I.A. System methodologies, system identification and control theory: industrial and aerospace applications / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Lapshin, N.K. Yurkov // Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical science. – 2009. – № 1 (9). – P.3–11.
14. Danilov, A.M. Formalization of the operator's assessment of the characteristics of the control object / A.M. Danilov, E.R. Domke, I.A. Garkina // Information systems and technologies. – №2 (70). – 2012. – P.5–11.
15. Garkina, I.A. Management in complex technical systems: methodological principles of management / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – №1 (12). – 2012. – P.39–43.
16. Garkina I.A. Modifiers for sulfur composites of special purpose / I.A. Garkina // Izvestia Universities. Chemistry and chemical technology. – 2008. – № 5, T.51. – P.70–75.

УДК 691

Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарева

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

**Леснов Виталий Викторович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Строительные материалы  
и технологии»  
E-mail: VVL377@rambler.ru

**Ерофеев Владимир Трофимович**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Строительные материалы  
и технологии»  
E-mail al\_rodin@mail.ru

Mordovian State University  
named after N.P. Ogarev  
Russia, 430000, Saransk, 24,  
Sovetskaya St.,  
tel.: (8342) 47-71-56

**Lesnov Vitaliy Victorovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Building materials and  
technology»  
E-mail: VVL377@rambler.ru

**Yerofeev Vladimir Trofymovich**,  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Building materials  
and technology»  
E-mail al\_rodin@mail.ru

## РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА НАПОЛНЕННЫХ МАТРИЧНЫХ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ КАРКАСНЫХ КОМПОЗИТОВ

В.В. Леснов, В.Т. Ерофеев

Изучено влияние содержания суперпластификатора, В/Т, наполнителя и его удельной поверхности на подвижность, среднюю плотность и водопоглощение цементных матриц, предназначенных для каркасных композитов. Получены эффективные матрицы с широким диапазоном реологических и структурных свойств, рассчитаны их математические модели.

*Ключевые слова:* каркасный композит, матрица, наполнитель, реологические и структурные свойства, математическая модель

## RHEOLOGICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF FILLED MATRIX OF CEMENT COMPOSITIONS, INTENDED FOR CARCASS COMPOSITES

V.V. Lesnov, V.T. Erofeev

The influence of superplasticizer content, I/T, filler and its specific surface area on the spreadability, average density and water absorption of cement matrices intended for carcass composites was studied. Efficient matrices with a wide range of rheological and structural properties are obtained and their mathematical models are calculated.

*Keywords:* carcass composite, matrix, filler, superplasticizer, rheological and structural properties, mathematical model

Физико-технические свойства и долговечность каркасных композитов определяются во многом свойствами пропиточной матрицы, которой заполняют предварительно изготовленный высокопористый каркас при их изготовлении [1–3]. Основное требование к пропиточным матрицам – качественное заполнение пустот каркаса, которое может быть достигнуто только эффективным снижением вязкости матриц с помощью их модификации высокоэффективными пластифицирующими добавками, например супер- или гиперпластификаторами [4–5]. Улучшения процессов структурообразования и повышения экономической эффективности матричных композиций можно добиться введением в их состав разнообразных видов наполнителей [6].

На основе этих предпосылок нами были проведены исследования по разработке, изготовлению и изучению свойств цементных матриц при совместном введении в их состав наполнителя и суперпластификатора. Для получения математических моделей изменения свойств пропиточных матриц использовался метод математического планирования эксперимента. В качестве факторов были выбраны: соотношение содержания портландцемента и наполнителя (ПЦ/Н) –  $X_1$ , водотвердое отношение (В/Т) –  $X_2$  и количество суперпластификатора (СП) в матрице –  $X_3$ . При изготовлении матричных составов в качестве вяжущего использовали портландцемент марки ЦЕМ-I 42,5Н (ОАО «Мордовцемент»), наполнителя – порошок доломитизированного известняка, пластифицирующей добавки – суперпластификатор марки Melflux 1641F. Наполнитель получали путем помола доломитизированного щебня марки 1200 (ООО «Биянковский щебеночный завод», Челябинская обл., г. Миньяр) до удельной поверхности 0,3 и 0,5 м<sup>2</sup>/г. Безразмерные уровни варьируемых факторов и их натуральные значения составов пропиточных матриц приведены в таблице.

Безразмерные и натуральные значения уровней факторов

Значения факторов	Уровни варьируемых факторов									
	$X_1$ (ПЦ/Н)			$X_2$ (В/Т)				$X_3$ (СП)		
Кодированные	-1	0	+1	-1	-0,333	+0,333	+1	-1	0	+1
Натуральные	30/70	40/60	50/50	0,2	0,225	0,25	0,275	0,5	1,0	1,5

**П р и м е ч а н и е .** Натуральные значения фактора  $X_1$  даны в мас.ч./мас.ч.,  $X_2$  – в отн.ед.,  $X_3$  – в процентах по сухому веществу от общей массы вяжущего и наполнителя

Диапазоны значений факторов эксперимента были предварительно подобраны по высоте пропитки каркаса матрицами, определяемой визуально. Каркас моделировали уплотненной насыпкой, состоящей из зерен доломитизированного известнякового щебня крупностью 5–10 мм и высотой 70–75 мм (рис. 1).

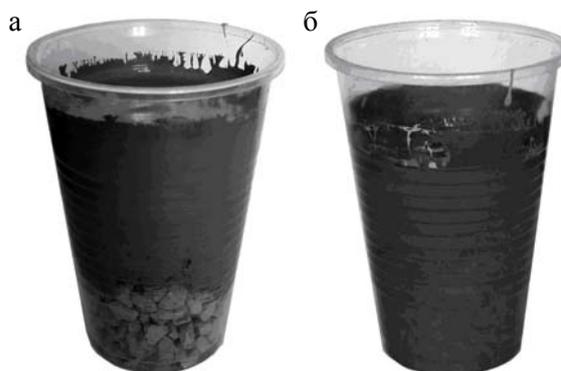


Рис. 1. Определение пропитки зернового каркаса матричным составом:  
а – матрица частично пропитала каркас, б – матрица полностью пропитала каркас

Технология приготовления матриц включала следующие операции: дозирование составляющих, предварительное перемешивание портландцемента всухую с СП и наполнителем в течение 30 с, добавление воды и перемешивание миксером в течение 120 с. Смесь укладывали в форму и уплотняли на встряхивающем столике 30 ударами с частотой 1 удар в секунду. Через сутки образцы вынимали из формы и подвергали тепловлажностной обработке (ТВО) в пропарочной камере. Режим ТВО был следующим: подъем температуры до 90 °С – 2 ч, изотермическое выдерживание – 6 ч и естественное остывание до 20 °С. Испытания проводились на образцах-призмах

размером 20×20×70 мм. Исследуемыми параметрами являлись водопоглощение и средняя плотность пропиточных матриц, а также изменение вязкости матриц, которая определялась по расплыву цементного теста на вискозиметре Суттарда.

После проведения регрессионного анализа, статистической обработки результатов эксперимента и проверки значимости коэффициентов были получены уравнения полиномиальных моделей (1) – (6) изменения расплыва (подвижности) цементного теста, а также средней плотности и водопоглощения пропиточных наполненных пластифицированных цементных матричных композиций в зависимости от водотвердого отношения, количества СП, содержания и удельной поверхности наполнителя :

$$L_{0,3} = 34,72 + 1,94X_2 + 1,00X_3 + 0,75X_1X_2 + 0,34X_1X_3 - 0,18X_2X_3, \quad (1)$$

$$L_{0,5} = 35,18 - 0,37X_1 + 2,11X_2 + 0,99X_3 + 0,68X_1X_2 + 0,18X_1X_3, \quad (2)$$

$$\rho_{0,3} = 1989,1 + 19,7X_1 - 49,8X_2 - 33,4X_3 + 5,5X_1X_2 + 15,4X_1^2 + 5,0X_2^2, \quad (3)$$

$$\rho_{0,5} = 2042,5 + 24,8X_1 - 54,9X_2 - 42,2X_3 + 3,1X_1X_2 - 3,8X_1X_3 - 2,2X_2X_3 + 6,0X_1^2 + 6,5X_2^2 - 10,3X_3^2, \quad (4)$$

$$W_{0,3} = 10,47 - 0,34X_1 + 1,52X_2 + 0,89X_3 + 0,29X_1X_2 + 0,20X_1X_3 + 0,16X_2X_3 - 0,98X_1^2 - 0,23X_2^2 - 0,18X_3^2, \quad (5)$$

$$W_{0,5} = 9,24 - 0,85X_1 + 1,50X_2 + 0,72X_3 + 0,17X_1X_2 + 0,11X_2X_3 - 0,55X_1^2 - 0,34X_2^2, \quad (6)$$

где  $L_{0,3}$  и  $L_{0,5}$  – расплыв (подвижность) цементного теста (см);  $\rho_{0,3}$  и  $\rho_{0,5}$  – средняя плотность (кг/м<sup>3</sup>);  $W_{0,3}$  и  $W_{0,5}$  – водопоглощение (% по массе) цементных пропиточных матриц, наполненных порошком из доломитизированного известняка с удельной поверхностью, равной 0,3 и 0,5 м<sup>2</sup>/г соответственно.

На основе полученных математических моделей были построены графики изменения расплыва, средней плотности и водопоглощения пропиточных матриц в зависимости от водотвердого отношения, степени наполнения, содержания СП и удельной поверхности наполнителя, которые приведены на рис. 2–10.

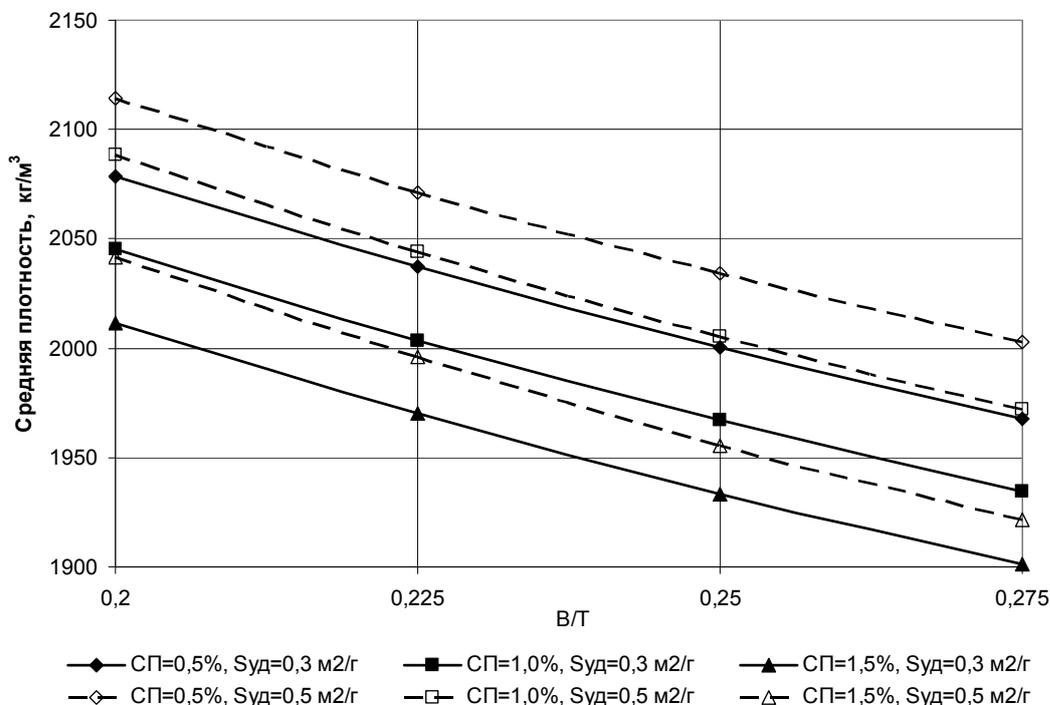


Рис. 2. Изменение средней плотности пропиточных матриц при отношении ПЦ/Н = 30/70

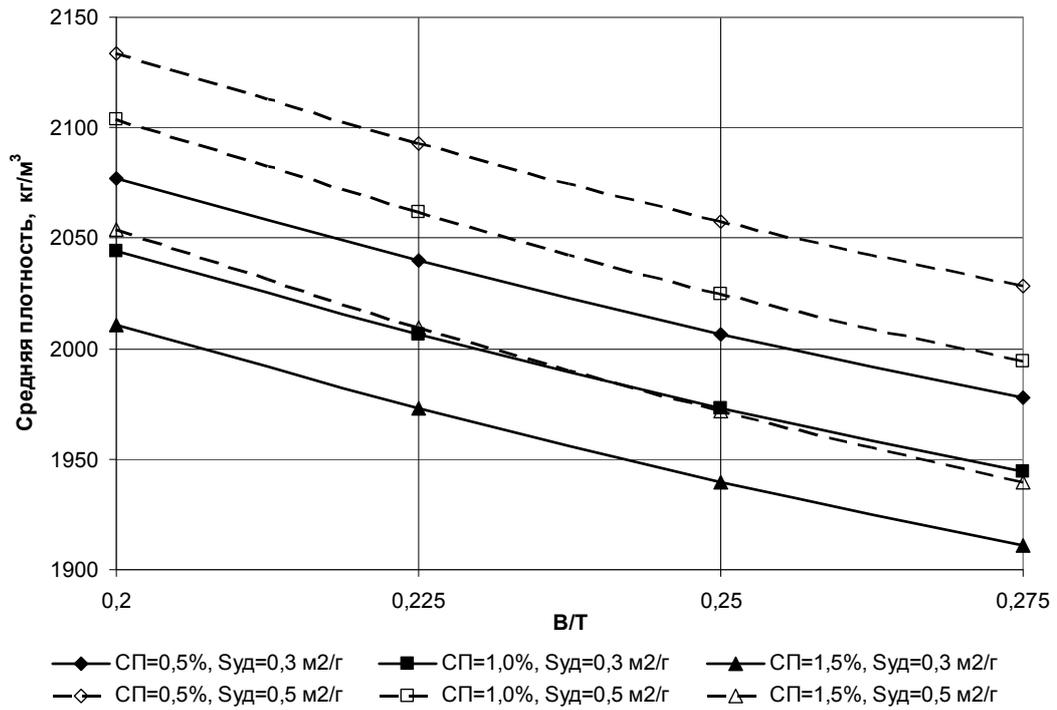


Рис. 3. Изменение средней плотности пропиточных матриц при отношении ПЦ/Н = 40/60

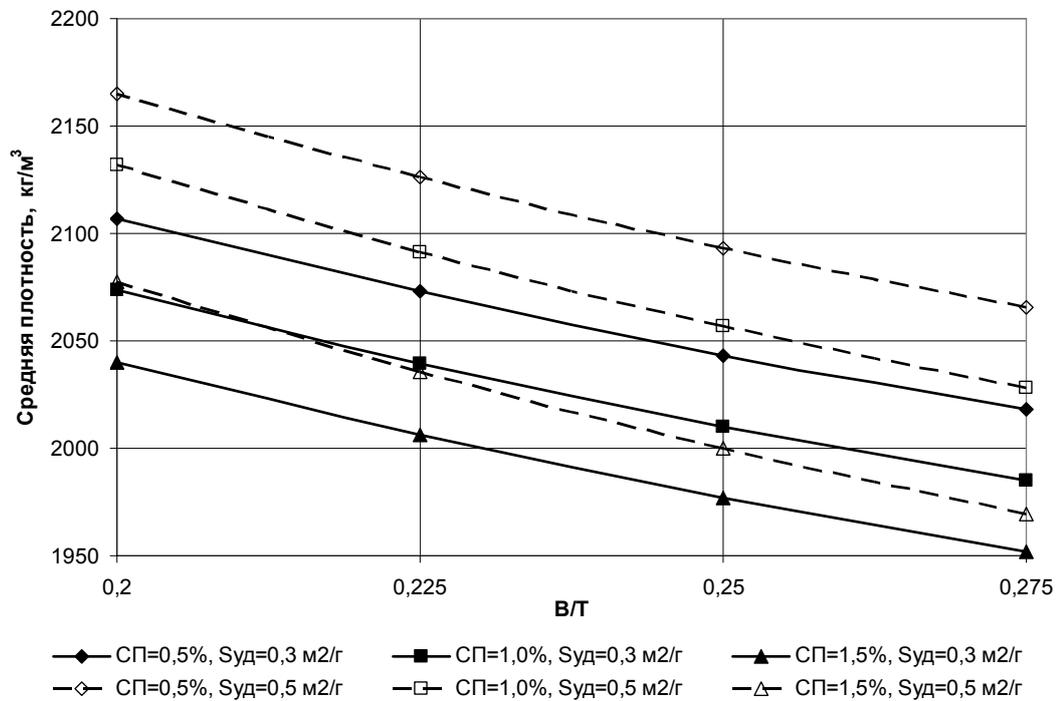


Рис. 4. Изменение средней плотности пропиточных матриц при отношении ПЦ/Н = 50/50

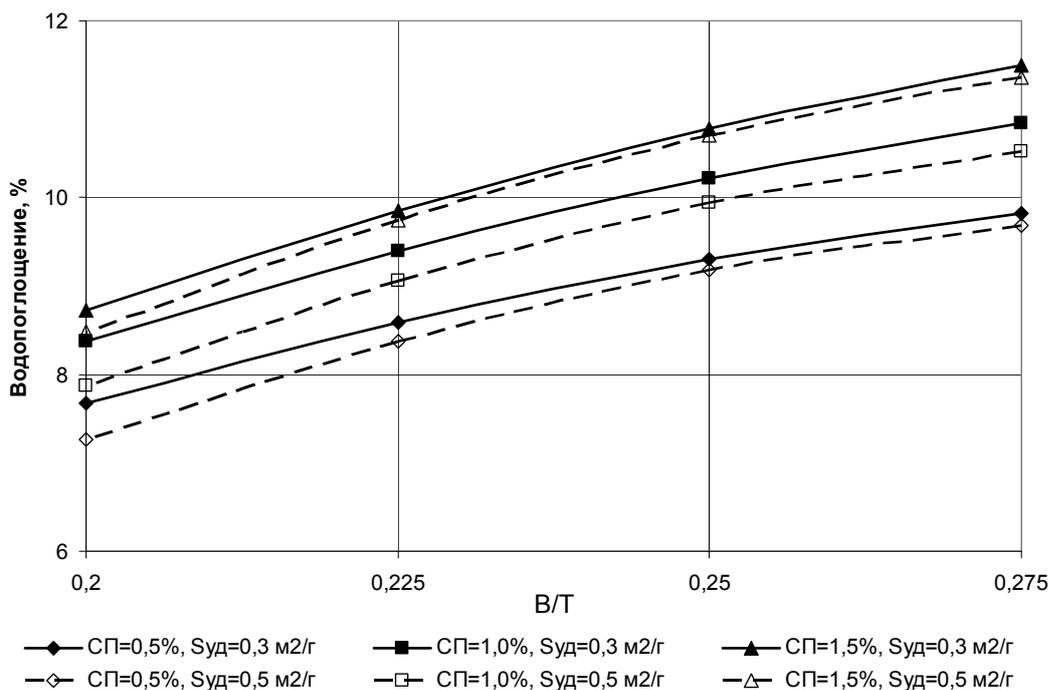


Рис. 5. Изменение водопоглощения пропиточных матриц при отношении ПЦ/Н = 30/70

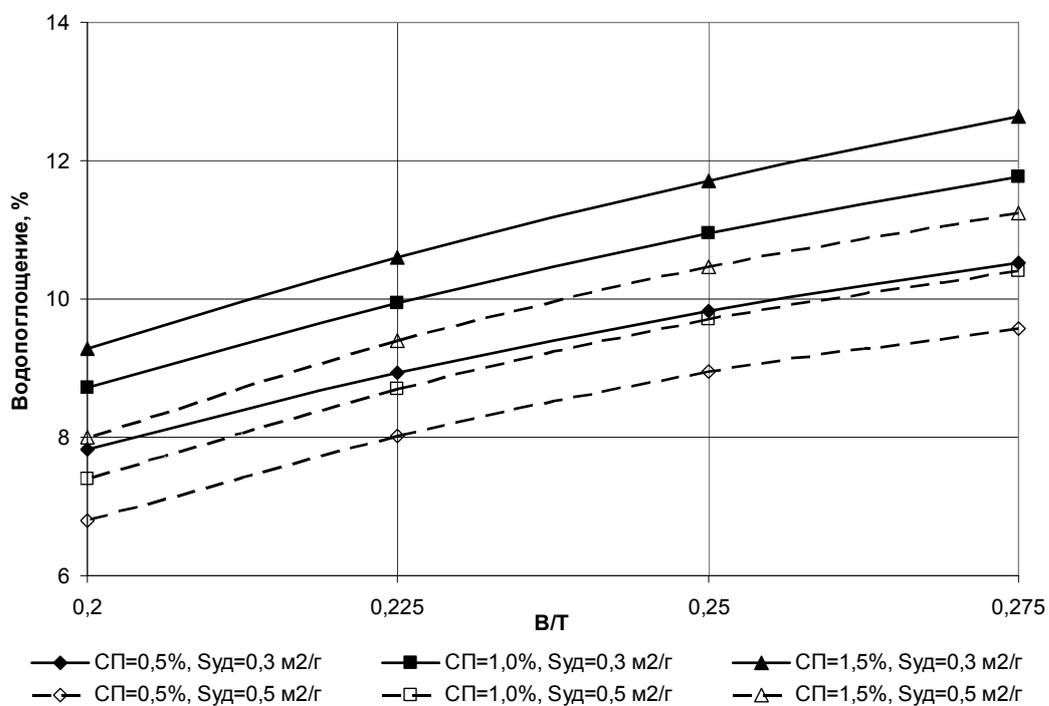


Рис. 6. Изменение водопоглощения пропиточных матриц при отношении ПЦ/Н = 40/60

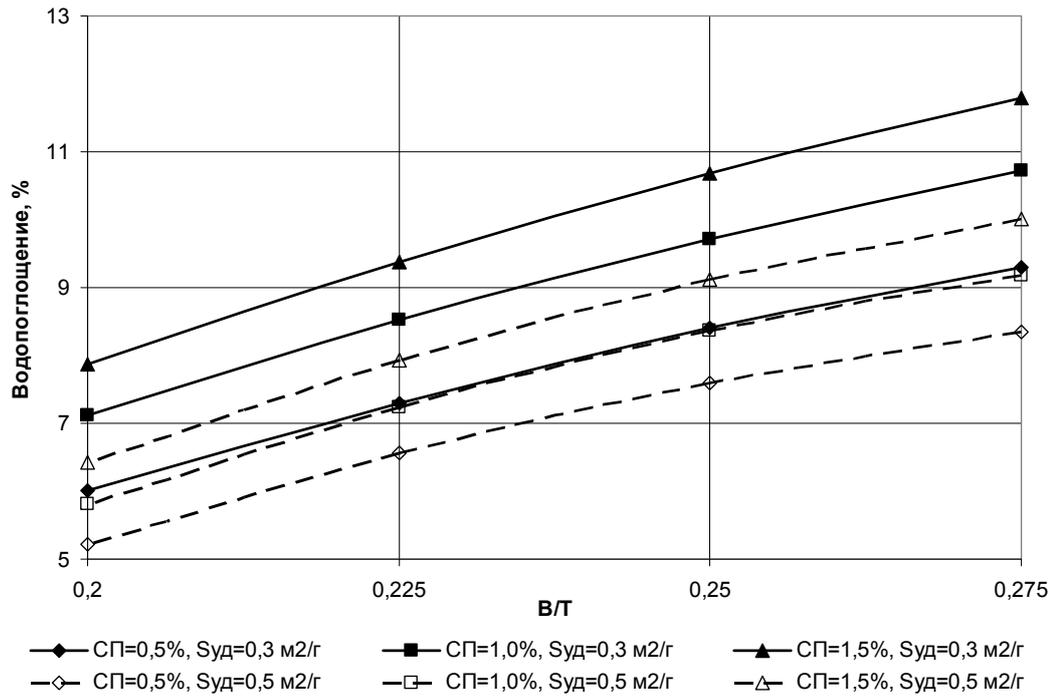


Рис. 7. Изменение водопоглощения пропиточных матриц при отношении ПЦ/Н = 50/50

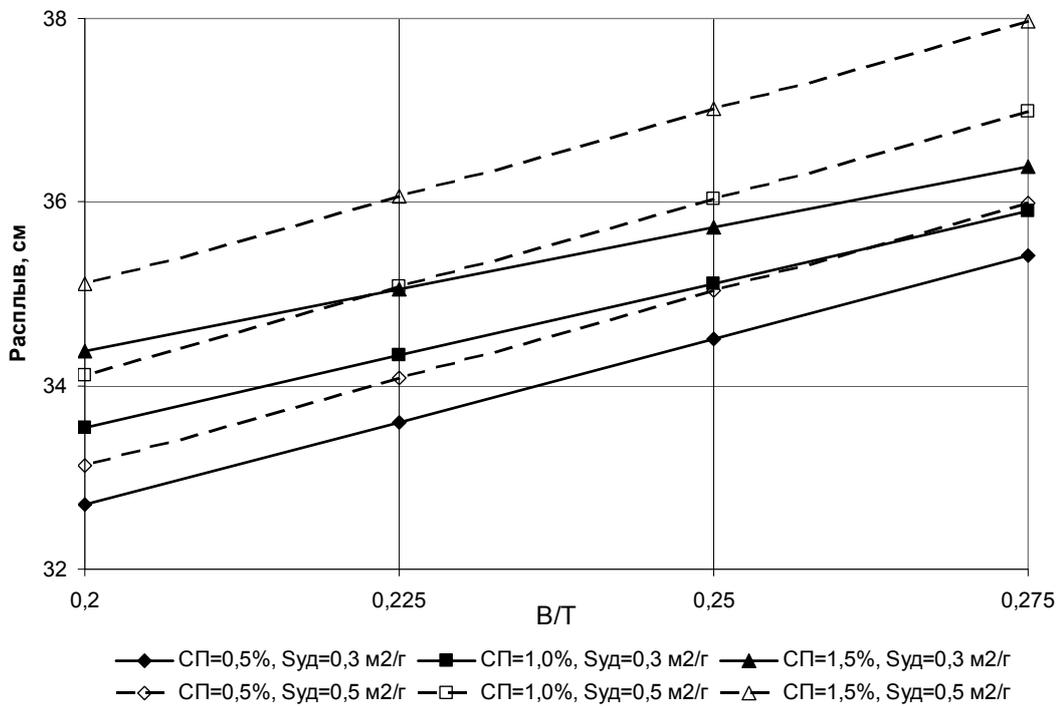


Рис. 8. Изменение расплава пропиточных матриц при отношении ПЦ/Н = 30/70

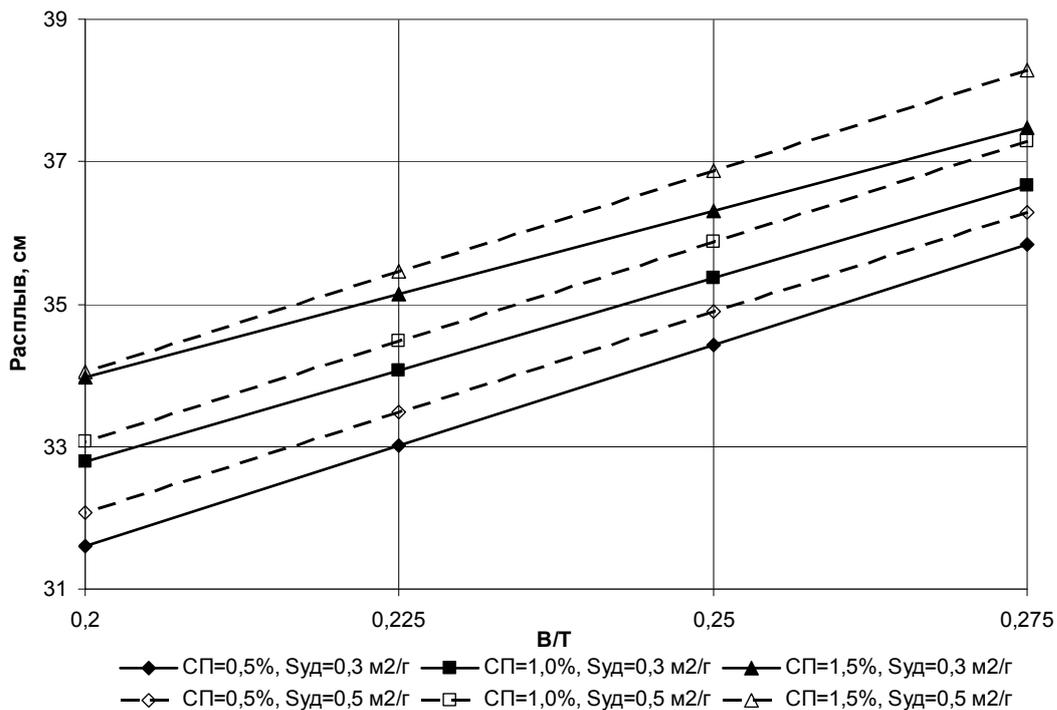


Рис. 9. Изменение распльива пропиточных матриц при отношении ПЦ/Н = 40/60

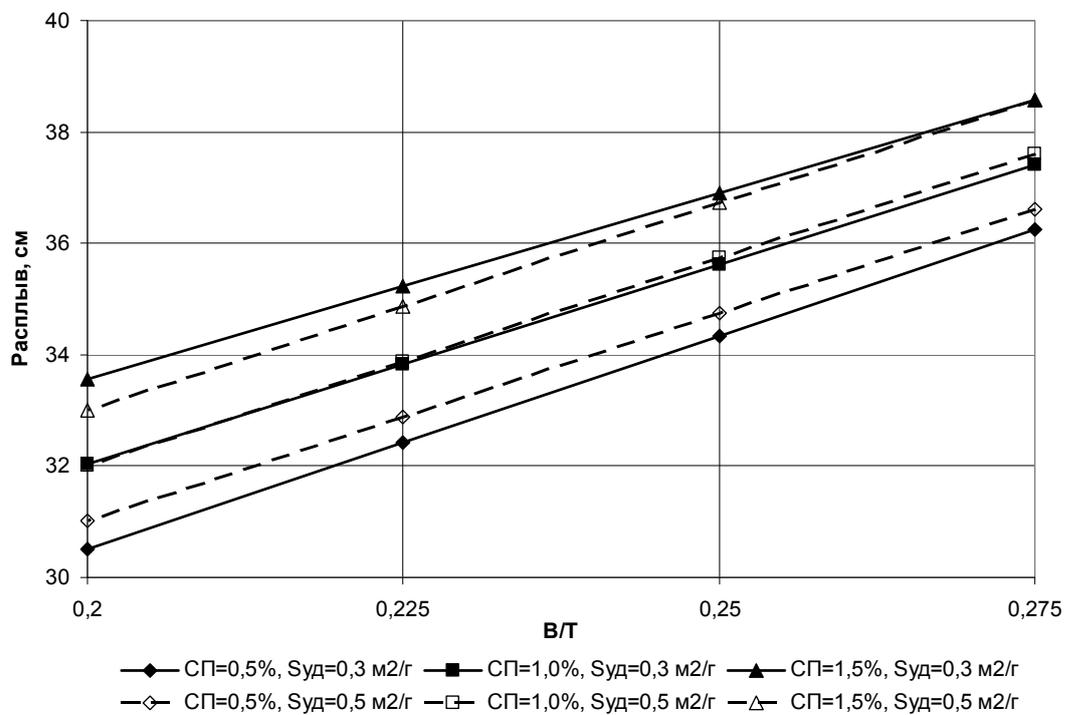


Рис. 10. Изменение распльива пропиточных матриц при отношении ПЦ/Н = 50/50

На основании экспериментальных данных и полученных математических моделей можно сделать следующие выводы:

1. Выбранные диапазоны изменения факторов (Щ/Н, В/Т, количество СП) позволяют изготавливать пропиточные цементные матрицы с широкими диапазонами значений реологических и структурных характеристик. Так, расплыв матриц изменялся в пределах 30,5...38,6 см и 31,0...38,6 см, средняя плотность – 1901...2107 кг/м<sup>3</sup> и 1921...2165 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощение – 6,0...12,6 % и 5,2...11,4 % при введении в состав матриц наполнителя с удельной поверхностью, равной 0,3 и 0,5 м<sup>2</sup>/г соответственно.

2. Увеличение количества СП «Melflux 1641F», водотвердого отношения и содержания наполнителя в составах матриц приводит к снижению их средней плотности и росту водопоглощения. Расплыв композиций растет с увеличением СП и В/Т, также на него оказывает некоторое влияние увеличение содержания наполнителя и его удельной поверхности. С повышением удельной поверхности наполнителя наблюдалось увеличение средней плотности и снижение водопоглощения пропиточных матричных композиций.

3. Получены эффективные составы наполненных пластифицированных матриц с реологическими и структурными характеристиками, пригодными в последующем для изготовления каркасных композитов, материалов, конструкций и изделий на их основе.

#### Список литературы

1. Ерофеев, В.Т. Каркасные строительные композиты: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.Т. Ерофеев. – М., 1993. – 52 с.
2. Леснов, В.В. Дисперсно-армированные каркасные бетоны / В.В. Леснов, В.Т. Ерофеев, М.А. Асташов // Известия ОрелГТУ. Сер. Стр.-во. Трансп. – 2008. – №4/20 (551). – С. 70–74.
3. Ерофеев, В.Т. Армированные каркасные композиты для зданий и сооружений / В.Т. Ерофеев, В.И. Римшин, В.Ф. Смирнов [и др.]. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. – 360 с.
4. Леснов, В.В. Влияние металлической дисперсной арматуры и суперпластифицирующих добавок на ударную вязкость и структурные свойства каркасных композитов / В.В. Леснов, В.Т. Ерофеев // Русский инженер. – 2017. – №4(57). – С. 68–70.
5. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – М., 1998. – 768 с.
6. Дворкин, Л.И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями: монография / Л.И. Дворкин, В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, С.М. Чудновский. – Киев: Будивельник, 1991. – 136 с.

#### References

1. Erofeev, V.T. Carcass building composites: abstract of the thesis of doctor of technical Sciences / V.T. Erofeev. – M., 1993. – 52 p.
2. Lesnov, V.V. Fiber reinforced carcass concretes / V.V. Lesnov, V.T. Erofeev, M.A. Astashov // Izvestiya OrelGTU. Ser. Build. Transp. – 2008. – №4/20 (551). – P. 70–74.
3. Erofeev, V.T. Reinforced carcass composites for buildings and structures / V.T. Erofeev, V.I. Rimshin, V.F. Smirnov [et al.]. – Saransk: Mordovia State University Publishing House, 2015. – 360 p.
4. Lesnov, V.V. Study of the influence of different types of fibres and superplasticizing additives on the strength properties of carcass composites / V.V. Lesnov, V.T. Erofeev // Russian engineer. – 2017. – №3(56). – P. 46–48.
5. Batrakov, V.G. Modified concretes. Theory and practice / V.G. Batrakov. – M., 1998. – 768 p.
6. Dvorkin, L.I. Cement concretes with mineral fillers: monography / L.I. Dvorkin, V.I. Solomatov, V.N. Vyrovoy, S.M. Chudnovskij. – Kiev: Budivelnik, 1991. – 136 p.

УДК 691.175.2

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

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

**Черкасов Василий Дмитриевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Прикладная механика»  
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

*Вятский государственный университет*  
Россия, 610000, г. Киров,  
ул. Московская, д. 36,  
тел.: (8332) 74-25-65; (8332) 74-27-15

**Авдонин Валерий Викторович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Строительные  
конструкции и машины»  
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru

**Волоцкой Алексей Николаевич**,  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции и машины»  
E-mail: alexeyqwerty@mail.ru

**Юркин Юрий Викторович**,  
кандидат технических наук,  
зав. кафедрой «Строительные конструкции  
и машины»  
E-mail: yurkin@vyatsu.ru

**Мансурова Ирина Алексеевна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Химия и технология  
переработки полимеров»  
E-mail: i.a.mansurova@yandex.ru

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

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

**Cherkasov Vasily Dmitrievich**,  
Doctor of Science, Professor,  
Head of the department «Applied mechanics»  
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

*Vyatka State University*  
Russia, 610000, Kirov, 36, Moskovskaya St.,  
tel.: (8332) 74-25-65; (8332) 74-27-15

**Avdonin Valeriy Viktorovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Building Structures and  
Machines»  
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru

**Volotskoy Alexey Nikolaevich**,  
Postgraduate student of the department  
«Building Structures and Machines»  
E-mail: alexeyqwerty@mail.ru

**Yurkin Yuriy Viktorovich**,  
Candidate of Sciences, Head of the  
department «Building Structures and  
Machines»  
E-mail: yurkin@vyatsu.ru

**Mansurova Irina Alexeevna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Chemistry and Polymer  
Processing Technology»  
E-mail: i.a.mansurova@yandex.ru

## ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭТИЛЕНВИНИЛАЦЕТАТА\*

В.Д. Черкасов, В.В. Авдонин, А.Н. Волоцкой, Ю.В. Юркин, И.А. Мансурова

Благодаря установленным экспериментальным зависимостям определен тип смолы, улучшающий вибропоглощающие свойства и повышающий жесткость композитов на основе этиленвинилацетата. Установлен предел работоспособности композитов со смолами при отрицательных температурах.

*Ключевые слова: этиленвинилацетат, смола, тангенс угла механических потерь, модуль упругости, температура*

## THE INFLUENCE OF MODIFIED ADDITIVES ON DYNAMIC PROPERTIES OF POLYMERIC MATERIALS BASED ON ETHYLENE- VINYL ACETATE

V.D. Cherkasov, V.V. Avdonin, A.N. Volotskoy, Yu.V. Yurkin, I.A. Mansurova

Due to the established experimental dependencies the authors have determined the type of resin, which improves damping properties and increases the stiffness of composites based on ethylene-vinyl

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (Соглашение № 075-02-2018-410 от 15 ноября 2018 г.).

acetate. The limit of working capacity of composites with resins at negative temperatures is established.

*Keywords: ethylene-vinyl acetate, resin, mechanical loss tangent, modulus of elasticity, temperature*

### Введение

В настоящее время полимерные материалы представляют собой самый важный сегмент всех материалов в плане производства и использования их в различных сферах жизнедеятельности. В сравнении с металлами полимеры лучше подвергаются обработке, имеют низкую плотность, высокое значение соотношения прочности к весу, обладают хорошим сопротивлением к коррозии [1]. Такие материалы имеют различные области применения. Одной из них является использование полимерных материалов в качестве защиты от шума и вибрации.

Вибропоглощающие материалы представляют собой композиты, состоящие из одной или нескольких непрерывных фаз (матрицы) и одной (или более) дисперсной фазы (наполнителя) [2]. В данной работе в качестве матрицы вибропоглощающего полимерного материала использовался этиленвинилацетат (ЭВА).

Эффективность вибропоглощения оценивается динамическими механическими характеристиками, связанными между собой следующим соотношением:

$$\operatorname{tg} \delta = \eta = \frac{E''}{E'} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{\psi}{2\pi}, \quad (1)$$

где  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла потерь;  $\eta$  – коэффициент потерь;  $\delta$  – логарифмический декремент колебаний;  $\psi$  – относительное рассеяние, или коэффициент поглощения;  $E''$  – модуль потерь материала, МПа;  $E'$  – модуль накопления, или динамический модуль упругости материала, МПа.

Демпфирующие способности вибропоглощающих полимерных материалов оцениваются высотой и шириной пика тангенса угла механических потерь в области стеклования материала.

Большинство полимеров имеют температуру стеклования ( $T_c$ ) за пределами диапазона эксплуатации вибропоглощающих материалов, и поэтому их применение в чистом виде ограничено. Для того чтобы сдвинуть  $T_c$  в требуемый диапазон температур и повысить значения тангенса угла механических потерь ( $\operatorname{tg} \delta$ ), в полимер вводят различные добавки. Одним из способов повышения демпфирующих свойств полимеров является добавление модификаторов – смол [3-6]. Алкилфенолформальдегидная смола (АФФС) и эфир канифоли глицериновый (ЭК), используемые в данной работе в качестве модификаторов, содержат гидроксильные группы (рис. 1) – фенольные и спиртовые соответственно [7]. Эти группы способны образовывать межмолекулярные взаимодействия с этиленвинилацетатом в виде водородных связей и тем самым повышать значение  $\operatorname{tg} \delta$  [3, 6, 8].

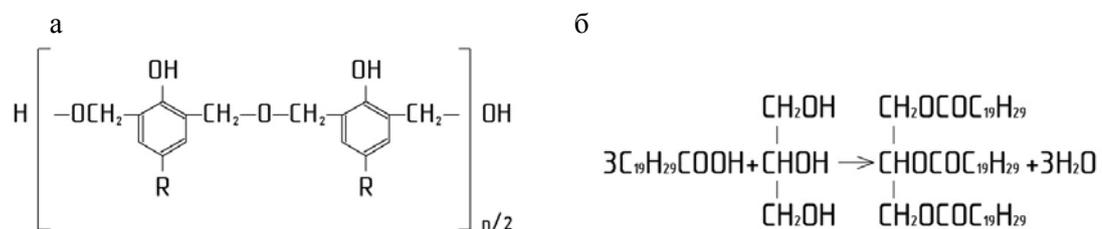


Рис. 1. Химическая структура:  
а – АФФС; б – эфир канифоли глицериновый

Данная работа посвящена исследованию динамических свойств композитов на основе этиленвинилацетата в широком диапазоне температур (от минус  $70^\circ\text{C}$  до плюс  $40^\circ\text{C}$ ) при добавлении различных модификаторов.

**Материалы и методы исследования***Материалы*

Этиленвинилацетат марки LG EVA ES 28005 с процентным содержанием винилацетата 28 % использовался как полимерная основа исследуемых композитов. При изготовлении экспериментальных образцов в качестве пластификатора использовался хлорпарафин ХП-470(ХП) ТУ 2493-379-05763441-2002 (ВитаХим, Россия). Объемное содержание хлорпарафина в составе смеси 40 %. Мел применялся как инертный наполнитель. Объемное содержание наполнителя в составе полимерной композиции ( $50 \pm 1$ ) %. В качестве модификаторов были использованы два типа смол: алкилфенолформальдегидная смола SP-1045 («SI Group», Франция); эфир канифоли глицериновый ТУ 2435-063-05788576-2008 (ОАО «ОРГСИНТЕЗ», г. Нижний Новгород).

Составы и марки исследуемых композитов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Составы и марки исследуемых композитов

Марка смеси	Полимер	Пластификатор	Наполнитель	Модификатор	
	ЭВА, мас. ч.	ХП, мас. ч.	Мел, мас. ч.	АФФС, мас. ч.	ЭК, мас. ч.
E100	100	-	-	-	-
EX4	60	53	-	-	-
EX4M4	100		241	-	-
EX4CF1M4	90		233	10	-
EX4CF2M4	80			20	-
EX4CF3M4	70			30	-
EX4CK1M4	90		237	-	10
EX4CK2M4	80			-	20
EX4CK3M4	70			-	30

*Изготовление образцов*

Полимерные смеси изготавливали с помощью лабораторного смесителя периодического действия с тангенциальными роторами. Первоначально перемешивали полимер при температуре плюс 120°C при числе оборотов 44 об/мин в течение 20 минут. Далее полимер смешивали с пластификатором, добавляли наполнитель, модификатор и затем раскатывали на вальцах до получения материала однородной толщины.

*Динамический механический анализ (ДМА)*

ДМА экспериментальных образцов в виде диска толщиной 2 мм был выполнен с использованием прибора Netzsch DMA 242 C. Модуль упругости и тангенс угла механических потерь определяли в диапазоне температур от минус 70°C до плюс 40°C при частоте 1 Гц, 10 Гц.

*Испытание на хладостойкость*

Образцы размером 5×15 см и толщиной около 2 мм помещали на 30 минут в холодильную камеру. По истечении этого времени каждый из образцов, не вынося из холодильной камеры, равномерно в течение 2 с изгибали по дуге шаблона радиусом 250 мм. Температуру, при которой на образце появляется первая трещина, фиксировали. Диапазон температур, при которых проводили испытание на хладостойкость, составлял от 0°C до минус 70°C.

**Результаты исследования и их обсуждение***Тангенс угла механических потерь*

Для оценки влияния модификаторов на динамические свойства композита необходимо знать меру воздействия остальных компонентов, входящих в его состав.

Этиленвинилацетат за счет содержания в его структуре полярных винилацетатных звеньев относится к полярным каучукам. Чем больше в ЭВА содержится данных звеньев, тем сильнее его полярность. Большое количество полярных боковых групп в

структуре данного сополимера дает высокое значение тангенса угла механических потерь [8-10].

Исходный этиленвинилацетат (E100) с 28 % содержанием винилацетатных звеньев при частоте 1 Гц имеет температуру стеклования минус 34°С, а тангенс угла механических потерь при данной температуре составляет 0,374 (рис.2а, 3а).

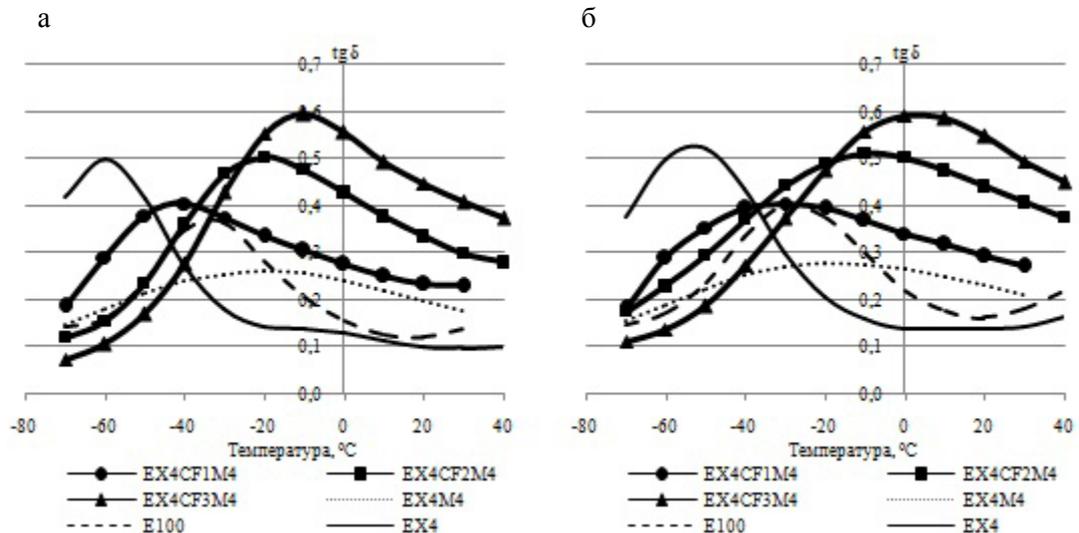


Рис. 2. Сравнение  $\text{tg } \delta$  E100, EX4, EX4M4, EX4CF1M4, EX4CF2M4, EX4CF3M4:  
а – при частоте 1 Гц; б – при частоте 10 Гц

При добавлении в исходный полимер пластификатора закономерно происходят уменьшение пика  $\text{tg } \delta$  и сдвиг  $T_c$  в сторону более низких температур. Например, после добавления в ЭВА хлорпарафина ХП-470  $\text{tg } \delta$  при частоте 1 Гц равен 0,498, а  $T_c$  сдвигается в область отрицательных температур на 26°С (см. рис.2а, 3а). Это объясняется тем, что хлорпарафин, являясь внутримолекулярным пластификатором, повышает гибкость цепей ЭВА. Данная гибкость проявляется в том, что молекулы хлорпарафина могут произвольно располагаться между молекулярными цепями ЭВА, при этом каждая молекула пластификатора блокирует одну полярную группу этиленвинилацетата, что приводит к снижению взаимодействия между молекулярными цепочками полимера. В результате повышается сегментов, и они могут перемещаться при более низких температурах [11, 12].

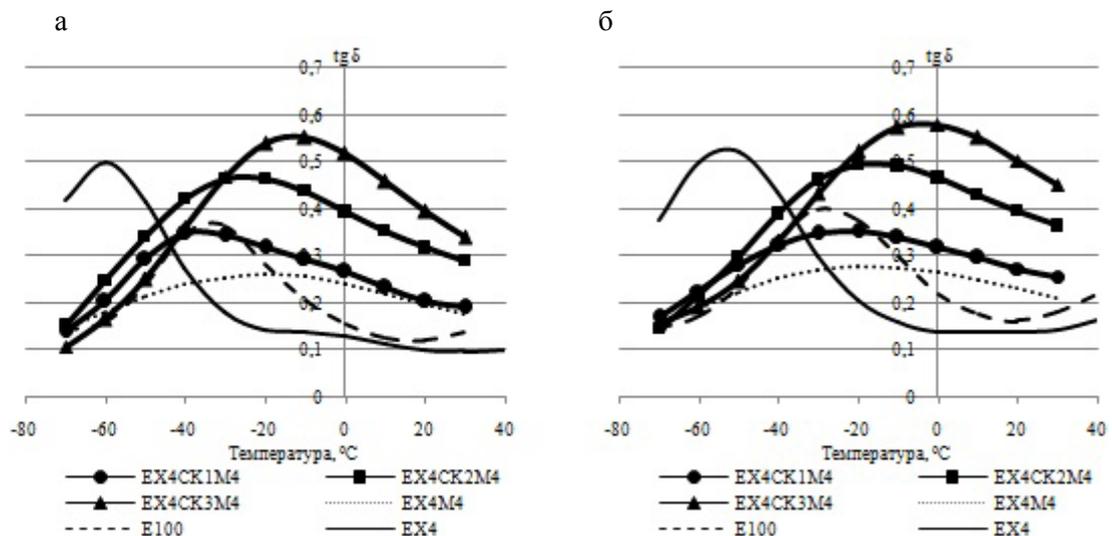


Рис. 3. Сравнение  $\text{tg } \delta$  E100, EX4, EX4M4, EX4СК1М4, EX4СК2М4, EX4СК3М4:  
а – при частоте 1 Гц; б – при частоте 10 Гц

Введение в пластифицированный полимер наполнителя приводит к снижению пика  $\text{tg}\delta$  и смещению  $T_c$  в сторону положительных температур. Например, при добавлении в смесь ЕХ4 инертного наполнителя – мела – значение  $\text{tg}\delta$  равно 0,260, а  $T_c$  сдвигается в область плюсовых температур на  $40^\circ\text{C}$  (см. рис.2а, 3а). Уменьшение значения  $\text{tg}\delta$  и смещение температуры стеклования ЕХ4М4 обусловлены тем, что мел, являясь неорганическим наполнителем, ограничивает движение сегментов полимерной цепи ЭВА путем блокировки свободного объема между молекулами [3, 13]. На поверхности частиц наполнителя адсорбируется большая часть макромолекул ЭВА, что приводит к существенному снижению сегментальной подвижности композите. Аналогичная ситуация происходит при частоте 10 Гц (см. рис.2б, 3б). Повышение частоты на порядок приводит к закономерному возрастанию  $T_c$ .

Эффективность модификаторов зависит от их совместимости с этиленвинилацетатом и определяется параметром растворимости. «Полярное» растворяется в «полярном». Данное утверждение справедливо не только для пластификаторов, но и для смол, представленных в данной работе. АФФС SP-1045 является полярной терморективной смолой, а эфир канифоли – менее полярной смолой (см. табл. 2). На рис. 2-5 показано влияние АФФС и ЭК на динамический модуль упругости и тангенс угла механических потерь композитов на основе ЭВА. При добавлении смол в количестве 10 мас. ч. высота пика  $\text{tg}\delta$  увеличивается и происходит смещение температуры стеклования и, соответственно,  $\text{tg}\delta$  в сторону отрицательных температур относительно наполненного мелом композита. Например, для композита с АФФС в количестве 10 мас. ч. при частоте 1 Гц тангенс угла механических потерь увеличивается на 0,145 относительно  $\text{tg}\delta$  немодифицированной смеси ЕХ4М4 и смещается в сторону отрицательных температур на  $22^\circ\text{C}$  (см. рис. 2а). Такой же эффект наблюдается при добавлении ЭК:  $\text{tg}\delta$  композита с ЭК в количестве 10 мас. ч. при частоте 1 Гц увеличивается на 0,09 относительно  $\text{tg}\delta$  наполненной мелом смеси, а  $T_c$  и  $\text{tg}\delta$  смещаются в область отрицательных температур на  $18^\circ\text{C}$  (см. рис. 3а). По-видимому, небольшая концентрация модификатора в составе композита приводит к тому, что малая часть смолы растворяется и работает как пластификатор, изолируя полярные группы ЭВА.

При добавлении смол в количестве 20 мас. ч. и 30 мас. ч. тенденция к увеличению тангенса угла механических потерь сохраняется, однако повышение концентрации модификатора в составе композита приводит к смещению температуры стеклования и, следовательно,  $\text{tg}\delta$  в сторону положительных температур. Например, для композита с АФФС в количестве 20 мас. ч. при частоте 1 Гц тангенс угла механических потерь увеличивается на 0,098 относительно  $\text{tg}\delta$  композита с АФФС содержанием 10 мас. ч., а  $T_c$  и пик  $\text{tg}\delta$  смещаются в сторону положительных температур на  $22^\circ\text{C}$  (см. рис. 2а). Для композита с ЭК содержанием 20 мас. ч. при частоте 1 Гц наблюдается та же зависимость:  $\text{tg}\delta$  увеличивается на 0,113 относительно  $\text{tg}\delta$  композита с ЭК содержанием 10 мас. ч., а  $T_c$  и пик тангенса угла механических потерь смещаются в область положительных температур на  $13^\circ\text{C}$  (см. рис. 2а). Увеличение и смещение пика  $\text{tg}\delta$  в сторону положительных температур происходит из-за образования внутримолекулярных водородных связей между гидроксильными группами смол и боковыми группами ЭВА [3, 14, 15]. Водородные связи диссоциируют и преобразуются, расходуя много энергии. В результате значение  $\text{tg}\delta$  увеличивается и вибропоглощающие свойства материала улучшаются [8]. Смещение пика тангенса угла механических потерь также может быть обусловлено тем, что температура стеклования смол намного больше, чем температура стеклования исходного полимера (см. табл. 2) [16, 17]. С точки зрения молекулярного уровня увеличение  $T_c$  модифицированного композита означает, что наличие модификатора (АФФС или ЭК) вызывает уменьшение свободного объема в матрице [16]. В результате данные смолы образуют собственную фазу и располагаются в виде частиц подобно наполнителю в объеме композита.

Параметр растворимости и температура стеклования модификаторов

Наименование	Параметр растворимости $\delta$ , (МПа) <sup>0,5</sup> [18]	Температура стеклования $T_c$ , °C <sup>1</sup>
АФФС	18,73	69
ЭК	≈16,38	67

<sup>1</sup>Измерены методом DSC.

Из рис. 2–3 видно, что при увеличении концентрации АФФС в составе композита смещение пика тангенса угла механических потерь в сторону положительных температур происходит сильнее, чем при добавлении эфира канифоли. Например, при частоте 1 Гц увеличение концентрации смолы в составе полимерной композиции приводит к смещению  $T_c$  и  $\text{tg}\delta$  на 13 °С и 10–22 °С для эфира канифоли и алкилфенолформальдегидной смолы соответственно (см. рис. 2а, 3а). Аналогично при повышении концентрации смолы в составе полимерной смеси наибольшие значения  $\text{tg}\delta$  наблюдаются у композитов с АФФС относительно композитов с эфиром канифоли. Например, при частоте 1 Гц и наибольшей концентрации смолы (30 мас. ч.) значение  $\text{tg}\delta$  составляет 0,551 и 0,595 для эфира канифоли и алкилфенолформальдегидной смолы соответственно (см. рис. 2а, 3а).

Алкилфенолформальдегидная смола имеет бóльшую полярность по сравнению с эфиром канифоли, исходя из параметров растворимости, представленных в табл. 2. В результате АФФС сильнее взаимодействует с ЭВА посредством внутримолекулярных водородных связей, что отражается на изменении пика тангенса угла механических потерь.

Аналогичная ситуация происходит при частоте 10 Гц (см. рис. 2б, 3б).

#### *Динамический модуль упругости*

Полимеры оказывают наиболее эффективное вибропоглощение в силу наличия у них переходной области вследствие вязкоупругого поведения полимеров [19]. Вязкоупругое поведение полимеров описывается комплексным модулем упругости [19, 20]:

$$E^* = E' + E'' \quad (2)$$

Первое слагаемое выражения (2) отвечает за упругие свойства полимера, а второе – за вязкие (неупругие) свойства.

В настоящей работе в качестве модуля упругости определялся динамический модуль упругости.

Данные по динамическим модулям упругости исходного этиленвинилацетата и композитов на основе ЭВА представлены в виде графиков (рис.4–5). Динамический модуль упругости исходного ЭВА при разных частотах не превышает 100 МПа. Например, при частоте 1 Гц и температуре минус 30°С  $E'$  8 МПа.

В пластифицированном ЭВА  $E'$  понижается. Например, при частоте 1 Гц и температуре минус 30°С  $E'$  составляет 2 МПа. Уменьшение динамического модуля упругости смеси EX4 обусловлено разбавлением полимера и увеличением длины отрезков цепей между физическими зацеплениями [21].

При добавлении мела в EX4 значение  $E'$  композиции EX4M4 увеличивается. Например, при частоте 1 Гц и температуре минус 30°С  $E'$  составляет 45 МПа. Это объясняется тем, что мел относится к жестким дисперсным наполнителям и, по-видимому, обладает хорошей адгезией между фазами (матрицы и наполнителя) [21, 22].

При частоте 1 Гц смолы резко смещают  $T_c$  композитов и уменьшают  $E'$  в зоне высокоэластичности, по сравнению с переходной областью (см. рис. 4а, 5а). По мере увеличения концентрации модификатора в составе полимерной смеси температура стеклования композита приближается к температуре стеклования модификатора. Температура стеклования смол лежит в области положительных температур (см. табл. 2), в результате динамический модуль упругости с увеличением содержания смолы в

составе композита уменьшается в области резиноподобных материалов и возрастает в переходной области (см. рис. 4а, 5а).

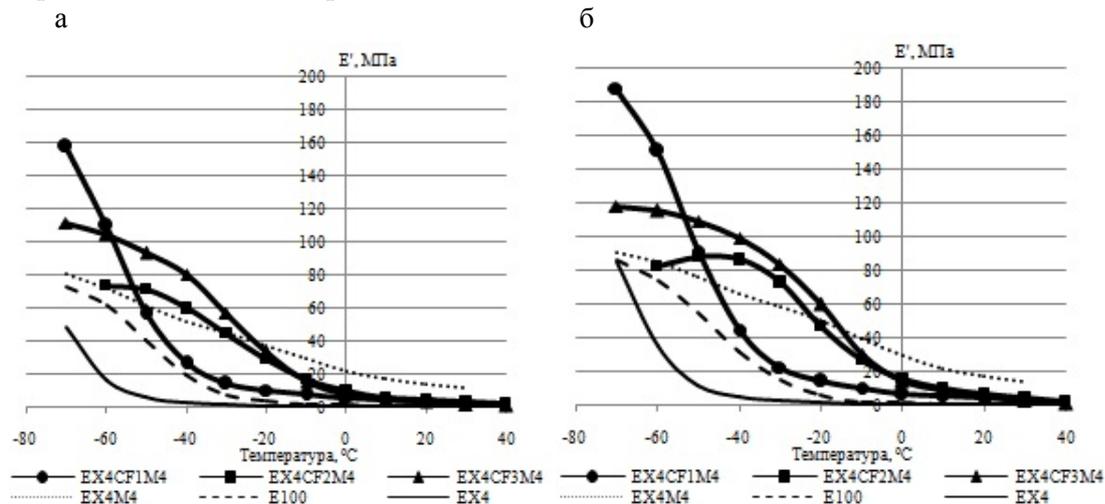


Рис. 4. Сравнение  $E'$  E100, EX4, EX4M4, EX4CF1M4, EX4CF2M4, EX4CF3M4:  
а – при частоте 1 Гц; б – при частоте 10 Гц

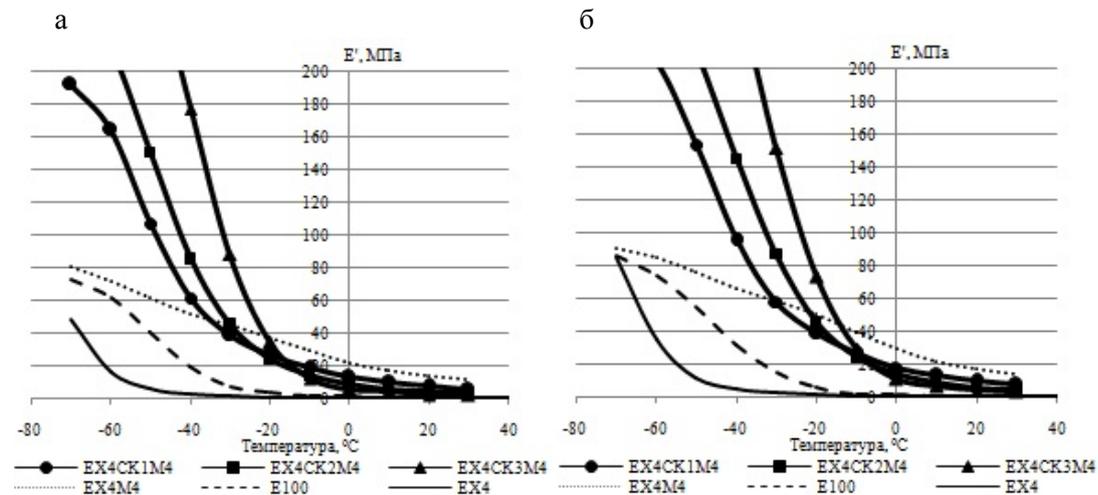


Рис. 5. Сравнение  $E'$  E100, EX4, EX4M4, EX4СК1M4, EX4СК2M4, EX4СК3M4:  
а – при частоте 1 Гц; б – при частоте 10 Гц

При добавлении в EX4M4 смол происходит не только увеличение динамического модуля упругости в переходной области, но и смещение его кривой в сторону положительных температур с повышением концентрации модификатора в композите. Самые большие значения  $E'$  – у композитов с ЭК (см. рис. 5б). Аналогичная ситуация наблюдается при частоте 10 Гц (см. рис. 4б, 5б). Повышение частоты на порядок приводит к закономерному увеличению динамического модуля упругости композита согласно температурно-частотной суперпозиции.

*Хладостойкость*

Из результатов динамического механического анализа видно, что пик тангенса угла механических потерь модифицированных смесей расположен в отрицательной области температур. Исходя из этого, были проведены испытания на хладостойкость с целью определения предела работоспособности композитов со смолами при отрицательных температурах.

Испытания на хладостойкость показали, что все образцы выдерживают воздействие отрицательных температур до минус 40 °C. Однако при понижении температуры до минус 50 °C на образцах EX4CF3M4 и EX4СК3M4 появляются трещины. Это происходит из-за того, что в данных композитах самый большой процент содержания

смола, а  $T_c$  наиболее сильно смещена в сторону положительных температур относительно исходного ЭВА. Также данные композиты имеют наибольшие значения динамического модуля упругости и, соответственно, являются более хрупкими при отрицательных температурах по сравнению с другими образцами.

#### Заключение

По результатам проведенных исследований установлены экспериментальные зависимости тангенса угла механических потерь и динамического модуля упругости в зависимости от типа и концентрации модификатора для композита EX4M4.

Показано, что и алкилфенолформальдегидная смола, и эфир канифоли глицериновой способствуют повышению тангенса угла механических потерь наполненного мелом композита на 0,145-0,335 и на 0,09-0,291 соответственно при 1 Гц. Такая же зависимость прослеживается при 10 Гц. Наибольшие значения  $\text{tg}\delta$  наблюдаются при использовании модификатора АФФС с 30 мас. ч. (0,595 при 1 Гц и 0,592 при 10 Гц).

Выяснено, что АФФС с 30 мас. ч. сильнее смещает  $T_c$  композита EX4M4 в сторону положительных температур (на  $10^\circ\text{C}$  при 1 Гц и на  $15^\circ\text{C}$  при 10 Гц) по сравнению с ЭК того же содержания.

Композиты с добавлением эфира канифоли являются более жесткими и, соответственно, имеют наибольшие значения динамического модуля упругости.

Установлено, что все модифицированные композиты способны выдерживать воздействие отрицательных температур до минус  $40^\circ\text{C}$ . Также обнаружено, что чем больше смолы в составе композита, тем больше пик  $\text{tg}\delta$  и его смещение в сторону положительных температур, но меньше хладостойкость композита.

Полученные результаты дают возможность выбрать тип и концентрацию модификатора для композитов на основе ЭВА исходя из необходимого диапазона температур и других требований, предъявляемых к тому или иному вибропоглощающему материалу.

#### Список литературы

1. Lapcik, L. Effect of the talc filler content on the mechanical properties of polypropylene composites / L. Lapcik, P. Jindrova, B. Lapcikova, R. Tamblyn, R. Greenwood, N. Rowson // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2008. – Vol. 110, № 5. – P. 2742–2747.
2. Ричардсон, М.О. Промышленные полимерные композиционные материалы / М. О. Ричардсон; пер. с англ. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1980. – 472 с.
3. Chang, S. Effects of phenolic oligomer on the dynamic mechanical properties of nitrile butadiene rubber / S. Chang, H. Pan, X. Lihuan, Z. Cheng // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vols. 335–336. – P. 120–123.
4. Caiyun, W. Dynamic mechanical properties in blends of poly (styrene-b-isoprene-b-styrene) with aromatic hydrocarbon resin / W. Caiyun, W. Guozhang, W. Chifei // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2006. – Vol. 102, № 5. – P. 4157–4164.
5. Chang, S. Effects of chemical structure of phenolic resin on damping properties of acrylate rubber-based blends / S. Chang, Z. Cunbin, X. Lihuan, Z. Cheng // *Journal of Macromolecular Science*. – 2015. – Vol. 54, № 2. – P. 177–189.
6. Пат. 2444694 Российская федерация, МПК F42B 5/02 F42B 5/03 F42B 12/72 F42B 12/74 F42B 30/02 C06B 27/00. Композиционный материал для травматических метательных снарядов огнестрельного оружия / Санкин Ю.И., Чуваткин Н.Н.; заявитель и патентообладатель ООО ПКП «АКБС». – № 2010144005/11; заявл. 27.10.2010; опубл. 10.03.2012, Бюл. № 7. – 13 с.
7. Xiaozhen, H. Damping properties of ethylene-vinyl acetate rubber/polylactic acid blends / H. Xiaozhen, Q. Ming, S. Xinyan // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 4, № 3. – P. 15–22.
8. Czanikova, K. Electrical and mechanical properties of ethylene vinyl acetate based composites / K. Czanikova, Z. Spitalsky, I. Krupa, M. Omastova // *Materials Science Forum*. – 2012. – Vol. 714. – P. 193–199.

9. Сирота, А. Г. Модификация структуры и свойств полиолефинов / А.Г. Сирота. – М.: Химия, 1974. – 176 с.
10. Xiaopeng, L. The effect of paraffinic oil and aromatic oil on the crosslinks and physical properties of butyl rubber / L. Xiaopeng, T. Shan, L. Guangyong, M. Hoch, Z. Shugao // *Journal of Macromolecular Science*. – 2016. – Vol. 55, № 5. – P. 494–502.
11. Кошелев, Ф.Ф. Общая технология резины / Ф.Ф. Кошелев, А.Е. Корнев, А.М. Буканов. – М.: Химия, 1978. – 528 с.
12. Usman, M. Optimum calcium carbonate filler concentration for flexible polyurethane foam composite / M. Usman, S. Adeosun, G. Osifeso // *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. – 2012. – Vol. 11, № 3. – P. 311–320.
13. Chifei, W. Effects of a hindered phenol compound on the dynamic mechanical properties of chlorinated polyethylene, acrylic rubber, and their blend / W. Chifei // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2001. – Vol. 80, № 13. – P. 2468–2473.
14. Saburo, A. Dynamic mechanical and adhesive properties of acrylate rubber/chlorinated polypropylene blends compatibilized with a hindered phenol compound / A. Saburo // *Polymer Journal*. – 2001. – Vol. 33, № 12. – P. 955–958.
15. Liang, J. Effect of C5 petroleum resin content on damping behavior, morphology, and mechanical properties of BIIR/BR vulcanizates / J. Liang, S. Chang, N. Feng // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2013. – Vol. 130, № 1. – P. 510–515.
16. Галимзянова, Р.Ю. Влияние модификаторов на свойства неотверждаемых композиций на основе бутилкаучука / Р.Ю. Галимзянова, Т.В. Макаров, С.И. Вольфсон // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2009. – № 6. – С. 168–172.
17. Corsaro, R. Sound and vibration damping with polymers / R. Corsaro, L.H. Sperling. – Washington DC: American chemical society, 1990. – 480 с.
18. Beards, C. Structural vibration: analysis and damping / C. Beards. – N.Y.: Arnold, 1996. – 287 с.
19. Landel, R. Mechanical properties of polymers and composites / R. Landel, L. Nielsen. – N.Y.: CRC Press, 1993. – 580 с.
20. Ping, X. The structure and dynamic properties of nitrile-butadiene rubber/poly(vinyl chloride)/hindered phenol crosslinked composites / X. Ping, Z. Xiu-Ying, X. Da-Ling, L. Yong-Lai, Z. Li-Qun // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2008. – Vol. 109, № 1. – P. 106–114.
21. Young-Jun, P. Viscoelastic properties and lap shear strength of EVA/aromatic hydrocarbon resins as hot-melt adhesives / P. Young-Jun, K. Hyun-Joong, M. Rafailovich, J. Sokolov // *Journal of Adhesion Science and Technology*. – 2003. – Vol. 17, № 13. – P. 1831–1845.
22. Caiyun, W. Dynamic mechanical properties of acrylic rubber blended with phenolic resin / W. Caiyun, W. Chunyan, G. Weihong, W. Chifei // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2008. – Vol. 109, № 4. – P. 2065–2070.

#### References

1. Lapcik, L. Effect of the talc filler content on the mechanical properties of polypropylene composites / L. Lapcik, P. Jindrova, B. Lapcikova, R. Tamblyn, R. Greenwood, N. Rowson // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2008. – Vol. 110, № 5. – P. 2742–2747.
2. Richardson, M.O. Industrial polymer composite materials / M. O. Richardson. – M.: Chemistry, 1980. – 472 p.
3. Chang, S. Effects of phenolic oligomer on the dynamic mechanical properties of nitrile butadiene rubber / S. Chang, H. Pan, X. Lihuan, Z. Cheng // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vols. 335–336. – P. 120–123.
4. Caiyun, W. Dynamic mechanical properties in blends of poly (styrene-b-isoprene-b-styrene) with aromatic hydrocarbon resin / W. Caiyun, W. Guozhang, W. Chifei // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2006. – Vol. 102, № 5. – P. 4157–4164.

5. Chang, S. Effects of chemical structure of phenolic resin on damping properties of acrylate rubber-based blends / S. Chang, Z. Cunbin, X. Lihuan, Z. Cheng // *Journal of Macromolecular Science*. – 2015. – Vol. 54, № 2. – P. 177–189.
6. Caiyun, W. Dynamic mechanical properties of acrylic rubber blended with phenolic resin / W. Caiyun, W. Chunyan, G. Weihong, W. Chifei // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2008. – Vol. 109, № 4. – P. 2065–2070.
7. Patent RF 2444694, MPK F42B 5/02 F42B 5/03 F42B 12/72 F42B 12/74 F42B 30/02 C06B 27/00. Composite material for traumatic missiles of firearms / Sankin Y.I., Chuvatin N.N.; applicant and patent holder OOO PKP «AKBS». – № 2010144005/11; appl. 27.10.2010 ; publ. 10.03.2012, Bul. № 7. – 13 p.
8. Xiaozhen, H. Damping properties of ethylene-vinyl acetate rubber/poly(lactic acid) blends / H. Xiaozhen, Q. Ming, S. Xinyan // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 4, № 3. – P. 15–22.
9. Czanikova, K. Electrical and mechanical properties of ethylene vinyl acetate based composites / K. Czanikova, Z. Spitalsky, I. Krupa, M. Omastova // *Materials Science Forum*. – 2012. – Vol. 714. – P. 193–199.
10. Sirota, A.G. Modification of the structure and properties of polyolefins / A.G. Sirota. – M.: Chemistry, 1974. – 176 p.
11. Xiaopeng, L. The effect of paraffinic oil and aromatic oil on the crosslinks and physical properties of butyl rubber / L. Xiaopeng, T. Shan, L. Guangyong, M. Hoch, Z. Shugao // *Journal of Macromolecular Science*. – 2016. – Vol. 55, № 5. – P. 494–502.
12. Koshelev, F.F. The general technology of rubber / F.F. Koshelev, A.E. Kornev, A.M. Bukanov. – M.: Chemistry, 1978. – 528 p.
13. Usman, M. Optimum calcium carbonate filler concentration for flexible polyurethane foam composite / M. Usman, S. Adeosun, G. Osifeso // *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. – 2012. – Vol. 11, № 3. – P. 311–320.
14. Chifei, W. Effects of a hindered phenol compound on the dynamic mechanical properties of chlorinated polyethylene, acrylic rubber, and their blend / W. Chifei // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2001. – Vol. 80, № 13. – P. 2468–2473.
15. Saburo, A. Dynamic mechanical and adhesive properties of acrylate rubber/chlorinated polypropylene blends compatibilized with a hindered phenol compound / A. Saburo // *Polymer Journal*. – 2001. – Vol. 33, № 12. – P. 955–958.
16. Liang, J. Effect of C5 petroleum resin content on damping behavior, morphology, and mechanical properties of BIIR/BR vulcanizates / J. Liang, S. Chang, N. Feng // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2013. – Vol. 130, № 1. – P. 510–515.
17. Young-Jun, P. Viscoelastic properties and lap shear strength of EVA/aromatic hydrocarbon resins as hot-melt adhesives / P. Young-Jun, K. Hyun-Joong, M. Rafailovich, J. Sokolov // *Journal of Adhesion Science and Technology*. – 2003. – Vol. 17, № 13. – P. 1831–1845.
18. Galimzyanova, R.Yu. The influence of modifiers on the properties of non-curable compositions based on butyl rubber / R.Yu. Galimzyanova, T.V. Makarov, S.I. Volfson // *Bulletin of the Technological University*. – 2009. – № 6. – P. 168–172.
19. Corsaro, R. Sound and vibration damping with polymers / R. Corsaro, L.H. Sperling. – Washington DC: American chemical society, 1990. – 480 c.
20. Beards, C. Structural vibration: analysis and damping / C. Beards. – N.Y.: Arnold, 1996. – 287 c.
21. Landel, R. Mechanical properties of polymers and composites / R. Landel, L. Nielsen. – N.Y.: CRC Press, 1993. – 580 c.
22. Ping, X. The structure and dynamic properties of nitrile-butadiene rubber/poly(vinyl chloride)/hindered phenol crosslinked composites / X. Ping, Z. Xiu-Ying, X. Da-Ling, L. Yong-Lai, Z. Li-Qun // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2008. – Vol. 109, № 1. – P. 106–114.

УДК 691.175.2

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

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

**Черкасов Василий Дмитриевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Прикладная механика»  
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

**Авдонин Валерий Викторович,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Прикладная механика»  
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru

**Смиркин Андрей Сергеевич,**  
аспирант кафедры «Прикладная механика»  
E-mail: andrey\_1815@mail.ru

**Тюрин Михаил Владимирович,**  
аспирант кафедры «Прикладная механика»  
E-mail: mikh-tyu@mail.ru

**Бородин Александр Владимирович,**  
аспирант кафедры «Прикладная механика»

*Вятский государственный университет*

Россия, 610000, г. Киров,  
ул. Московская, д. 36,  
тел.: (8332) 74-25-65; (8332) 74-27-15

**Юркин Юрий Викторович,**  
кандидат технических наук,  
зав. кафедрой «Строительные конструкции  
и машины»  
E-mail: yurkin@vyatsu.ru

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

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

**Cherkasov Vasily Dmitrievich,**  
Doctor of Science, Professor,  
Head of the department «Applied mechanics»  
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

**Avdonin Valeriy Viktorovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Applied mechanics»  
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru

**Smirkin Andrey Sergeevich,**  
Postgraduate of the department «Applied  
mechanics»  
E-mail: andrey\_1815@mail.ru

**Tyurin Mikhail Vladimirovich,**  
Postgraduate of the department «Applied  
mechanics»  
E-mail: mikh-tyu@mail.ru

**Borodin Alexander Vladimirovich,**  
Postgraduate of the department «Applied  
mechanics»

*Vyatka State University*

Russia, 610000, Kirov, 36, Moskovskaya St.,  
tel.: (8332) 74-25-65; (8332) 74-27-15

**Yurkin Yuriy Viktorovich,**  
Candidate of Sciences, Head of the  
department «Building Structures and  
Machines»  
E-mail: yurkin@vyatsu.ru

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТА С УЧЕТОМ СВОЙСТВ МЕЖФАЗНОГО СЛОЯ

В.Д. Черкасов, В.В. Авдонин, Ю.В. Юркин,  
А.С. Смиркин, М.В. Тюрин, А.В. Бородин

Рассматривается подход к прогнозированию демпфирующих свойств композита с учетом образования на поверхности наполнителя межфазного слоя со свойствами, отличными от свойств матрицы. Экспериментально показано, что разработанный способ прогнозирования демпфирующих свойств дает хорошую сходимость с теоретическими данными.

*Ключевые слова:* композит, демпфирующие свойства, межфазный слой, коэффициент потерь

## FORECASTING DAMPING PROPERTIES OF COMPOSITE TAKING INTO ACCOUNT THE PROPERTIES OF THE INTERPHASE LAYER

V.D. Cherkasov, V.V. Avdonin, Yu.V. Yurkin,  
A.S. Smirkin, M.V. Tyurin, A.V. Borodin

Forecasting composite damping properties taking into account formation of interphase layer on the surface of the filler with properties other than properties of a matrix is considered in the article. It is experimentally shown that the developed way of forecasting the damping properties corresponds experimental data.

*Keywords: composite, damping properties, interphase layer, loss coefficient*

Демпфирующие свойства, связанные с релаксационными процессами в композитах, изменяются в результате образования межфазного слоя с измененной структурой, в том числе с измененной молекулярной подвижностью цепей, определяющей релаксационные характеристики [1]. Это связано с тем, что вследствие взаимодействия на границе раздела фаз часть полимера связывается наполнителем, в результате чего эффективная доля наполнителя увеличивается, что и приводит к снижению демпфирующих свойств композита.

Появление граничного слоя разделяет матрицу на 2 части: полимер в свободном состоянии  $m_1$  и полимер в граничном пленочном состоянии  $m_2$ . В связи с этим модель композита представим в виде шара из трех сферических концентрических слоев (рис. 1).

Задача определения свойств такого композита с применением вышеприведенной методики разбивается на два этапа. На первом этапе отдельно рассматриваются частица наполнителя и граничный слой с целью определения эффективных свойств состоящего из них композитного включения (рис. 2). На втором этапе рассматривается матрица со введенным в нее композитным включением, свойства которого определены на первом этапе (рис. 2). Таким образом, на каждом этапе рассматривается двухкомпонентный композит, решения для которого приведены в [4].

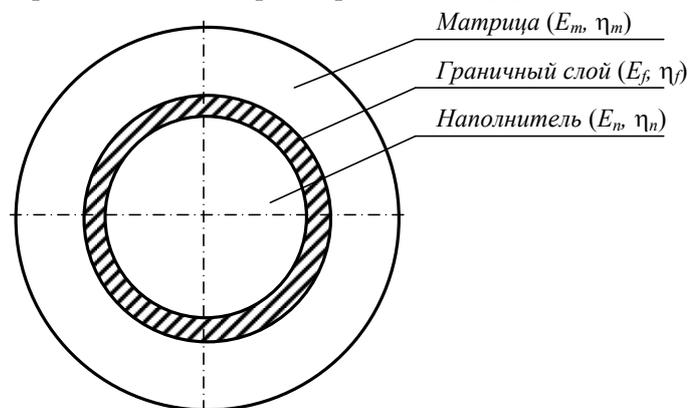


Рис. 1. Модель трехслойного композита

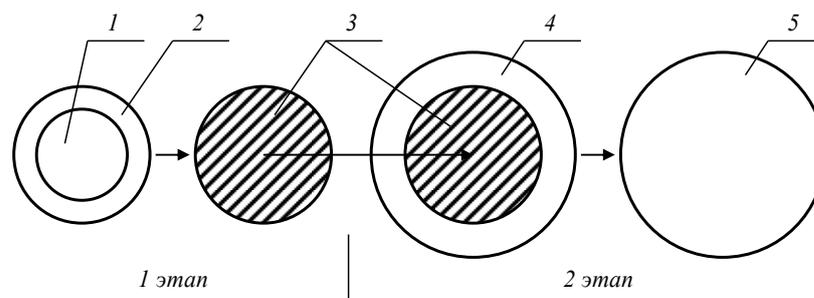


Рис. 2. Этапы решения задачи:

1 – наполнитель; 2 – граничный слой; 3 – композитное включение; 4 – матрица; 5 – композит

Введем новый структурный параметр, равный отношению количества матрицы в пленочном состоянии к общему его содержанию,  $\gamma = m_2/m$ , где  $m = 1 - \mu = m_1 + m_2$ .

Сначала вычислим характеристики составного включения, состоящего из наполнителя и граничного слоя матрицы. Объем пленки  $m_2 = \gamma(1 - \mu)$ . Объемное содержание наполнителя в составном наполнителе  $\mu_f = \mu/(m_2 + \mu)$ . Эффективный модуль композитного включения

$$K_{fn} = \frac{K_f(1 - \mu_f)}{(1 + \mu_f \theta_f) - \beta_f \mu_f (1 + \theta_f)}, \quad (1)$$

$$\beta_f = \frac{1 + \theta_f}{(\mu_f + \theta_f) + \frac{K_f}{K_n}(1 - \mu_f)}.$$

Коэффициент потерь композитного включения

$$\eta_{fn} = \eta_f - (\eta_f - \eta_n) \beta_f^2 \mu_f \frac{K_{fn}}{K_n}. \quad (2)$$

Объемное содержание таких включений  $\eta_{fn} = \mu + m_2 = \mu + \gamma(1 - \mu)$ , а эффективный модуль всей системы

$$K_k = \frac{K_m(1 - \mu_{fn})}{(1 + \mu_{fn} \theta_m) - \beta_m \mu_{fn} (1 + \theta_m)}, \quad (3)$$

$$\beta_m = \frac{1 + \theta_m}{(\mu_{fn} + \theta_m) + \frac{K_m}{K_{fn}}(1 - \mu_{fn})}.$$

Коэффициент потерь всей композитной системы

$$\eta_k = \eta_m - (\eta_m - \eta_{fn}) \beta_m^2 \mu_{fn} \frac{K_k}{K_{fn}}. \quad (4)$$

В формулах (1) и (2) индексом  $f$  обозначены свойства граничного слоя матрицы.

Непосредственное определение объема пленочного полимера (параметра  $\gamma$ ) из эксперимента затруднено, поэтому оценим его значение по данным моделирования геометрии среды. Известно [2], что при степени объемного наполнения  $\mu_{кр} = 0,35$  практически весь полимер находится в пленочном состоянии, поэтому представляется логичным связать значение  $\gamma$  с какой-либо физической характеристикой материала, нормированной таким образом, чтобы при пороговой концентрации  $\mu_{кр}$  параметр  $\gamma$  становился равным единице. Используем для этой цели количество частиц в единице объема  $N$ . Объем полимера в момент наполнения  $\mu_{кр}$  равен  $1 - \mu_{кр}$ , весь полимер при этом находится в пленочном состоянии. Количество матрицы в расчете на одну частицу –  $(1 - \mu_{кр})/N_{кр}$ . Предположим, что и при меньших концентрациях наполнителя на одну частицу приходится столько же пленочного полимера. Тогда параметр  $\gamma$  можно определить как

$$\gamma = \frac{N}{1 - \mu} \cdot \frac{1 - \mu_{кр}}{N_{кр}}. \quad (5)$$

Зависимость количества частиц от объемного содержания наполнителя можно оценить аналитически. Например, для кубической упаковки в объеме содержанием  $N_0$  ячеек находится  $N = 6N_0\mu/\pi$  частиц. С учетом этого, формула (5) будет иметь вид:

$$\gamma = \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \frac{1-\mu_{кр}}{\mu_{кр}}. \quad (6)$$

Интересно, что зависимость (6) не зависит от типа и размерности решетки, так как в выражении количества частиц  $N$  будет изменяться лишь значение постоянного множителя. Таким образом, окончательно

$$\begin{cases} \gamma = \frac{\mu}{\mu_{кр}} \cdot \frac{1-\mu_{кр}}{1-\mu} & \text{при } \mu \leq \mu_{кр}, \\ \gamma = 1 & \text{при } \mu > \mu_{кр}. \end{cases} \quad (7)$$

Свойства переходного слоя всецело зависят от рода наполнителя и подлежат экспериментальному определению. Характерный вид изменения коэффициента потерь от степени наполнения при этом будет выглядеть так:

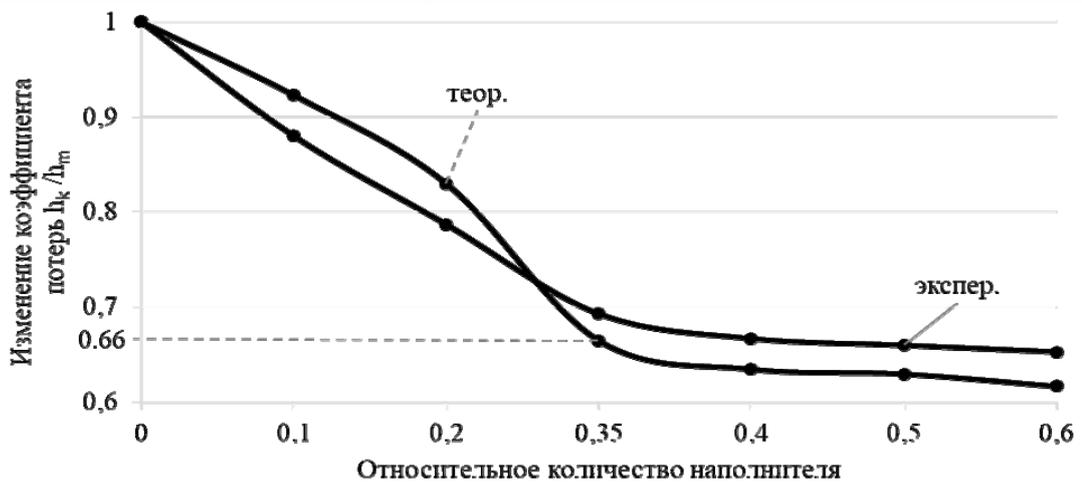


Рис. 3. Влияние наполнителя на коэффициент потерь композита

Исходными данными для рис. 3 являлись:  $E_m = 2500$  МПа,  $\nu_m = 0,45$ ,  $\eta_m = 0,035$ ;  $E_n = 60000$  МПа,  $\nu_n = 0,25$ ,  $\eta_n = 0,002$ ; модуль упругости полимера в пленочном состоянии взят на 30 % выше, а коэффициент потерь на 30 % ниже по сравнению со свободным полимером, т.е.  $E_f = 3250$  МПа,  $\eta_f = 0,024$ .

Как видно из рис. 3, график делится на две части по оси  $\mu_{кр} = 0,35$ . До этого значения происходят увеличение объема доли пленочного полимера и, так как именно полимер отвечает за демпфирующие свойства композита, резкое снижение коэффициента потерь. После значения наполнения  $\mu_{кр} = 0,35$  весь полимер переходит в пленочное состояние, и трехкомпонентная система переходит в двухкомпонентную, описанную ранее [4]. Пунктирной линией на рис. 3 изображен график, показывающий изменение коэффициента потерь композита, если бы с самого начала вся матрица была в пленочном состоянии (коэффициент  $\gamma = 1$ ).

#### Композит с межфазным слоем.

Описанная методика прогнозирования эффективных свойств композита применима и в случае введения на границу раздела между наполнителем и связующим третьей компоненты тонкого межфазного слоя, характеристики которого диктуются свойствами связующего [3]. Композиционный материал в этом случае обычно рассматривается как материал, содержащий слоистый наполнитель, и поэтому модель компо-

зита, показанная на рис. 1, сохраняет свою силу. Единственное отличие будет состоять в том, что вместо граничного слоя матрицы будет фигурировать межфазный слой (МФС), те же замены будут и в формулах:

эффективный модуль композита

$$K_k = \frac{K_m (1 - \mu_{fn})}{(1 + \mu_{fn} \theta_m) - \beta_m \mu_{fn} (1 + \theta_m)}, \quad (8)$$

$$\beta_m = \frac{1 + \theta_m}{(\mu_{fn} + \theta_m) + \frac{K_m}{K_{fn}} (1 - \mu_{fn})};$$

коэффициент потерь композита

$$\eta_k = \eta_m - (\eta_m - \eta_{fn}) \beta_m^2 \mu_{fn} \frac{K_k}{K_{fn}}, \quad (9)$$

где  $\mu_{fn}$  – относительное содержание композитного включения (из межфазного слоя и наполнителя) в матрице с эффективными свойствами  $K_{fn}$  и  $\eta_{fn}$ , определяемыми по формулам

$$K_{fn} = \frac{K_f (1 - \mu_f)}{(1 + \mu_f \theta_f) - \beta_f \mu_f (1 + \theta_f)}, \quad (10)$$

$$\beta_f = \frac{1 + \theta_f}{(\mu_f + \theta_f) + \frac{K_f}{K_n} (1 - \mu_f)}.$$

$$\eta_{fn} = \eta_f - (\eta_f - \eta_n) \beta_f^2 \mu_f \frac{K_{fn}}{K_n}. \quad (11)$$

Здесь индексом  $f$  обозначены свойства межфазного слоя между наполнителем и матрицей.

Анализируя эти формулы, можно заметить, что для получения эффективных вибропоглощающих композитов с межфазным слоем надо в качестве МФС выбирать материал, коэффициент потерь которого больше, чем у матрицы ( $\eta_f > \eta_m$ ), а в качестве наполнителя – материал с модулем упругости, много раз превышающим модуль упругости полимерной основы ( $K_n \gg K_m$ ). Такой наполнитель компенсирует низкую жесткость МФС и, с другой стороны, незначительно снизит его диссипативные свойства (рис. 4). При этом, варьируя толщину МФС, можно добиться, что расчетные значения как упругих, так и демпфирующих свойств составного наполнителя будут выше, чем у матрицы. На рис. 4 заштрихованная часть графика – это область толщин МФС, на которой данное условие выполняется. Нижняя граница области (координата  $a$  на оси содержания наполнителя в МФС) определяется из условия, при котором объемный модуль упругости составного наполнителя  $K_{nf}$  будет равен  $K_m$ . Верхняя граница области (координата  $b$ ) определяется из условия, при котором  $\eta_{nf} = \eta_m$ . Координата  $b$  определяет оптимальную величину толщины МФС на поверхности наполнителя и определяется из равенства

$$\frac{K_{nf}}{K_m} = \frac{\eta_{nf}}{\eta_m}. \quad (12)$$

Для точного определения вышеназванных координат необходимо в их условия подставить выражения формул (10) и (11) и решить полученные уравнения относительно  $\mu_f$ . Решение этих уравнений связано с некоторыми математическими затруднениями, поэтому проще всего определять оптимальную толщину МФС графически (как это показано на рис. 4) или с помощью ЭВМ.

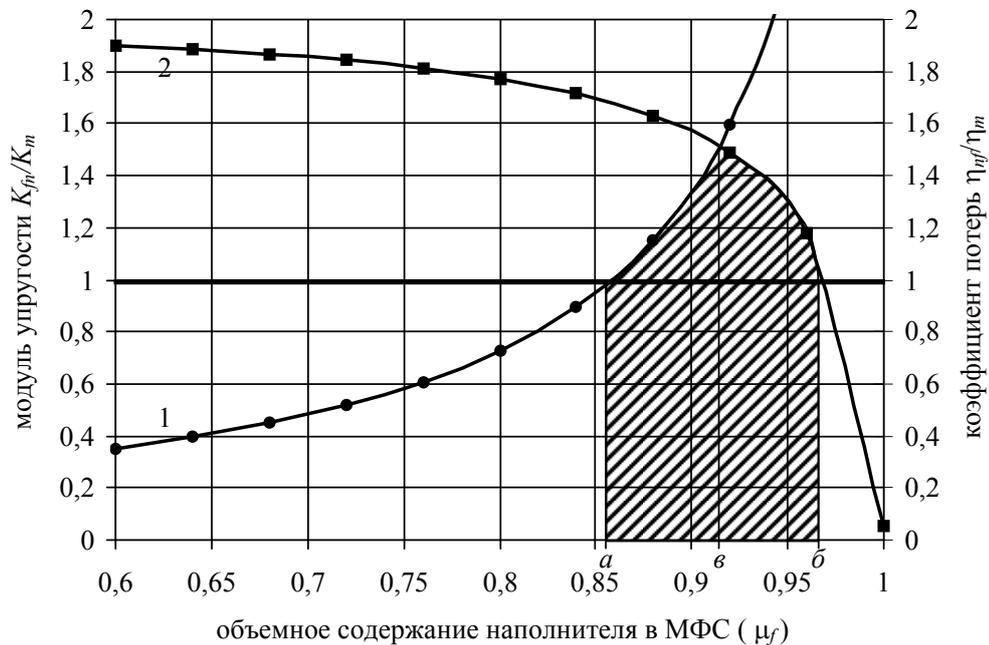


Рис. 4. Зависимость свойств составного наполнителя от толщины оболочки межфазного слоя:  
1 – модуль упругости; 2 – коэффициент потерь

Принимая во внимание, что  $\mu_f$  можно представить в виде отношения

$$\mu_f = \frac{(d_n / 2)^3}{(\delta_f + d_n / 2)^3}, \quad (13)$$

где  $d_n$  – диаметр частиц наполнителя;  $\delta_f$  – толщина пленки межфазного слоя, последнюю по найденному оптимальному  $\mu_f$ , при известном значении  $d_n$ , можно определить по формуле

$$\delta_f = \frac{d_n}{2} \left( \frac{1}{\sqrt[3]{\mu_f}} - 1 \right). \quad (14)$$

Полученные аналитические зависимости позволяют проектировать композиционные материалы с высокими демпфирующими свойствами за счет создания на поверхности наполнителя специального слоя [4].

Адгезионные взаимодействия между наполнителем и связующим могут быть уменьшены введением на границу раздела между ними третьего компонента – ультратонкого межфазного слоя, выполненного из эластомеров и вязких жидкостей, термодинамически несовместимых со связующим [3]. В качестве вязких жидкостей предпочтительнее использовать различные пластификаторы смол, так как они могут ослабить адгезионные взаимодействия между полимерным вяжущим и наполнителем. Нанесение на поверхность последнего тонкой оболочки эластомера или пластификатора увеличивает их эффективный объем [3].

Нами проведены исследования демпфирующих свойств эпоксидных композиционных материалов, у которых наполнитель покрывался тонким слоем каучука СКН-26 и олигоэфиракрилата МГФ-9. Эксперименты показали, что демпфирующие свойства

композиционных материалов с таким наполнителем зависят прежде всего от его количества (рис. 5).

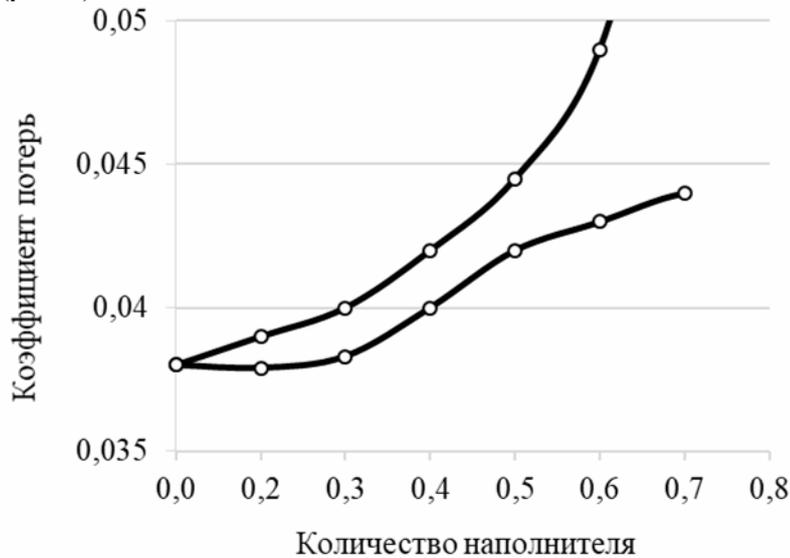


Рис. 5. Влияние наполнителя с тонким межфазным слоем на коэффициент потерь композиционного материала:

1 – межфазный слой из олигоэфиракрилата МГФ-9; 2 – межфазный слой из каучука

В области малого наполнения межфазный слой повышает коэффициент потерь композита до уровня ненаполненной смолы, а в области высокого наполнения он возрастает с увеличением количества наполнителя с межфазным слоем. Высокий коэффициент потерь имеют композиты с межфазным слоем, образованным олигоэфиракрилатом МГФ-9; эластомерный межфазный слой увеличивает его в меньшей степени. Наиболее высокое значение коэффициента потерь у композитов со слоистым наполнителем наблюдается при концентрации последнего, близкой к предельной (см. рис. 5).

На вибропоглощающие свойства композитов с наполнителем, покрытым межфазным слоем, влияет толщина его оболочки. Увеличение ее до определенного уровня практически не изменяет коэффициент потерь, модуль упругости и прочность композиционного материала (рис. 6). Дальнейшее увеличение толщины межфазного слоя приводит к резкому повышению коэффициента потерь и снижению модуля упругости, а также прочности материала. Поэтому ее необходимо назначать с учетом обеспечения высокой эффективности вибропоглощения и достаточной прочности композиционного материала.

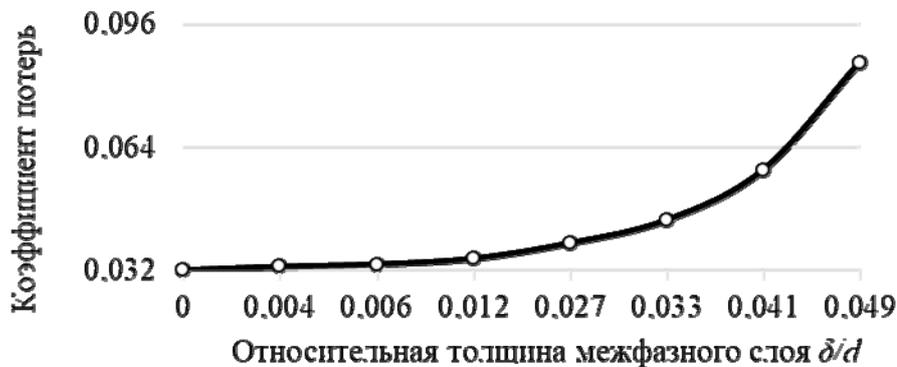


Рис. 6. Влияние толщины оболочки межфазного слоя из каучука на коэффициент потерь композиционного материала

**Заключение**

Разработан метод прогнозирования демпфирующих свойств композита с учетом образования вокруг наполнителя межфазного слоя со свойствами, отличными от свойств матрицы. Полученные аналитические зависимости позволили разработать способ увеличения демпфирующих свойств композита за счет создания на поверхности наполнителя специального слоя.

## Список литературы

1. Липатов, Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров / Ю.С. Липатов. – М.: Химия, 1991. – 260 с.
2. Соломатов, В.И. Полимерные композиционные материалы в строительстве / В.И. Соломатов, А.Н. Бобрышев, К.Г. Химмлер; под ред. В.И. Соломатова. – М.: Стройиздат, 1988. – 308 с.
3. Шаулов, А.Ю. Прочность дисперсно-наполненных полимеров с межфазными слоями / А.Ю. Шаулов, М.А. Ляпунова // Докл. АН СССР. – 1988. – 303, №6. – С. 1424.
4. Соломатов, В.И. Вибропоглощающие композиционные материалы / В.И. Соломатов, В.Д. Черкасов, Н.Е. Фомин. – Саранск: Изд-во Морд. ун-та, 2001. – 94 с.

## References

1. Lipatov, Yu.S. Physical and chemical bases of filling of polymers / Yu. S. Lipatov. – M.: Chemistry, 1991. – 259 p.
2. Solomatov, V.I. Polymeric composite materials in construction / V.I. Solomatov, A.N. Bobryshev, K.G. Himmler; under the editorship of V. I. Solomatov. – M.: Stroyizdat, 1988. – 308 p.
3. Shaulov, A.Yu. Durability of the disperse filled polymers with interphase layers / A.Yu. Shaulov, M.A. Lyapunova // Dokl. Academy of Sciences of the USSR. – 1988. – 303, No. 6. – P. 1424.
4. Solomatov, V.I. Vibration-absorbing composite materials / V.I. Solomatov, V.D. Cherkasov, N.E. Fomin. – Saransk: Publishing house Mordov. University press, 2001. – 96 p.

УДК 691.31

*Белгородский государственный  
технологический университет  
им. В.Г. Шухова*

Россия, 308012, Белгород,  
ул. Костюкова, д. 46

**Фомина Екатерина Викторовна**,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
E-mail: fomina.katerina@mail.ru

**Лесовик Валерий Станиславович**,  
доктор технических наук, профессор  
E-mail: naukavs@mail.ru

**Фомин Александр Евгеньевич**,  
аспирант  
E-mail: fomin.alex@mail.ru

**Абсиметов Максим Владимирович**,  
аспирант  
E-mail: naukavs@mail.ru

**Елистраткин Михаил Юрьевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru

*Belgorod State Technological University.  
named after V.G. Shukhov*

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukov St.

**Fomina Ekaterina Viktorovna**,  
Candidate of Sciences, Senior researcher  
E-mail: fomina.katerina@mail.ru

**Lesovik Valery Stanislavovich**,  
Doctor of Sciences, Professor  
E-mail: naukavs@mail.ru

**Fomin Alexander Evgenyevich**,  
Postgraduate student  
E-mail: fomin.alex@mail.ru

**Absimetov Maxim Vladimirovich**,  
Postgraduate student  
E-mail: naukavs@mail.ru

**Elistratkin Mikhail Yuryevich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОБЕТОНА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ОТХОДОВ УГЛЕДОБЫЧИ

Е.В. Фомина, В.С. Лесовик, А.Е. Фомин, М.В. Абсиметов, М.Ю. Елистраткин

Рассматриваются результаты исследования химических свойств, гранулометрического и минерального состава аргиллита – отхода угледобычи Коркинского угольного месторождения (КУМ). Аргиллит относится к алюмосиликатным породам, в основной своей массе (50,83 %) представлен скрытокристаллическим веществом, состоящим из полиморфных фаз кремнезема (кristобалит и тридимит), а также кварца и глинистых минералов. Порода отличается высокой размолоспособностью с возможностью получения высокодисперсных частиц размером от 0,5 до 42 мкм. Энергоэффективность использования аргиллита взамен кварцевого песка заключается в сокращении времени помола более чем на 60 %. В щелочной среде вяжущего в присутствии аргиллита отмечается интенсификация процессов гидратации при максимальном наборе пластической прочности ячеистых образцов с сокращением времени выдержки в производственном цикле до 1 часа 30 минут. Необходимо учитывать, что генетические особенности аргиллита влияют на повышение водопотребности сырьевой смеси. При частичной замене в смеси вяжущего кварцевого песка на 5–20 % аргиллита наблюдается интенсификация процессов химического взаимодействия компонентов бетона с улучшением физико-механических свойств ячеистого бетона. В частности, при замене в составе 15 % кварцевого песка на аргиллит предел прочности при сжатии автоклавного ячеистого бетона повысился на 22,5 %, при изгибе – на 23 %. Установлено улучшение теплофизических показателей, снижение плотности составило 15 % и теплопроводности – 8 %.

Проведенные исследования направлены на изучение энергетического потенциала сырья, для создания строительных композитов с управляемыми эксплуатационными характеристиками с приоритетной задачей защиты человека от негативного влияния природных и техногенных процессов.

*Ключевые слова: отход углеобогащения, аргиллит, кварцевый песок, вяжущее, гидратация, автоклав, газобетон, фазо- и структурообразование*

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE CONCRETE DUE TO THE USE OF WASTE COAL

E.V. Fomina, V.S. Lesovik, A.E. Fomin, M.V. Absimetov, M.Yu. Elistratkin

The chemical properties, granulometric and mineral composition of argillite – coal mining waste of the Korkinsky coal deposit (KUM) are investigated. Argillite belongs to aluminosilicate rocks, in its main mass (50.83 %) it is represented by a cryptocrystalline substance consisting of polymorphic silica phases (cristabolite and tridymite), as well as quartz and clay minerals. The breed has a high grinding ability with the possibility of obtaining fine particles ranging in size from 0.5 to 42 microns. The energy efficiency of using argillite instead of quartz sand is to reduce the grinding time by more than 60 %. In an alkaline binder environment in the presence of argillite, it is noted by the intensification of hydration processes with the maximum set of plastic strength of cellular samples with a reduction in the exposure time in the production cycle to 1 hour and 30 minutes. It should be borne in mind that the genetic characteristics of argillite affect the increase in water demand of the raw mix. With partial replacement of the binder quartz sand in the mixture by 5–20 % of argillite, intensification of the processes of chemical interaction of the components of concrete with improvement of the physicomechanical properties of cellular concrete is noted. In particular, when replacing 15 % of quartz sand with mudstone, the compressive strength of autoclaved cellular concrete increased by 22.5 %, and when bending by 23 %. The improvement of thermophysical indicators was established, the decrease in density was 15 % and thermal conductivity – 8 %.

The conducted studies are aimed at studying the energy potential of raw materials, to create building composites with controlled performance characteristics with the priority task of protecting people from the negative impact of natural and man-made processes.

*Keywords: coal preparation waste, mudstone, quartz sand, binder, hydration, autoclave, aerated concrete, phase and structure formation*

Важнейшими задачами современности являются создание комфортных условий для существования человека на планете Земля при сохранении природно-ресурсного потенциала, снижение энергоемкости производства композитов, расширение номенклатуры строительных материалов и эффективных технологий их производства с приоритетной задачей защиты человека от воздействия природных и техногенных процессов [1–5]. На сегодняшний день накоплено огромное количество промышленных отходов, объемы которых постоянно возрастают. Нерациональное и некомплексное освоение угольных месторождений вызывает образование многотоннажного техногенного сырья. Это влияет на изменение геоморфологии земной поверхности, нарушение гидрогеологического строения территорий, приводит к загрязнению окружающей среды [6, 7]. На фоне «промышленного загрязнения» территорий наблюдаются повсеместное истощение и нехватка природных сырьевых ресурсов, в частности сырья для строительной индустрии [8, 9]. Инновационные преобразования комплексного использования ресурсов недр предполагают системный трансдисциплинарный подход к исследованию сложных взаимосвязанных проблем освоения и использования многокомпонентного природного, техногенного, нетрадиционного минерального сырья, разнообразных горнопромышленных отходов, всей совокупности природных ресурсов. Современные методы исследований сырья при создании строительных композитов нового поколения базируются на трансдисциплинарных подходах с учетом имеющихся знаний в области материаловедения, геологии, петрологии, кристаллохимии и т.д., что лежит в области развития научного направления – «геоники (геомиметики)» [10].

Отходы добычи и переработки угля широко применяются для получения строительных материалов различного назначения [11, 12]. Наличие в технологии производства строительных материалов автоклавной обработки позволяет активировать широкий спектр не востребованного сырья техногенного и природного генезиса [13–15].

Одним из самых крупных в Европе угледобывающих горно-обогатительных комплексов является Коркинское угольное месторождение (КУМ). Значительную площадь территорий разработки занимают отвалы, что отрицательно влияет на экологию. На сегодняшний день разрабатываются технологии по использованию отходов КУМ в строительном и дорожном комплексе [16, 17]. В связи с полиминеральностью и

генетическими особенностями отходы КУМ характеризуются большим разнообразием в микростроении, типе и характере структурных связей [18]. Проводились исследования по использованию данного типа сырья в материалах автоклавного твердения. В частности, отмечается в 2–3 раза повышение прочности сырца известково-песчаного вяжущего с применением углеотхода в виде опоковидной глины, что позволяет получать эффективные изделия [19]. Полный объем распределения отходов так и не определен, и решение задач его вовлечения в строительную индустрию является актуальным.

Предварительная оценка химического состава производимых отходов по содержанию  $\text{SiO}_2$  позволила выделить кремнеземсодержащую породу – аргиллит. Аргиллит – это вскрышная порода алюмосиликатного состава с примесями угля. В рамках исследования была произведена оценка качества аргиллита с учетом его применения в составе вяжущего для газобетона автоклавного твердения.

При выборе кремнеземистого сырья для производства ячеистых изделий автоклавного твердения необходимо учитывать его генетические особенности. Эти свойства важны при взаимодействии его с известью в вяжущем на начальных этапах твердения в доавтоклавный период и с учетом уменьшения растворимости  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при повышении температуры в условиях автоклавной обработки. При получении газобетона автоклавного твердения на алюмосиликатном сырье следует учитывать, что традиционно применяют кварцевый песок с содержанием не менее 90 %  $\text{SiO}_2$ , илистых и глинистых примесей – не более 3 %, монтмориллонитовых глинистых примесей – не более 1,5 % [20]. Исходя из представленного химического состава, углесодержащая порода содержит 67 %  $\text{SiO}_2$  и 21,55 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Значение ппп составляет 7,65, что свидетельствует о значительном количестве органических примесей и углистых частиц (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Химический состав минералов, масс. %

Минерал	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$	ппп
Аргиллит	67,09	21,55	0,02	0,78	0,28	-	7,65
Кварцевый песок	92,4	2,36	0,77	1,88	0,2	0,05	1,95

Из кристаллических фаз в составе аргиллита преобладает кварц, второстепенными минералами являются гидрослюдистые образования (табл. 2).

Основная масса породы (50,83 %) представлена скрытокристаллическим веществом, а именно полиморфными фазами кремнезема – кристобалитом и тридимитом с наноразмерным уровнем их кристаллизации (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Фазовый состав полиморфов аргиллита\*

Наименование		Содержание, вес. %	Размер кристаллитов, нм
Аргиллит	кристобалит	46	1
	тридимит	20	1,6

\*Результат количественного полнопрофильного РФА в варианте ритвельдовского и Derivative Difference Minimization алгоритма.

Согласно микроструктурному анализу, порода сложена слоистыми алюмосиликатными минералами, представленными пластинками изометрической формы. Исходя из генетических особенностей, структура аргиллита складывалась в результате катагенезиса при уплотнении, дегидратации и цементации глин [21]. Каркас аргиллита формируют зерна кварца, в качестве коагуляционных контактов между зернами кварца выступает сплошная глинистая матрица (рис. 2, б). По результатам петрографического анализа в породе заметны углистые частички в виде черных вкраплений (рис. 2, а).



Рис. 1. Рентгенофазовый и качественный минеральный анализ

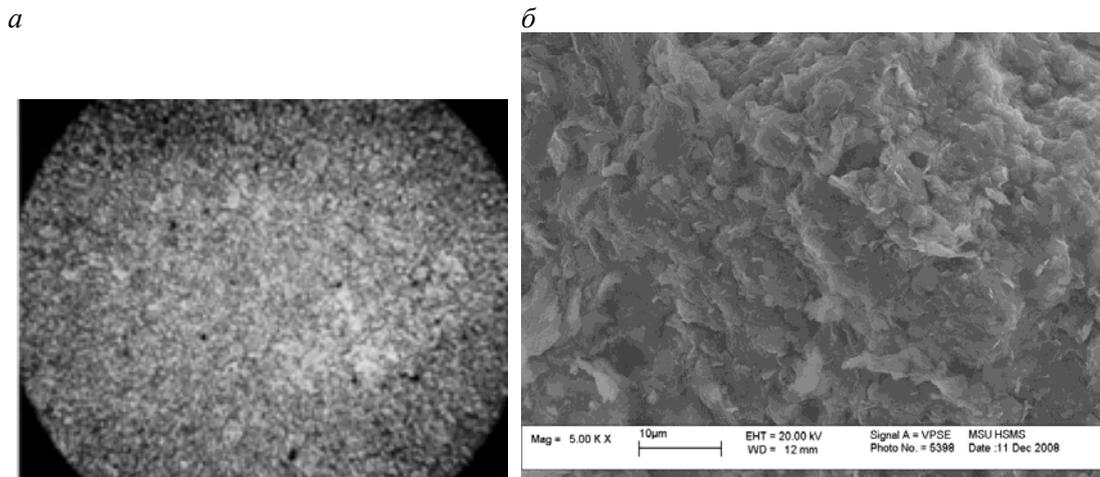


Рис. 2. Петрографический (а) и микроструктурный (б) анализ аргиллита

Значительное количество глинистых составляющих подтверждается результатами ДТА, где потери массы породы в интервале температур 460–550°C соответствуют удалению воды глинистых минералов. Экзотермические эффекты при температурах в диапазоне 870–965°C вызваны выгоранием углерода – коксового остатка топлива (рис. 3).

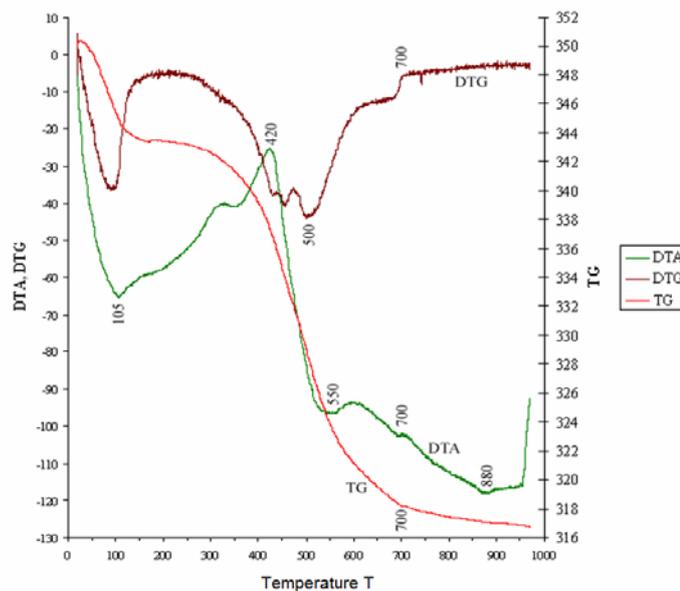


Рис. 3. Дифференциально-термический анализ (ДТА) аргиллита

Основная составляющая силикатных материалов автоклавного твердения – это кварцевый песок, на помол которого затрачиваются значительные энергетические ресурсы. Генетические особенности аргиллита вносят вклад в изменение кинетики помола сырья. В связи с рыхлой микроструктурой аргиллита исследуемое сырье обладает более высокими показателями размолоспособности, при этом время, затрачиваемое на достижение заданной удельной поверхности ( $300 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), сокращается примерно в 3 раза, что в целом сокращает время помола более чем на 60 % (табл. 3). Этот факт позволяет значительно снизить энергозатраты в технологии производства изделий автоклавного твердения с применением аргиллита.

Помол минерального сырья проводили в шаровой мельнице Retsch PM100 размольными телами диаметром 2 см при скорости вращения ротора 420 об/мин. Высокая размолоспособность аргиллита объясняется меньшей твердостью минералов, входящих в его состав, по сравнению с кварцем – основным минералом природного песка. Кроме того, за счет полиминеральности прочность зоны контакта между минералами значительно меньше прочности слагающих породу минералов, что обеспечивает достаточно легкое отделение частиц друг от друга.

Т а б л и ц а 3

Изменение удельной поверхности при помоле минералов

Минерал	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{кг}$ при времени помола, ч							
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	6
Кварцевый песок	190	244	296	354	417	497	520	640
Аргиллит	362	457	573	622	720	880	920	936

Кривые распределения частиц по размерам, которые являются графическим отображением гранулометрического состава, после 2 часов помола смещаются в сторону высокодисперсных частиц размером от 0,5 до 42 мкм (рис. 4, б).

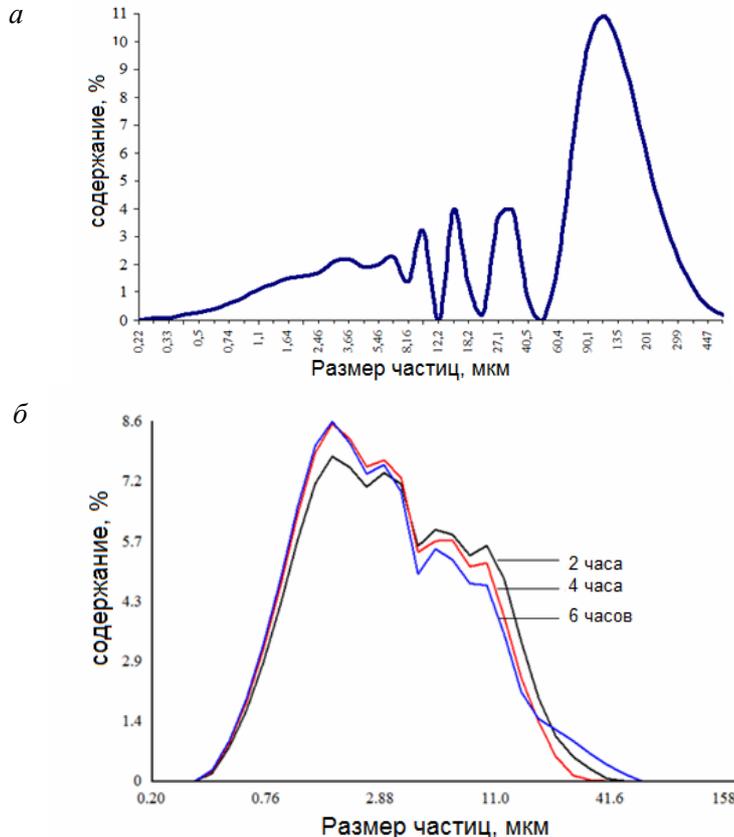


Рис. 4. Гранулометрический анализ аргиллита при механоактивации:  
 а – аргиллит природный; б – аргиллит после механоактивации

Можно предположить, что отмеченный размерный диапазон охватывает как отдельные частицы глинистых минералов, так и их агрегаты, которые, в свою очередь, могут влиять на различия дисперсности без преобладания каких-либо конкретных фракций. Аморфизированная кристобалит-тридимитовая фаза также значительно повышает удельную поверхность в силу развитости своей структуры. Следует отметить, что длительность дальнейшей механоактивации в течение 4–6 часов незначительно отражается на степени дисперсности, лишь небольшое количество частиц размером 5–7 мкм смещается в область показателей 1–2 мкм (рис. 5, б).

Подбор составов газобетона проводили применительно к резательной технологии для изготовления мелких блоков при обеспечении плотности бетона Д500–600, марки по прочности В2,5–3,5 согласно ГОСТ 31359–2007. В работе использовали песок кварцевый Безлюдовского месторождения (г. Белгород, Россия), известь активностью 82 %, портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства ЗАО «Белгородский цемент» (Россия). Газообразователь – алюминиевая паста марки ГПБ-1.

За контрольный принят состав смеси ячеистого бетона при соотношении компонентов, %: известь – 11,6; песок – 68,3; цемент – 20; алюминиевая паста – 0,1; В/Т = 0,5.

В технологии производства ячеистого бетона важным показателем является обеспечение пластической прочности перед резкой массива. В производственных условиях достигают показателя пластической прочности 0,03–0,08 МПа через 3 часа выдержки изделий.

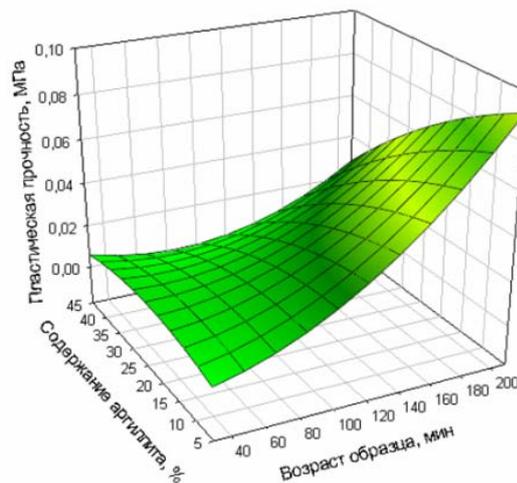


Рис. 5. Изменение пластической прочности образцов газобетона при введении добавки аргиллита

При подборе оптимального состава часть кварцевого песка заменяли аргиллитом. Кинетику набора пластической прочности ячеистобетонных образцов оценивали с помощью метода математического планирования эксперимента. Были выведены уравнения регрессии и построены поверхности отклика (рис. 5), характеризующие поведение системы при различных выходных параметрах. Проведенный анализ показал, что наиболее эффективным следует считать замену кварцевого песка до 15 % аргиллитом, при этом время набора необходимой прочности в массиве сокращается до 1 часа 30 минут. С увеличением количества аргиллита до 35 % образцы набирают пластическую прочность в пределах допустимой продолжительности (3 часа). Дальнейшее увеличение количества аргиллита является нежелательным и приводит к замедлению сроков набора сырьевой прочности.

Интенсификация процессов гидратации вяжущего в присутствии аргиллита обусловлено повышением активности связывания гидроксида кальция в гидратные новообразования уже на начальных этапах твердения вяжущего в период до автоклавной обработки. Для определения свободного оксида кальция использовался этилово-

глицератный метод. Согласно проведенным исследованиям, аргиллит активно вступает в химические реакции с максимальной степенью участия СаО при гидратации вяжущего при замене 15 % кварцевого компонента техногенным сырьем (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Количество несвязанного СаО в образцах вяжущего\*

№ п/п	Содержание аргиллита при замене кварцевого компонента, %	Содержание свободных оксидов в вяжущем, мас. %
1	0	27,83
2	5	24,78
3	10	21,58
4	15	20,37
5	20	21,56
6	25	22,13
7	30	22,79

\* Время набора пластической прочности образцов 3 часа.

Введение аргиллита вносит изменения в физико-механические свойства сырьевой смеси. При замене 5–25 % кварцевого песка увеличивается растекаемость сырьевой смеси, что является необходимым при газообразовании ячеистого бетона, однако это сопровождается некоторым увеличением водопотребности (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Свойства ячеистого бетона автоклавного твердения

№ состава	Массовая доля аргиллита при замене кварцевой составляющей, %	В/Т	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Теплопроводность, Вт/(м·С°)	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	Растекаемость по Суттарду, см	Пористость, %
1	0	0,50	562	4,23	1,05	0,121	0,210	28	70
2	5	0,50	483	4,86	1,25	0,115	0,211	35	75
3	10	0,55	473	4,97	1,24	0,107	0,212	37	80
4	15	0,60	479	5,18	1,29	0,111	0,211	40	75
5	20	0,65	526	4,84	1,21	0,117	0,211	44	73
6	25	0,70	565	4,35	1,03	0,119	0,210	48	73
7	30	0,75	579	4,14	1,09	0,128	0,209	50	69

Автоклавную обработку ячеистых образцов проводили при температуре 183°C по режиму: продувка автоклава – 40 мин, подъем давления пара до 10 атм – 1 час, выдержка при рабочем давлении – 5 часов, снижение давления пара – 2 часа.

При замене в смеси вяжущего кварцевого песка на 5–20 % аргиллита наблюдается оптимальное сочетание свойств газобетона, повышение прочности при максимальном снижении плотности. С увеличением количества аргиллита выше 20 % повышается водопотребность сырьевой смеси, понижается ее устойчивость, что приводит к усадке массива и снижению прочности ячеистого бетона (см. табл. 5, состав 7). Исследование физико-механических свойств ячеистых образцов показало, что при замене 15 % кварцевого песка аргиллитом наблюдается повышение предела прочности при сжатии бетона на 22,5 % и прочности на растяжение при изгибе на 23 %, при этом происходит снижение плотности на 15 % и теплопроводности на 8 %, с небольшим увеличением паропроницаемости от 0,210 до 0,211 мг/(м·ч·Па).

Таким образом, доказана возможность повышения эффективности газобетона автоклавного твердения за счет использования отхода угледобычи – аргиллита. Специфика генезиса и минерального состава аргиллита позволяет управлять процессами структурообразования на всех стадиях получения композита, способствует оптимизации системы порообразования, сокращению энергорасходов на дезинтеграцию сырья и времени выдержки изделия в производственном цикле, а также улучшению физико-механических свойств газобетона.

*Исследование выполнено за счет средств Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий на 2013–2020 годы», Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, в рамках Плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН, тема 7.5.1.*

#### Список литературы

1. Лесовик, В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении: монография / В.С. Лесовик. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. – 287 с.
2. Фомина, Е.В. К вопросу реализации интеллектуальных строительных композитов / Е.В. Фомина, В.С. Лесовик, Е.С. Глаголев, А.А. Митрохин // Инновационные материалы и технологии в дизайне: сб. докл. III Всерос. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 23-24 марта 2017 г.). – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, 2017. – С. 102–103.
3. Фомина, Е.В. Способы защиты окружающей среды от минеральных отходов промышленности / Е.В. Фомина // Инновационные материалы и технологии в дизайне: сб. докл. II Всерос. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 24-25 марта 2016 г.). – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, 2016. – С. 79.
4. Fediuk, R.S. Use of geonics scientific positions for designing of building composites for protective (fortification) structures / R.S. Fediuk, Y.G. Yevdokimova, A.K. Smoliakov, N.Y. Stoyushko, V.S. Lesovik // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 221, Issue 1. 012011. – DOI: 10.1088/1755-1315/221/1/012011.
5. Свергузова, С.В. Повышение уровня экологического благополучия населения как одна из задач управления городом / С.В. Свергузова, Е.А. Беловодский // Управление городом: теория и практика. – 2017. – № 3 (26). – С. 33–39.
6. Hao Bing-Yuan Mine Land Reclamation and Eco-Reconstruction in Shanxi Province I: Mine Land Reclamation Model / Hao Bing-Yuan, Kang Li-Xun // The Scientific World Journal. – 2014. – ID 483862. – 9 p. – DOI: 10.1155/2014/483862
7. Miroljub Grozdanović Impact assessment of risk parameters of underground coal mining on the environment / Miroljub Grozdanović, Bojan Bijelić, Dobrivoje Marjanovic // Human and Ecological Risk Assessment. – 2017. – 24(30). – P. 1–13. – DOI:10.1080/10807039.2017.1405339
8. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 528 с.
9. Агеева, М.С. К вопросу использования промышленных отходов в производстве вяжущих веществ / М.С. Агеева, С.М. Шаповалов, А.Н. Боцман, А.В. Ищенко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 9. – С. 58–62.
10. Лесовик, В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее / В.С. Лесовик // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12, № 1 (100). – С. 9–16.
11. Lesovik, R.V. Assessment of the suitability of the opal-cristoballite rocks of Korkinsk deposit in the construction industry / R.V. Lesovik, A.N. Nosova, A.V. Savin, E.V. Fomina // World Applied Sciences Journal. – 2014. – Vol. 29, Issue 12. – P. 1600–1604.

12. Кожухова, Н.И. Экологический аспект утилизации минеральных отходов промышленности в строительной отрасли / Н.И. Кожухова, В.А. Калашникова // Экология и рациональное природопользование агропромышленных регионов: сб. докл. III Международной молодежной научной конференции / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород., 2015. – С. 215–219.
13. Alfimova, N.I. Optimization of receptural-technological parameters of manufacture of cellular concrete mixture / N.I. Alfimova, S.Yu. Pirieva, D.V. Gudov, I.M. Shurakov, E.E. Korbut // Construction Materials and Products. – 2018. – Vol. 1, Issue 2. – P. 30–36.
14. Кудеярова, Н.П. Активность белитовых фаз сталеплавильных шлаков в автоклавных условиях / Н.П. Кудеярова, Н.П. Бушуева, Е.Д. Старичкова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 9. – С. 106–112.
15. Старостина, Ю.Л. Глиношлаковые материалы автоклавного твердения на основе саморассыпающихся сталеплавильных шлаков / Ю.Л. Старостина, Н.С. Лупандина, Ю.С. Воронина, И.В. Старостина // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 3. – С. 170–174.
16. Lebedev, M.S. Effect of phase and size characteristics of fly ash from power station on properties of bitumen composites / M.S. Lebedev, N.I. Kozhukhova, I.L. Chulkova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 222. 012005. – DOI: 10.1088/1757-899X/222/1/012005
17. Lebedev, M.S. Rheological characteristics of bitumen mastic depending on composition and filler dispersity / M.S. Lebedev, N.I. Kozhukhova // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – 1045(1). 012026. – DOI: 10.1088/1742-6596/1045/1/012026
18. Lebedev, M.S. Application of IR-spectroscopy for study of aluminosilicate raw materials / M.S. Lebedev, I.V. Zhernovsky, V.V. Strokova, E.V. Fomina, I.N. Kozhukhova // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 496–500. – P. 96–101. – DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.496-500.96
19. Володченко, А.Н. Алюмосиликатное сырье для получения автоклавных отделочных материалов / А.Н. Володченко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 2. – С. 172–177.
20. Бушуева, Н.П. Синтез белитового вяжущего на основе слоистых алюмосиликатов / Н.П. Бушуева, Н.П. Кудеярова, О.А. Панова // Техника и технология силикатов. – 2017. – Т. 24. – № 2. – С. 2–6.
21. Рогозина, Е.А. Изменение пористости аргиллитов в зоне катагенеза / Е.А. Рогозина // Геология нефти и газа. – 1968. – № 11. – С. 33–35.

## References

1. Lesovik, V.S. Geonika (geodaetica). Examples of implementation in building materials science: monograph / V.S. Lesovik. – Belgorod: Publishing house BGTU, 2016. – 287 p.
2. Fomina, E.V. On the issue of implementation of intelligent building composites / E.V. Fomina, V.S. Lesovik, E.S. Glagolev, A.A. Mitrokhin // Innovative materials and technologies in design: sat. At the III all-Russia. scientific and technical. Conf. (St. Petersburg, 23-24 March 2017). – St. Petersburg: Publishing House St. Petersburg state Institute of film and television, 2017. – P. 102–103.
3. Fomina, E.V. Ways to protect the environment from mineral industry waste // Innovative materials and technologies in design]. The second vseros. scientific and technical. Conf. (St. Petersburg, 24-25 March 2016) / E.V. Fomina. – St. Petersburg: Publishing house St. Petersburg state Institute of film and television, 2016. P. 79.
4. Fediuk, R.S. Use of geonics scientific positions for designing of building composites for protective (fortification) structures / R.S. Fediuk, Y.G. Yevdokimova, A.K. Smoliakov, N.Y. Stoyushko, V.S. Lesovik // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 221, Issue 1. 012011. – DOI: 10.1088/1755-1315/221/1/012011.

5. Sverguzova, S.V. Improve the environmental wellbeing of the population as one of the management tasks / S.V. Sverguzova, E.A. Belovodski // *Management of the city: theory and practice*. – 2017. – № 3 (26). – P. 33–39.
6. Hao Bing-Yuan Mine Land Reclamation and Eco-Reconstruction in Shanxi Province I: Mine Land Reclamation Model / Hao Bing-Yuan, Kang Li-Xun// *The Scientific World Journal*. – 2014. – ID 483862. – 9 p. – DOI: 10.1155/2014/483862
7. Miroljub Grozdanović Impact assessment of risk parameters of underground coal mining on the environment / Miroljub Grozdanović, Bojan Bijelić, Dobrivoje Marjanovic // *Human and Ecological Risk Assessment*. – 2017. – 24(30). – P. 1–13. – DOI:10.1080/10807039.2017.1405339
8. Bazhenov, Y.M. *Technology of concrete* / Y.M. Bazhenov. – M.: Publishing house DIA, 2011. – 528 p.
9. Ageeva, M.S. On the use of industrial waste in the production of binders / M.S. Ageeva, S.M. Shapovalov, A.N. Boatswain, V.V. Ishchenko // *Vestnik Belgorod state technological University*. V. G. Shukhov. – 2016. – No. 9. – P. 58–62.
10. Lesovik, V.S. Building materials. Present and future / V.S. Lesovik // *Bulletin of Moscow state University*. – 2017. – Vol. 12, № 1 (100). – P. 9–16.
11. Lesovik, R.V. Assessment of the suitability of the opal-cristobalite rocks of Korkinsk deposit in the construction industry / R.V. Lesovik, A.N. Nosova, A.V. Savin, E.V. Fomina // *World Applied Sciences Journal*. – 2014. – Vol. 29, Issue 12. – P. 1600–1604.
12. Kozhuhova N.I.Environmental aspect of recycling mineral industry waste in construction industry / N.I. Kozhuhova, V.A. Kalashnikov // *Ecology and environmental management agricultural regions. Collection of reports of the III international youth scientific conference* / Belgorod state technological University. V. G. Shukhov. – Belgorod, 2015. – P. 215–219.
13. Alfimova, N.I. Optimization of receptural-technological parameters of manufacture of cellular concrete mixture / N.I. Alfimova, S.Yu. Pirieva, D.V. Gudov, I.M. Shurakov, E.E. Korbut // *Construction Materials and Products*. – 2018. – Vol. 1, Issue 2. – P. 30–36.
14. Kudayarova, N.P. Activity Bulatovich phases of steelmaking slag in autoclave conditions / N.P. Kudayarova, N.P. Bushueva, E.D. Starikov // *Vestnik of Belgorod state technological University n.a. V. G. Shukhov*. – 2017. – No. 9. – P. 106–112.
15. Starostina, Y.L. Glenallachie materials are autoclaved on the basis of self-flaking steel slags / Y.L. Starostina, N.S. Lupandina, Y.S. Voronin, I.V. Starostina // *Bulletin of Belgorod state technological University*. V. G. Shukhov. – 2012. – No. 3. – P. 170–174.
16. Lebedev, M.S. Effect of phase and size characteristics of fly ash from power station on properties of bitumen composites / M.S. Lebedev, N.I. Kozhukhova, I.L. Chulkova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 222. 012005. – DOI: 10.1088/1757-899X/222/1/012005
17. Lebedev, M.S. Rheological characteristics of bitumen mastic depending on composition and filler dispersity / M.S. Lebedev, N.I. Kozhukhova // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – 1045(1). 012026. – DOI: 10.1088/1742-6596/1045/1/012026
18. Lebedev, M.S. Application of IR-spectroscopy for study of aluminosilicate raw materials / M.S. Lebedev, I.V. Zhernovsky, V.V. Strokova, E.V. Fomina, I.N. Kozhukhova // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 496–500. – P. 96–101. – DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.496-500.96
19. Volodchenko, N. Aluminosilicate raw materials for autoclave finishing materials / N. Volodchenko // *Bulletin of the Belgorod state technological University*. V. G. Shukhov. – 2017. – No. 2. – P. 172–177.
20. Bushueva, N.P. Synthesis of Belite binder on the basis of layered aluminosilicates / N.P. Bushueva, N.P. Kudayarova, O.A. Panova // *Technique and technology of silicates*. – 2017. – Vol. 24. No. 2. – P. 2–6.
21. Rogozin, E.A. Change of porosity of mudstone in catagenesis zone / E.A. Rogozin // *Geology of oil and gas*. – 1968. – No. 11. – P. 33–35.

УДК 691:519.7

*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**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*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**Королев Евгений Валерьевич,**  
доктор технических наук, проректор  
E-mail: KorolevEV@mgsu.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*National Research Moskovsky State University  
of Civil Engineering*Russia, 129337, Moscow,  
26, Yaroslavskoe shosse,  
tel.: +7 (495) 781-80-07;  
fax: +7 (499) 183-44-38**Korolev Evgeny Valer'evich,**  
Doctor of Sciences, Vice-rector  
E-mail: KorolevEV@mgsu.ru

## КРАТКИЙ ОБЗОР АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев

Дается обзор аналитических методов синтеза композиционных материалов как сложных систем. Приводятся методологические принципы математического моделирования сложных многокритериальных систем с позиций системного анализа. Даются примеры их эффективной реализации при разработке композиционных материалов с заданными структурой и свойствами. Обобщенная модель системы рассматривается как совокупность частных моделей, разработанных для описания каждого из свойств (определяются как интегральные характеристики многофазного материала). Предполагается, управление качеством материала производится изменением рецептурно-технологических факторов, выбор которых зависит от знаний о материале в рамках принятой парадигмы и технологии, фактических возможностей управления производством. Указывается роль экспериментально-статистических моделей при разработке когнитивной карты и ранжировке частных критериев для многокритериальной оптимизации характеристик материала.

*Ключевые слова: сложные системы, композиционные материалы, оценка, свойства как частные критерии качества, моделирование, управление свойствами*

## OVERVIEW OF ANALYTICAL METHODS FOR THE SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev

A review of the analytical methods for the synthesis of composite materials as complex systems is given. Methodological principles of mathematical modeling of multicriterial complex systems from

the standpoint of system analysis are given. Examples of their effective implementation in the development of composite materials with a given structure and properties are given. The generalized model of the system is considered as a set of particular models developed to describe each of the properties (defined as the integral characteristics of a multi-phase material). It is assumed that the quality of the material is controlled by changing the recipe-technological factors, the choice of which depends on the knowledge of the material in the framework of the adopted paradigm and technology, the actual possibilities of production management. The role of experimental statistical models in the development of a cognitive map and the ranking of partial criteria for the multi-criteria optimization of material characteristics is indicated.

*Keywords: complex systems, composite materials, assessment, properties as partial quality criteria, modeling, control of properties*

Практическая реализация аналитических методов при математическом моделировании сложных систем сопряжена с большими трудностями, что приводит к необходимости использования численных методов и компьютерного моделирования. С методологической точки зрения моделирование есть метод научного познания. При замене реального объекта или процесса его формальным описанием исследователем отбрасываются несущественные для изучения объекта характеристики. Выбор характеристик объекта-оригинала, которые при этом сохраняются и войдут в модель, определяется целями моделирования. Основное требование, предъявляемое к моделям, состоит в их адекватном описании реальных процессов или объектов. В математической модели существенные черты объекта или процесса определяются на языке уравнений или других математических средств. Компьютерное моделирование состоит из серии вычислительных экспериментов для анализа, интерпретации и сопоставления результатов моделирования с реальным поведением изучаемого объекта, а при необходимости и для последующего уточнения модели. При этом не всегда требуется компьютерная поддержка и всегда отдается предпочтение аналитическим методам. Аналитические методы и компьютерное моделирование не противостоят друг другу: их взаимное проникновение способствует лучшему пониманию исследуемых процессов в динамике. Все это и определяет компьютерное моделирование как один из основных методов познания в научных и практических исследованиях.

Рассмотрим некоторые приложения указанных методов к разработке композиционных материалов специального назначения с заранее заданными свойствами. Экспериментальное определение их свойств требует проведения большого объема дорогостоящих исследований; налицо необходимость построения теоретических моделей для определения усредненных значений параметров материалов и описания процессов формирования их физико-механических характеристик.

Известны [1...6] немногочисленные попытки получения аналитических зависимостей для определения свойств компонентов композиционных материалов и их концентрации в смеси со свойствами готового композита. Такие зависимости принципиально позволяют определить и концентрацию, и гранулометрические характеристики ингредиентов материала в зависимости от предъявляемых к нему требований; известна и методика определения критической концентрации (зависимость критической объёмной концентрации от среднего значения гранулометрического состава заполнителя). Существует и программа, позволяющая определить концентрацию, гранулометрический состав заполнителя и желаемую прочность материала, исходя из прочности чистого вяжущего, диапазона разброса гранулометрического состава заполнителя и значения желаемой прочности композита. Перспективность компьютерного материаловедения для создания композитных материалов с требуемыми свойствами, долговечностью и надёжностью стала очевидной. Это относится и к изучению процессов формирования структуры композитных материалов, влияния характера распределения заполнителя на свойства материалов (теплопроводности, электропроводности и диэлектрических свойств). Известны и работы по изучению процесса возникновения дефектов в композитных материалах (трещины, поры, раковины и т.п.) и оптимизации составов композитов (исходя из минимума трещинообразования, заданной пористости и др.). При синтезе композиционных материалов используется

некий симбиоз аналитических методов и компьютерного моделирования. С учетом опыта (собственного и других авторов) для синтеза композитов рекомендуется приводимая ниже *методика*, включающая следующие этапы:

- моделирование отдельных свойств материала;
- определение параметров моделей;
- установление связей параметров моделей от рецептурно-технологических характеристик;
- определение зависимостей свойств от метапараметров (функции от рецептурно-технологических параметров модели);
- ранжирование свойств материалов;
- определение множества частных критериев;
- минимизацию размерности пространства критериев;
- многокритериальную оптимизацию качества материала с определением оптимальных рецептурно-технологических параметров.

Свойства определяются как интегральные характеристики многофазного материала (состоит из двух и более компонент; между компонентами существуют границы раздела; один из компонентов – матрица (связующее) – связным образом заполняет пространство; другие компоненты (включения) занимают изолированные области) в зависимости от параметров матрицы (связующего), размеров включений и расстояний между ними. Обычно размеры включений и расстояния между ними по сравнению с молекулярными считаются достаточно большими, но по сравнению с характерными размерами материала – малыми (однородность композита в макроскопическом масштабе и неоднородность в микроскопическом); дисперсный (гранулированный) композит состоит из включений (зерен) со всеми одинаковыми размерами). Разработанная методика определения свойств композитов через параметры кинетических процессов формирования эксплуатационных характеристик приводится в [7]. Несмотря на определенные трудности в интерпретации многофакторных экспериментально-статистических моделей свойств материалов, нельзя недооценивать их роль при составлении когнитивной карты, ранжировке частных критериев и оптимизации (в том числе векторной) характеристик материала. Ценность разработанной модели определяется тем, насколько правильно она описывает процессы и зависимости в композите *как в сложной системе*; пределы применимости модели определяются гипотезами, лежащими в ее основе. Перспективным является построение таких теоретических моделей композиционных материалов, которые позволят определять их *осредненные характеристики с описанием локальных особенностей*.

Свойства должны исследоваться с использованием одной или нескольких *узко ориентированных моделей*; наращивание множества упрощенных моделей производится по мере необходимости. В частности, при синтезе серных композиционных материалов частные критерии выбирались исходя из технического задания. *Основными моделями были аналитические зависимости, определенные на основе экспериментальных данных и использовавшиеся для описания отдельных свойств*. Так, модель для подвижности смеси [8...10] использовалась для описания структурных преобразований в композите:

$$\frac{e_i^V}{E} = \frac{1}{v_f \left[ 1 + \left( \frac{a'}{a} e^{b'v_f} \right)^{-\frac{1}{b}} \right]^3}.$$

Что касается зависимости *прочности композиционных материалов от степени наполнения*, то чем больше дисперсность наполнителя (не зависит от химической активности), тем при меньшей степени наполнения достигается максимальная прочность материала. Если в композите отсутствуют структурные преобразования, то влияние границы раздела фаз «дисперсная фаза – вяжущее вещество» минимально. Зависимость свойств композита от содержания дисперсной фазы подчиняется правилу

смесей (закон аддитивности). Вовлекаемый воздух является дополнительной дисперсной фазой. В ряде случаев прочность увеличивается при значениях, не превосходящих  $v_{f,opt}$ , или происходят качественные структурные преобразования: образование разветвлённого граничного слоя вяжущего, имеющего повышенные показатели свойств. Прочность зависит от структуры и фазового состава (наполнитель (дисперсная фаза твёрдых частиц), вяжущее (матрица), воздушные поры (дисперсная фаза воздушных включений)):

$$R_{cm} = R_{cm}^f + R_{cm}^m + R_{cm}^n; \quad R_{cm}^f = \sigma'_f v_f, \quad R_{cm}^m + R_{cm}^n = \sigma'_m v_m = \sigma_p v_p + \sigma_t v_t.$$

В общем случае восходящая ветвь зависимости  $R = R(v_f)$  от характеристик и содержания наполнителя имеет вид

$$R_{cm} = \sigma_p (1 - v_n) - \sigma_p v_f (1 - \rho_f S_{yd} h_0 (k_m - 1)) + \sigma'_f v_f = K_{cm} v_f + B_{cm};$$

$$K_{cm} = \sigma'_f - \sigma_p \left( 1 - \frac{h_0}{d_f} (k_m - 1) \right); \quad B_{cm} = \sigma_p (1 - v_n).$$

При степенях наполнения, превосходящих  $v_{f,opt}$ , наблюдается постепенное уменьшение прочности композита. Прочность на *нисходящей* ветви определяется в виде

$$R_{cm} = \sigma_p \left[ 1 - v_n - v'_f \left\langle \left( 1 - \frac{1 - v_{f,opt}}{v_{f,opt}} (k_m - 1) \right) \right\rangle \right] + \sigma'_f v'_f,$$

$$v'_f = 2v_{f,opt} - v_f.$$

В серных материалах пористость  $\Pi_{cm}$  определяется уменьшением объёма (на 14,1 %) серы при переходе из жидкого состояния в твёрдое. В процессе изготовления композитов сера частично взаимодействует с наполнителем с образованием сульфидов и газообразного диоксида серы, что также способствует возникновению пор. Для пористости на границе раздела фаз справедливо

$$\Pi_{\phi-x} = \frac{0,141 \cdot \left[ \frac{m_s}{\rho_s} - m_f h_x S_{yd} \rho_f \rho_s^{-1} \frac{b \cdot M(S)}{a \cdot M(MeO)} \right]}{\frac{m_s}{\rho_s} + \frac{m_f}{\rho_f} - m_f h_x S_{yd} \rho_f \left[ \frac{b \cdot M(S)}{a \cdot M(MeO)} \rho_s^{-1} + \rho_f^{-1} - \frac{c \cdot M(MeS)}{a \cdot M(MeO)} \rho_{MeS}^{-1} \right]}$$

с введением наполнителя уменьшается.

При  $v_f > v_{f,opt}$  пористость серного материала возрастает (дефицит вяжущего приводит к образованию в серном материале агрегатов из несмоченных частиц наполнителя), а именно

$$\Pi_{cm} = \Pi_{\phi-x} + 0,351 \cdot (v_f - v_{f,opt}).$$

Для радиационно-защитных композитов важно получение модели *радиационного разогрева* при ионизирующем излучении. Достаточно подробно этот вопрос рассматривается в [8...10]. В частности, модель имеет вид

$$T(x) = T_c + \frac{A_0 e_0}{4\pi R^2 \alpha} (1 - e^{-\mu x}) \left( 1 - e^{-\frac{\alpha}{c_m x p} t} \right); \quad T(h) = T_{max},$$

если температурное поле – равномерное; толщина  $h$  конструкции – постоянна (стационарный режим – при  $t \rightarrow \infty$ ).

При моделировании относительно простых систем приемлемые результаты дает использование *детерминистических подходов*, основанных на определении с удовлетворительной достоверностью *причинно-следственных связей*. Однако при исследовании сложных систем они являются малоэффективными. Здесь возникает необходимость в разработке иных алгоритмов оптимизации параметров исследуемой системы, позволяющих учитывать специфические требования к системам на основе использования *принципа деления сложной проблемы на более мелкие* (каждая подпроблема разносторонне, по различным критериям надежно количественно оценивается экспертами).

При *системном подходе* можно уменьшить или исключить неопределенность, свойственную решаемой проблеме, и реконструировать ее в моделях, отвечающих целям исследования; выявлять объекты, свойства и связи исследуемой системы с учетом взаимного влияния внешней среды, *свести многомерную задачу к определению количественных мер значимости отдельных частных критериев* (система целей и значимостей может меняться с развитием науки, техники и воздействием внешних обстоятельств и нуждается в постоянном пересмотре). Эффективным является *многоуровневое представление структур*. Переход с одного уровня представления на другой осуществляется *путем выделения определенных подструктур*, которые, в свою очередь, рассматриваются в качестве макроскопических элементов, связанных между собой. *Низшим уровнем представления системы является описание ее в терминах классов* (со своими атрибутами и операциями) и соответствующих им объектов, выступающих в качестве микроскопических элементов, и отношений между ними, играющих роль связей. Примером макроскопического элемента следующего уровня является системная архитектура, представляющая собой базовую подструктуру рассматриваемой системы. *Самым высоким уровнем является интеграция отдельных систем, которые рассматриваются в качестве макроскопических элементов*.

Новые композиционные материалы обычно создаются, если способы модификации традиционных материалов уже исчерпаны. Конечно, это целесообразно и при изменении интенсивности эксплуатации и расширении области применения материала. Качеством материала управляют *рецептурно-технологические факторы*, выбор которых зависит от знаний о материале [11] и технологии, фактических возможностей управления производством (уровня техники). Такой подход пригоден для решения многих практических инженерных задач и установления основных свойств новых композиционных материалов на различных этапах развития технологии. При этом представление композиционных материалов *полиструктурными* позволяет оптимизировать их структуру и свойства поэтапно, что значительно расширяет возможности исследователя. Как уже отмечалось, каждый структурный уровень может рассматриваться как новый материал с заданными показателями качества, получение которого является самостоятельной задачей по выбору рецептурно-технологических параметров. Последовательное совмещение уровней (от микро- до макроструктуры) требует установления показателей качества и выделения критериев (свойств) для оптимизации рецептуры каждого уровня. Так реализуется *принцип совмещения структур*, в соответствии с которым оптимальный по выбранному показателю качества материал (или структурный уровень) получается из предыдущих структурных уровней (не обязательно являющихся оптимальными). Отметим, формализованная оптимизационная задача выбора рецептурно-технологических параметров математически является задачей нелинейного программирования.

Практическая реализация некоторых из приведенных выше подходов к многокритериальной оптимизации сложных систем подробно освещается в [11...19].

## Список литературы

1. Кондращенко, В.И. Применение методов компьютерного материаловедения в биотехнологических исследованиях / В.И. Кондращенко // *Строительные материалы*. – 2006. – № 3. – С. 76–80.
2. Баженов, Ю.М. Основные подходы к компьютерному материаловедению строительных композитных материалов / Ю.М. Баженов, В.А. Воробьев, А.В. Илюхин. // *Строительные материалы*. – № 3. – 2006. – С. 2–4.
3. Chernyshov, E.M. Clinkerless composites with a port-landite matrix / E.M. Chernyshov, N.D. Potamoshneva, M.P. Stepanova, R.V. Lesovik // *Research Journal of Applied Sciences*. – 2014. – №9. – P. 1109–1113.
4. Korolev, E.V. Using Particle Systems / E.V. Korolev, V.A. Smirnov // *Advanced Materials Research*. – 2013. – №746. – P.277–280.
5. Kiselev, D.G. Structure Formation of Sulfur-Based Composite: Model / D.G. Kiselev, E.V. Korolev, V.A. Smirnov // *Advanced Materials Research*. – 2014. – №1040. – P. 592–595.
6. Королев, Е.В. Техничко-экономическая эффективность новых технологических решений. Анализ и совершенствование / Е.В. Королев // *Строительные материалы*. – 2017. – №3. – С.85–89.
7. Garkina, I.A. Modeling of kinetic processes in composite materials / I.A. Garkina // *Contemporary Engineering Sciences*. – 2015. – №8. – P.421–425.
8. Альбакасов, А.И. Оптимизация систем со сложной иерархией / А.И. Альбакасов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // *Вестник гражданских инженеров*. – 2012. – № 2. – С. 324–327.
9. Альбакасов, А.И. Управление структурой и свойствами наномодифицированных строительных материалов / А.И. Альбакасов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // *Региональная архитектура и строительство*. – 2011. – № 2. – С. 9–17.
10. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: МГСУ: Библиотека научных исследований и проектов, 2012. – 432 с.
11. 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.
12. Гарькина, И.А. Опыт разработки композиционных материалов: некоторые аспекты математического моделирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // *Известия ВУЗов. Строительство*. – 2013. – №8(656). – С.28–53.
13. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A.Garkina, A.M. Danilov // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – V.191. – P.012006 (doi: 10.1088 / 1757-899X / 191/1/012006).
14. 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.
15. 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.
16. Garkina, I.A. Approximation of Comparative Materials / I.A.Garkina, A.M. Danilov // *Key Engineering Materials*. – 2018. – Vol.777.– P. 32–36.
17. Garkina, I.A. Mathematical Methods of System Analysis in Construction Materials / I.A.Garkina, A.M. Danilov // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol.245.– P. 062014 (doi: 10.1088 / 1757-899X / 245/6/062014).
18. Garkina, I.A. The Approximation of the Systems of Applied Mechanisms / I.A.Garkina, A.M. Danilov, E. Budylna, P.Monastyrev // *Applied Mechanisms*. – 2017. – Vol. 865.– P. 554–560.
19. Данилов, А.М. Конструирование строительных композитов: компьютерные технологии, состояние и перспективы / А.М. Данилов, А.С. Нугаев // *Современные научные исследования и инновации*. – 2014. – № 11. – Ч. 1.

## References

1. Kondrashchenko, V.I. Application of methods of computer materials science in biotechnological research / V.I. Kondrashchenko // *Building Materials*. – 2006. – №3. – P.76–80.
2. Bazhenov, Yu.M. Basic Approaches to Building Materials / Yu.M. Bazhenov, V.A. Vorobiev, A.V. Ilyukhin // *Building Materials*. – 2006. – №7. – P.2–4.
3. Chernyshov, E.M. Clinkerless composites with a port-landite matrix / E.M. Chernyshov, N.D. Potamoshneva, M.P. Stepanova, R.V. Lesovik // *Research Journal of Applied Sciences*. – 2014. – №9. – P. 1109–1113.
4. Korolev, E.V. Using Particle Systems / E.V. Korolev, V.A. Smirnov // *Advanced Materials Research*. – 2013. – №746. – P.277–280.
5. Kiselev, D.G. Structure Formation of Sulfur-Based Composite: Model / D.G. Kiselev, E.V. Korolev, V.A. Smirnov // *Advanced Materials Research*. – 2014. – №1040. – P. 592–595.
6. Korolev, E.V. Technical and economic efficiency. Analysis and improvement / E.V. Korolev // *Building materials*. – 2017. – №3. – P.85–89.
7. Garkina, I.A. Modeling of kinetic processes in composite materials / I.A. Garkina // *Contemporary Engineering Sciences*. – 2015. – №8. – P.421–425.
8. Albakasov, A.I. Optimization of systems with a complex hierarchy / A.I. Albakasov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // *Bulletin of civil engineers*. – 2012. – № 2. – P. 324–327.
9. Albakasov, A.I. Management of the structure and properties of nano-modified building materials / A.I. Albakasov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // *Regional architecture and engineering*. – 2011. – № 2. – P. 9–17.
10. Bazhenov, Yu.M. Systems analysis in construction materials: monograph / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – M.: MGSU: Library of scientific research and projects, 2012. – 432 p.
11. 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 // *Building Materials*. – 2018. – № 1–2. – P. 60–62.
12. Garkina, I.A. Experience in developing composite materials: some aspects of mathematical modeling / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Izvestiya VUZ. Building*. – 2013. – №8 (656). – P.28–33.
13. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A.Garkina, A.M. Danilov // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – V.191. – P.012006 (doi: 10.1088 / 1757-899X / 191/1/012006).
14. 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.
15. 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.
16. Garkina, I.A. Approximation of Comparative Materials / I.A.Garkina, A.M. Danilov // *Key Engineering Materials*. – 2018. – Vol.777. – P. 32–36.
17. Garkina, I.A. Mathematical Methods of System Analysis in Construction Materials / I.A.Garkina, A.M. Danilov // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol.245. – P. 062014 (doi: 10.1088 / 1757-899X / 245/6/062014).
18. Garkina, I.A. The Approximation of the Systems of Applied Mechanisms / I.A.Garkina, A.M. Danilov, E. Budylyna, P.Monastyrev // *Applied Mechanisms*. – 2017. – Vol. 865. – P. 554–560.
19. Danilov, A.M. Construction of building composites: computer technology, state and prospects / A.M. Danilov, A.S. Nugaev // *Modern scientific research and innovation*. – 2014. – № 11. – Part 1.

УДК 691.17:535:6.08

*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

**Чернов Алексей Николаевич,**  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: lhms13@yandex.ru

**Низин Дмитрий Рудольфович,**  
кандидат технических наук,  
младший научный сотрудник кафедры  
«Строительные конструкции»  
E-mail: nizindi@yandex.ru

**Горенкова Анастасия Ивановна,**  
магистрант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: gorenkovaai@mail.ru

**Черушова Наталья Владимировна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Архитектура и дизайн»  
E-mail: cherushova@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

**Chernov Alexey Nikolaevich,**  
Postgraduate student of the department  
«Building construction»  
E-mail: lhms13@yandex.ru

**Nizin Dmitriy Rudolfovich,**  
Candidate of Science, Junior researcher of the  
department «Building structures»  
E-mail: nizindi@yandex.ru

**Gorenkova Anastasiya Ivanivna,**  
Master student of the department «Building  
construction»  
E-mail: gorenkovaai@mail.ru

**Cherushova Natalia Vladimirovna,**  
Candidate of Science, Associate Professor of  
the department «Architecture and Design»  
E-mail: cherushova@yandex.ru

## АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИГМЕНТИРОВАННЫХ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ В ПРОЦЕССЕ НАТУРНОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ\*

Т.А. Низина, А.Н. Чернов, Д.Р. Низин, А.И. Горенкова, Н.В. Черушова

Представлены результаты исследований изменения полного цветового различия образцов наполненных эпоксидных композитов, содержащих пигменты различных цветов, в процессе натурального климатического старения. Выявлено влияние вида и количества шести различных пигментов на цветовое старение эпоксидных композитов. Для оценки степени воздействия солнечного излучения на колориметрические показатели эпоксидных композитов предложен коэффициент  $K_{уф}$ , определяемый как отношение полного цветового различия лицевой поверхности к аналогичному показателю обратной поверхности образца. Установлено его изменение в зависимости от вида и концентрации пигмента, а также длительности натурального экспонирования.

*Ключевые слова: эпоксидные композиты, натурное экспонирование, колориметрические характеристики, полное цветовое различие, суммарная солнечная радиация, ультрафиолетовое излучение, пигменты*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-08-01050.

## ANALYSIS OF PIGMENTED EPOXY COMPOSITES COLORIMETRIC CHARACTERISTICS CHANGES IN THE PROCESS OF NATURAL EXPOSURE \*

T.A. Nizina, A.N. Chernov, D.R. Nizin, A.I. Gorenkova, N.V. Cherushova

This paper presents the research results of changes in the total color difference of the filled epoxy composites samples containing pigments of various colors in the process of natural climatic aging. In the study, the authors revealed the influence of the type and amount of six different pigments on the color aging of epoxy composites. To evaluate the degree of solar radiation exposure on the colorimetric parameters of epoxy composites, the coefficient  $K_{UF}$  is proposed; it is defined as the ratio of the total color difference of the face surface to the same index of the inverse surface of the sample. Its change depending on the type and concentration of the pigment, as well as the duration of natural exposure is determined.

*Keywords: epoxy composites, natural exposure, colorimetric characteristics, total color difference, total solar radiation, ultraviolet radiation, pigments*

Появившиеся сравнительно недавно полимерные композиционные материалы нашли свое применение в авиа-, машино-, судостроении и других отраслях промышленности [1–4]. В строительстве, в том числе в качестве защитных покрытий, широкое распространение получили композиты на основе эпоксидных и полиуретановых связующих, наполненные кварцевым песком, дисперсными минеральными порошками, фиброволокнами и отходами некоторых производств [5–8]. В последние годы в качестве наполнителя полимерных композитов активно применяется микрокальцит (микромрамор) – минеральный карбонатный наполнитель, обладающий высокой степенью белизны и значительной прочностью зерен, получаемый путем механического измельчения отходов обработки белого мрамора [12]. Использование наполненных композитов позволяет существенно снижать стоимость полимерных составов, а также, в ряде случаев, добиваться существенного повышения их физико-механических и эксплуатационных характеристик [10–12].

Несмотря на внушительный список преимуществ, применение большинства полимерных композитов в натуральных условиях ограничивается их недостаточно высокой климатической стойкостью [13–15]. В натуральных условиях эксплуатации на материал действует множество климатических факторов, основными из которых являются температура воздуха, относительная влажность и солнечная радиация. Солнечное излучение инициирует процессы фотохимической деструкции, связанные с дезориентацией и разрушением молекулярных связей в поверхностном слое полимера [13–16]. Наиболее агрессивной составляющей солнечной радиации является ультрафиолетовое излучение. В процессе химических реакций, возникающих в композите при воздействии ультрафиолета, происходит необратимое изменение декоративных характеристик, наблюдаемое уже в первые недели экспонирования и, как правило, свидетельствующее об активном протекании процессов деструкции [17, 18]. При этом степень воздействия солнечной радиации и характер изменений могут существенно различаться в зависимости от цвета поверхности композита, что связано с различным светопоглощением и светоотражением цветов в разных частях спектра, а также с различной светостойкостью используемых пигментов [19, 20].

В рамках натурального эксперимента с 1 марта по 1 августа 2018 года на климатической площадке эколого-метеорологической станции Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва (г. Саранск) проводилось экспонирование образцов эпоксидных композитов на основе двухкомпонентного эпоксидного компаунда Этал-27НТ/12НТ, в состав которого вводились микрокальцит фракции МКМ100 в количестве 160 % от массы эпоксидного связующего и пигменты желтого, зеленого, красного, синего, фиолетового и черного цветов. Содержание пигментов варьировалось в диапазоне от 0,25 до 1 % для хроматических цветов и от 0,5 до 5 % для черного цвета, что связано с более низкой цветовой насыщенностью данного пигмента. В качестве контрольного использовался неокрашенный состав.

Для определения интенсивности воздействия солнечного излучения использовался актинометрический комплекс, позволяющий в круглосуточном режиме осуществлять мониторинг изменений суммарной солнечной радиации и ультрафиолетового излучения диапазонов А и В [21]. С периодичностью 14 ÷ 16 дней производилось сканирование исследуемых образцов на полноцветном планшетном сканере с разрешением 1200 dpi. Оценка изменения колориметрических характеристик осуществлялась с помощью программного комплекса «Статистический анализ цветowych составляющих лакокрасочных покрытий» [22]. Для количественного описания декоративных характеристик использовалась субтрактивная цветовая модель СМΥΚΝ [10]. Для выявления интенсивности воздействия солнечного излучения производилось сравнение изменений колориметрических характеристик лицевой и обратной поверхностей экспонируемых образцов.

Полная цветовая насыщенность определялась по формуле [10]:

$$E_{СМΥΚΝ} = \sqrt{S_C^2 + S_M^2 + S_Y^2 + S_K^2 + S_H^2}, \quad (1)$$

где  $S_C$ ,  $S_M$ ,  $S_Y$ ,  $S_K$  и  $S_H$  – цветовое различие по насыщенности голубой, пурпурной, желтой, черной составляющих и яркости.

Оценка цветового различия по насыщенности производилась путем сравнения колориметрических характеристик исследуемого состава с абсолютно белым с максимальной плотностью распределения ( $f(X)=100\%$ ) при  $X=255$ :

$$S_p = \sum_{i=0}^{255} (255 - X_{pi}) \cdot f(X_{pi}) / (255 \cdot 100), \quad (2)$$

где  $X_{pi}$  – уровень цветовой составляющей, изменяющийся от 0 до 255;  $f(X_{pi})$  – плотность распределения.

В результате обработки экспериментальных данных были получены графики изменения колориметрических характеристик образцов, содержащих пигменты различного цвета и концентрации, в процессе натурального экспонирования. При построении аппроксимирующих кривых использовалась экспоненциальная модель вида:

$$\Delta E_t = \Delta E_{\max} (1 - \exp(-\alpha \cdot t^\beta)), \quad (3)$$

где  $\Delta E_{\max}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты, зависящие от вида исследуемого материала и длительности экспонирования  $t$  (сутки).

Числовые значения коэффициентов уравнения (3) представлены в таблице, графические зависимости изменения полного цветового различия образцов с различным содержанием желтого, красного и фиолетового пигментов от длительности экспонирования – на рис. 1. Для выявления влияния солнечной радиации приведены данные, описывающие изменение декоративных характеристик как на лицевой (сплошные линии), так и на обратной (штриховые линии) стороне образца.

По результатам проведенных исследований для всех составов установлена более высокая интенсивность изменения полного цветового различия на лицевой поверхности исследуемых образцов, что свидетельствует о значительном влиянии солнечной радиации на процессы деструкции, обусловленные фотохимическими реакциями в верхнем слое полимера и нагревом поверхности до температур, при которых может происходить переход полимера в высокоэластичное состояние, характеризующееся повышенной реакционной способностью.

Анализ графических зависимостей (см. рис. 1), а также значений коэффициента  $\Delta E_{\max}$  (см. таблицу) позволяет сделать вывод о том, что наибольшие изменения полного цветового различия претерпевают образцы, содержащие 0,5 % красного пигмента, наименьшие – 0,5 % черного пигмента. Для образцов красного и желтого цветов вне зависимости от содержания пигмента установлено резкое изменение коло-

симметрических характеристик уже в первый месяц экспонирования, в то время как показатели остальных составов менялись более равномерно. После девяти суток натурального экспонирования для всех составов наблюдались значительное снижение интенсивности деградации и постепенная стабилизация цветовых характеристик.

Значения коэффициентов уравнения (3), описывающего изменение полного цветового различия наполненных пигментированных эпоксидных композитов в зависимости от длительности экспонирования (Т, сутки) в натуральных условиях

Цвет используемого пигмента	Поверхность	Концентрация пигмента, % от массы связующего	Коэффициенты уравнения (3)			R <sup>2</sup>
			$\Delta E_{\max}$	$\alpha$	$\beta$	
Без пигмента	Лицевая	0	0,226	$0,70 \times 10^{-2}$	1,268	0,967
	Обратная		0,172	$1,29 \times 10^{-2}$	1,054	0,932
Жёлтый	Лицевая	0,25	0,422	$4,31 \times 10^{-2}$	0,857	0,977
		0,5	0,435	$0,98 \times 10^{-2}$	1,200	0,973
		1	0,413	$0,04 \times 10^{-2}$	1,906	0,980
	Обратная	0,25	0,277	$0,06 \times 10^{-2}$	1,708	0,907
		0,5	0,258	$0,09 \times 10^{-2}$	1,583	0,885
		1	0,216	$0,45 \times 10^{-2}$	1,213	0,877
Зеленый	Лицевая	0,25	0,139	$4,28 \times 10^{-2}$	0,785	0,788
		0,5	0,408	$0,005 \times 10^{-2}$	2,168	0,890
		1	0,317	$0,05 \times 10^{-2}$	1,731	0,843
	Обратная	0,25	0,125	$34,03 \times 10^{-2}$	0,353	0,799
		0,5	0,308	$0,13 \times 10^{-2}$	1,569	0,889
		1	0,232	$0,30 \times 10^{-2}$	1,285	0,819
Красный	Лицевая	0,25	0,441	$22,66 \times 10^{-2}$	0,534	0,969
		0,5	0,619	$7,35 \times 10^{-2}$	0,767	0,985
		1	0,600	$1,69 \times 10^{-2}$	1,106	0,991
	Обратная	0,25	0,414	$3,00 \times 10^{-2}$	0,953	0,952
		0,5	0,416	$0,47 \times 10^{-2}$	1,320	0,946
		1	0,507	$0,05 \times 10^{-2}$	1,732	0,957
Синий	Лицевая	0,25	0,360	$0,02 \times 10^{-2}$	1,964	0,938
		0,5	0,361	$0,02 \times 10^{-2}$	1,996	0,940
		1	0,387	$0,06 \times 10^{-2}$	1,745	0,947
	Обратная	0,25	0,304	$0,27 \times 10^{-2}$	1,392	0,923
		0,5	0,200	$0,22 \times 10^{-2}$	1,439	0,928
		1	0,289	$0,22 \times 10^{-2}$	1,310	0,859
Фиолетовый	Лицевая	0,25	0,244	$1,14 \times 10^{-2}$	1,154	0,930
		0,5	0,225	$0,63 \times 10^{-2}$	1,270	0,936
		1	0,236	$0,34 \times 10^{-2}$	1,384	0,956
	Обратная	0,25	0,158	$2,33 \times 10^{-2}$	1,023	0,973
		0,5	0,167	$1,36 \times 10^{-2}$	1,121	0,887
		1	0,196	$0,25 \times 10^{-2}$	1,429	0,950
Черный	Лицевая	0,5	0,107	$41,90 \times 10^{-2}$	0,228	0,664
		1	0,313	$0,19 \times 10^{-2}$	1,372	0,904
		5	0,436	$0,003 \times 10^{-2}$	2,368	0,900
	Обратная	0,5	0,111	$3,31 \times 10^{-2}$	0,851	0,837
		1	0,296	$0,07 \times 10^{-2}$	1,592	0,903
		5	0,412	$0,02 \times 10^{-3}$	2,426	0,966
Без пигмента	Лицевая	0	0,226	$0,70 \times 10^{-2}$	1,268	0,967
	Обратная		0,172	$1,29 \times 10^{-2}$	1,054	0,932

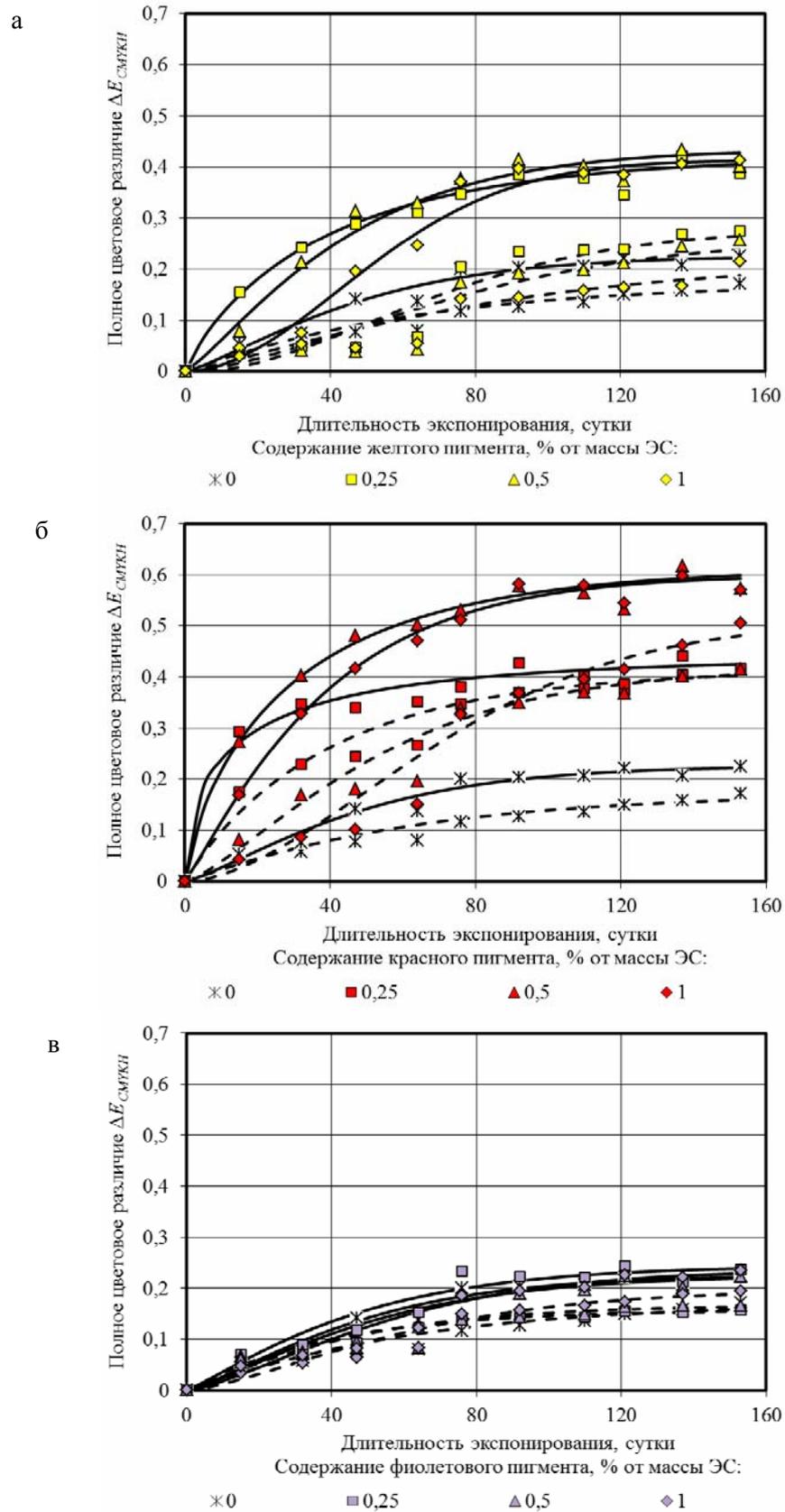


Рис. 1. Изменение полного цветового различия наполненных эпоксидных композитов с различным содержанием пигментов в зависимости от длительности экспонирования: а – желтый; б – красный; в – фиолетовый (сплошная линия – лицевая сторона, штриховая – обратная)

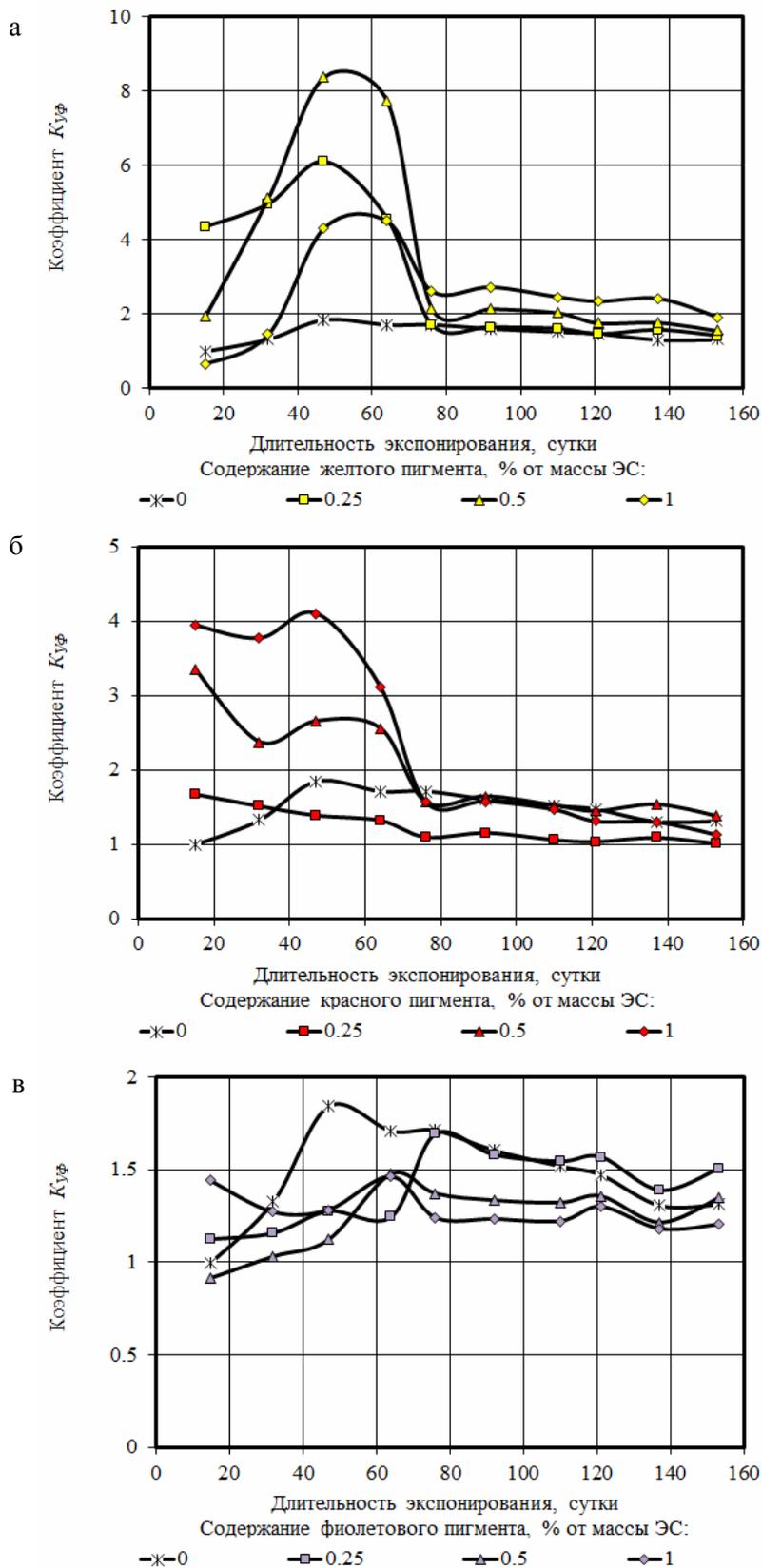


Рис. 2. Изменение коэффициента  $K_{y\phi}$  в процессе натурального экспонирования образцов наполненных эпоксидных композитов с различным содержанием пигментов в зависимости от длительности экспонирования:  
 а – желтый; б – красный; в – фиолетовый

Для оценки степени воздействия солнечного излучения на колориметрические показатели эпоксидных композитов был введен коэффициент  $K_{уф}$ , определяемый как отношение полного цветового различия лицевой поверхности к аналогичному показателю изнаночной поверхности. На рис. 2 представлены кривые изменения коэффициента  $K_{уф}$  в процессе натурального экспонирования образцов с различным содержанием желтого, красного и фиолетового пигментов. Высокие значения коэффициента  $K_{уф}$  свидетельствуют о значительной деградации лицевой поверхности образца под действием ультрафиолетового излучения по сравнению с обратной поверхностью, не подвергаемой в процессе натурального экспонирования воздействию солнечной радиации. С ростом величины  $K_{уф}$  возрастает вклад солнечного излучения в суммарное воздействие факторов, инициирующих процессы деструкции в исследуемых образцах. По результатам проведенного анализа установлено, что характер изменения полученных кривых меняется в зависимости от вида и концентрации пигментов.

Для образцов желтого и красного цветов наибольшие значения  $K_{уф}$  зафиксированы в первые 64 дня экспонирования (рис. 2, а, б). При этом величина изменений декоративных характеристик лицевой поверхности образца, содержащего 0,5 % желтого пигмента, на 47-е сутки натурального экспонирования более чем в 8 раз превысила изменение аналогичных характеристик обратной стороны. Для образцов, содержащих 0,5 и 1 % желтого пигмента, значения коэффициента  $K_{уф}$  эти же сроки экспонирования составили, соответственно, около 6 и 4. Столь значительная разница в интенсивности изменения декоративных показателей лицевой и обратной поверхностей образцов, содержащих желтый пигмент, свидетельствует о ключевой роли солнечного излучения в процессе их климатического старения. Несмотря на наибольшую величину полного цветового различия среди всех исследуемых составов (см. рис. 1), для образцов, содержащих красный пигмент, получены значительно меньшие значения  $K_{уф}$ , что, очевидно, связано с более низкой стойкостью данного пигмента к атмосферным факторам, не связанным с воздействием актинометрических параметров. После 76 суток натурального экспонирования для составов, содержащих желтый и красный пигменты, установлено значительное замедление скорости деградации лицевой поверхности по сравнению с изнаночной (см. рис. 2, а, б), что в первую очередь связано со снижением интенсивности выгорания (см. рис. 1).

Степень деградации исследуемых поверхностей образцов, не содержащих пигменты, после первых 15 суток идентична. На следующем интервале экспонирования наблюдалось постепенное увеличение интенсивности выгорания лицевой поверхности. Максимальные значения коэффициента  $K_{уф}$  для данного состава получены на 47-е сутки эксперимента, после чего влияние солнечного излучения на процессы деструкции постепенно снижалось, о чем свидетельствует приближение кривой изменения  $K_{уф}$  к единице. При этом возрастает интенсивность изменений декоративных характеристик на изнаночной поверхности образцов, не подверженной воздействию ультрафиолета. Аналогичный характер изменения  $K_{уф}$  наблюдается для составов, содержащих фиолетовый, синий или черный пигмент, однако максимальные значения коэффициента  $K_{уф}$  получены при 76, 92 и 64 сутках экспонирования соответственно. Несмотря на различия в скорости деградации и интенсивность изменений колориметрических характеристик образцов, для всех составов наблюдается уменьшение соотношения цветовых различий лицевой и изнаночной поверхностей к концу экспонирования.

В результате проведенных исследований установлено, что суммарная солнечная радиация оказывает существенное влияние на изменение колориметрических характеристик эпоксидных композитов, что подтверждается большей интенсивностью деградации на лицевой поверхности исследуемых образцов по сравнению с поверхностью, не подверженной воздействию солнечного излучения. Предложенная математическая модель позволяет с высокой достоверностью описывать изменение декоративных характеристик полимерных композиционных материалов в процессе натурального экспонирования. Анализ изменения коэффициента  $K_{уф}$ , предложенного для оценки влияния доли актинометрических параметров в суммарном изменении декоративных показа-

телей наполненных эпоксидных композитов в процессе климатического старения, позволил также проследить влияние вида и концентрации используемых пигментов. Установлено, что величина и характер изменений колориметрических характеристик различных составов могут значительно различаться в зависимости от стойкости используемых пигментов к воздействию различных климатических факторов.

### Список литературы

1. Хозин, В.Г. Основные области применения эпоксидных материалов в технике / В.Г. Хозин // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2008. – № 11. – С. 12–16.
2. Говарикер, В.Р. Полимеры / В.Р. Говарикер, Н.В. Висванатхан, Дж. Шридхар. – М.: Наука, 1990. – 396 с.
3. Каблов, Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники / Е.Н. Каблов // Вестник Российской академии наук. – 2012. – Т. 82. – №6. – С. 520–530.
4. Селяев, В.П. Полимербетоны: монография / В.П. Селяев, Ю.Г. Иващенко, Т.А. Низина. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2016. – 284 с.
5. Соколова, Ю.А. Модифицированные эпоксидные клеи и покрытия в строительстве / Ю.А. Соколова, Е.М. Готлиб. – М.: Стройиздат, 1990. – 174 с.
6. Селяев, В.П. Полимерные покрытия для бетонных и железобетонных конструкций / В.П. Селяев, Ю.М. Баженов, Ю.А. Соколова, В.В. Цыганов, Т.А. Низина. – Саранск: Изд-во СВМО, 2010. – 224 с.
7. Бобрышев, А.Н. Эпоксидные и полиуретановые строительные композиты / А.Н. Бобрышев, Д.Е. Жарин, Е.В. Кондратьева, А.А. Бобрышев, Р.Л. Биктимиров. – Саратов: Сарат. гос.техн. ун-т., 2005. – 159 с.
8. Соломатов, В.И. Химическое сопротивление материалов / В.И. Соломатов, В.П. Селяев, Ю.А. Соколова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 2001. – 384 с.
9. Низина, Т.А. Влияние гранулометрического состава микрорамора на физико-механические характеристики наполненных эпоксидных композитов / Т.А. Низина, А.Н. Чернов, М.А. Морозов, Д.Р. Низин, А.И. Попова // Вестник МГСУ. – 2016. – №9. – С. 98–107.
10. Низина, Т.А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих / Т.А. Низина. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – 258 с.
11. Низина, Т.А. Наполненные эпоксиуретановые композиционные строительные материалы / Т.А. Низина, А.Н. Зимин // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – №1. – С. 53–59.
12. Селяев, В.П. Разработка и применение функционально-градиентных покрытий для усиления и защиты железобетонных конструкций / В.П. Селяев, Т.А. Низина, В.В. Цыганов // Вестник ТГАСУ. – 2008. – № 3 (20). – С. 143–149.
13. Мелкумов, А.Н. Старение изделий из пластмасс в климатических условиях Узбекистана / А.Н. Мелкумов, Г.О. Татевосьян. – Ташкент: Узбекистан, 1975. – 177 с.
14. Павлов, И.Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях / И.Н. Павлов, А.Н. Мелкумов. – М.: Химия, 1982. – 220 с.
15. Низина, Т.А. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов на основе эпоксидных связующих / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, Д.А. Артамонов // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №1. – С. 34–42.
16. Низина, Т.А. Анализ влияния отвердителя на климатическую стойкость эпоксидных композиционных материалов / Т.А. Низина, Д.А. Артамонов, Д.Р. Низин, А.Н. Чернов, Д.О. Андроньчев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2017. – №1. – С. 55–64.
17. Старцев, О.В. Зависимость температуры поверхности образцов от характеристик климата при экспозиции в натуральных условиях / О.В. Старцев, И.М. Медведев, А.С. Кротов, С.В. Панин // Коррозия: материалы, защита. – 2013. – № 7. – С. 43–47.

18. Старцев, В.О. Цветовой критерий климатического старения эпоксидного полимера / В.О. Старцев, Т.А. Низина, О.В. Старцев // Пластические массы. – 2015. – №7–8. – С. 45–48.

19. Низина, Т.А. Моделирование влияния актинометрических параметров на изменение декоративных характеристик эпоксидных композитов, экспонированных в натуральных условиях / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, А.Н. Чернов // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №2. – С. 27–36.

20. Низина, Т.А. Влияние цвета эпоксидных композитов на изменение колориметрических характеристик в процессе натурального экспонирования / Т.А. Низина, А.Н. Чернов, Д.Р. Низин, А.И. Попова // Вестник МГСУ. – 2016. – №7. – С. 67–80.

21. Низина, Т.А. Материальная база вуза как инновационный ресурс развития национального исследовательского университета / Т.А. Низина, В.П. Селяев // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 115–121.

22. Селяев, В.П. Статистический анализ цветовых составляющих лакокрасочных покрытий: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006610820 от 28.02.2006 г. в Роспатенте по заявке № 2005613472 от 29.12.2005 г. / В.П. Селяев, Т.А. Низина, Н.О. Зубанкова, Ю.А. Ланкина.

### References

1. Khozin, V.G. The main fields of application of epoxy materials in engineering / V.G. Khozin // Polymer Science. Series D. – 2008. – № 11. – P. 12–16.

2. Govariker, V.P. Polymers: Scientific publication / V.P. Govariker, N.V. Visvanathan, Dj. Shridhar. – M.: Publishing house Science, 1990. – 396 p.

3. Kablov, E.N. Materials and chemical technologies for aviation equipment / E.N. Kablov // Herald of the Russian Academy of Sciences. – 2012. – V. 82, №6. – P. 520–530.

4. Selyaev, V.P. Polymer concrete: monograph / V.P. Selyaev, Y.G. Ivashchenko, T.A. Nizina. – Saransk: Publishing House of Mordovia State University, 2016. – 284 p.

5. Sokolova, Y.A. Modified epoxy adhesives and coatings in construction / Y.A. Sokolova, E. M. Gotlib. – M.: State Publishing House of Literature on Construction, Architecture and Building Materials, 1990. – 174 p.

6. Selyaev, V.P. Polymer coating for concrete and reinforced concrete construction / V.P. Selyaev, Y.M. Bazhenov, Y.A. Sokolova, V.V. Tsyganov, T.A. Nizina. – Saransk: Publishing house of Middle Volga Mathematical Society, 2010. – 224 p.

7. Bobryshev, A.N. Epoxy and polyurethane building composites / A.N. Bobryshev, D.E. Zharin, E.V. Kondratieva, A.A. Bobryshev, R.L. Biktimirov. – Saratov: Saratov State Technical University, 2005. – 159 p.

8. Solomatov, V.I. Chemical resistance of materials / V.I. Solomatov, V.P. Selyaev, Y.A. Sokolova. – 2nd ed., Rev. and add. – M., 2001. – 384 p.

9. Nizina, T.A. Influence of micromarbel granulometric composition of on physical and mechanical characteristics of filled epoxy composites / T.A. Nizina, A.N. Chernov, M.A. Morozov, D.R. Nizin, A.I. Popova // Vestnik MGSU. – 2016. – №9. – P. 98–107.

10. Nizina, T.A. Protective and decorative coatings based on epoxy and acrylic resins / T.A. Nizina. – Saransk: Publishing House of Mordovia State University, 2007. – 258 p.

11. Nizina, T.A. Filled epoxyurethane composite building materials / T.A. Nizina, A.N. Zimin // Regional architecture and engineering. – 2011. – №1. – P. 53–59.

12. Selyaev, V.P. Development and application of functional gradient coatings for reinforcement and protection of reinforced concrete construction // V.P. Selyaev, T.A. Nizina, Y.A. Lankina, V.V. Tsyganov // Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. – 2008. – № 3 (20). – P. 143–149.

13. Melkumov, A.N. Aging of plastic products in the climatic conditions of Uzbekistan / A.N. Melkumov, G.O. Tatevosyan. – Tashkent: Uzbekistan, 1975. – 177 p.

14. Pavlov, I.N. Plastics aging in natural and artificial conditions / A.N. Melkumov. – M.: Publishing House Chemistry, 1982. – 220 p.

15. Nizina, T.A. Climatic resistant of polymeric composite materials based on epoxy resins / T.A. Nizina, V.P. Selyaev, D.R. Nizin, D.A. Artamonov // Regional architecture and engineering. – 2015. – №1. – P. 34–42.
16. Nizina, T.A. Analysis of the influence of the hardener on the climatic resistant of epoxy composite materials / T.A. Nizina, D.A. Artamonov, D.R. Nizin, A.N. Chernov, D.O. Andronychev // News of higher educational institutions. Construction. – 2017. – №1. – P. 55–64.
17. Startsev, O.V. Dependence of the samples surface temperature on the climate characteristics at the exposure in natural conditions / O.V. Startsev, I.M. Medvedev, A.S. Krotov, S.V. Panin // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. – 2013. – № 7. – P. 43–47.
18. Startsev, V.O. Color criterion of epoxy resin climatic aging / V.O. Startsev, T.A. Nizina, O.V. Startsev // International Polymer Science and Technology. – 2015. – № 7–8. – P. 45–48.
19. Nizina, T.A. Modeling of the impact of actinometrical parameters on epoxy composites decorative characteristics change exposed in field conditions / T.A. Nizina, V.P. Selyaev, D.R. Nizin, A.N. Chernov // Regional architecture and engineering. – 2015. – № 2. – P. 27–36.
20. Nizina, T.A. Influence of epoxy composites colours on colorimetric characteristics change during natural exposure / T.A. Nizina, A.N. Chernov, D.R. Nizin, A.I. Popova // Vestnik MGSU. Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering. – 2016. – №7. – P. 67–80.
21. Nizina, T.A. Material base of the university as an innovative resource for the development of national research university / T.A. Nizina, V.P. Selyaev // Durability of building materials, products and structures: materials of All-Russian scientific and engineering. conf. – Saransk: Publishing House of Mordovia State University, 2014. – P. 115–121.
22. Selyaev, V.P. Statistical analysis of color components of paint coatings: Certificate of official registration of the computer program № 2006610820 from 28.02.2006 in Rospatent under the application №2005613472 from 29.12.2005 / V.P. Selyaev, T.A. Nizina, N.O. Zubankova, Y.A. Lankina

УДК 544.3+666.9.015.427

Белгородский государственный  
технологический университет  
им. В.Г. Шухова

308012, Россия, 308012, Белгород,  
ул. Костюкова, д. 46,  
тел.: +7(4722) 30-99-42

**Рахимбаев Шарк Матросулович**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Строительное  
материаловедение, изделия и конструкции»

**Рахимбаев Игорь Шаркович**,  
кандидат технических наук, инженер-  
исследователь Центра высоких технологий

**Хахалева Елена Николаевна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Строительное  
материаловедение, изделия и конструкции»  
E-mail: hahaleva@intbel.ru

Belgorod State Technological University  
named after V.G. Shukhov

308012, Russia, 308012, Belgorod, 46,  
Kostyukova St.,  
tel.: +7(4722) 30-99-42

**Rakhimbayev Shark Matrosulovich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Construction materials science,  
products and structures»

**Rakhimbayev Igor Sharkovich**,  
Candidate of Sciences, Engineer-researcher at  
the Centre for high technologies

**Khakhaleva Elena Nikolaevna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Construction materials  
science, products and structures»  
E-mail: hahaleva@intbel.ru

## О МЕХАНИЗМЕ ГИДРОСУЛЬФОАЛЮМИНАТНОГО РАСШИРЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Ш.М. Рахимбаев, И.Ш. Рахимбаев, Е.Н. Хахалева

С помощью цикла Борна – Габера рассчитана степень пересыщения жидкой фазы цементного камня по ионам кальция при кристаллизации этtringита при сульфатной коррозии. Установлено влияние состава алюминатных фаз на степень пересыщения. Рассмотрено влияние объема, в котором кристаллизуется этtringит, на сульфатную коррозию.

*Ключевые слова:* сульфатная коррозия, портландцемент, механизм, бетон, синтез, этtringит, цементный камень, алюминатные фазы, активность ионов

## ON THE MECHANISM OF HYDROSULPHALUMINATE EXPANSION OF CEMENT STONE

N.I. Alfimova, O.V. Kovalchenko, N.I. Nikiforova

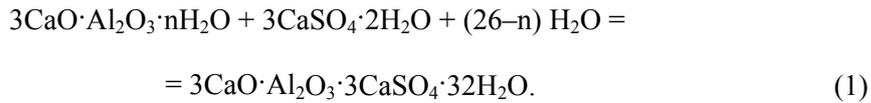
Using the Born – Haber cycle the degree of supersaturation of the liquid phase of the cement stone by calcium ions during the crystallization of ettringite in sulfate corrosion is calculated. The influence of the composition of the aluminate phases on the degree of supersaturation is estimated. The influence of the volume in which ettringite crystallizes, on the sulfate corrosion is discussed.

*Keywords:* sulfate corrosion of Portland cement, mechanism, concrete, synthesis, ettringite, cement stone, the aluminate phase, the activity of the ions

Сульфатная коррозия бетонов на основе портландцемента наблюдается в морской воде, гидротехнических сооружениях, построенных в зонах орошаемого земледелия в субтропиках, в сооружениях для очистки бытовых сточных вод [1-9]. Она опасна также для цементного камня нефтяных и газовых скважин, пластовые воды которых содержат много сульфат-ионов [10, 11]. Борьба с ней требует больших материально-технических и трудовых затрат, поэтому исследованию механизма сульфатной коррозии и разработке методов борьбы с ней уделяется большое внимание.

На основе более чем столетних исследований сульфатной коррозии, выполненных отечественными и зарубежными авторами, установлено следующее [1-11]: содержащиеся в камне из портландцемента алюминаты и гидроалюминаты кальция состава

$n\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$  реагируют с солями серной кислоты с образованием комплексного соединения *эттрингит* по реакции



При кристаллизации эттрингита объем твердой фазы возрастает до трех раз. В определенных условиях частицы эттрингита, кристаллизуясь в узких порах и капиллярах бетона, способны вызвать большие растягивающие напряжения, ослабляющие структуру цементного камня, вплоть до его растрескивания. При этом большую роль играет концентрация гидроксида кальция в порах бетона. Указанные выше деструктивные явления наблюдаются лишь в том случае, когда концентрация  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в жидкой фазе близка к насыщению (0,8-1,1 г/л CaO и выше). Если же содержание гидроксида кальция в жидкой фазе не превышает 0,3-0,5 г/л CaO, то игольчатые кристаллы эттрингита не ослабляют, а повышают прочность цементного камня, особенно при изгибе [1].

Механизм этого феномена мало изучен. Наиболее распространена точка зрения, что опасна кристаллизация эттрингита «через твердую фазу», т.е. путем топохимического внедрения ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{Ca}^{2+}$  в структуру гидроалюминатов кальция. Если же в системе мало гидроксида кальция, то благодаря высокой растворимости гидроалюминатов кальция в порах бетона эттрингит образуется «через жидкую фазу», т.е. рассредоточенно.

Такое объяснение особенностей сульфатной коррозии не вполне корректно, т.к. структуры гидроалюминатов, и особенно трехкальциевого алюмината, сильно отличаются от эттрингита, поэтому трудно объяснить, как последний образуется из них топохимически. К тому же реакции в жидкой фазе при нормальной температуре идут значительно быстрее и полнее, чем топохимические, поэтому последние менее вероятны.

Закономерности влияния состава алюминатных фаз на образование эттрингита рассмотрены в [12] с применением химической термодинамики.

В работе [13] дана трактовка роли концентрации извести в жидкой фазе при кристаллизации эттрингита, исходя из того, что процессы обычно идут «через раствор». В этой работе показано, что на величину кристаллизационного давления  $P$ , которое оказывают растущие в порах и капиллярах цементных систем частицы эттрингита, сильно влияет степень пересыщения последнего по основным ионам, входящим в его состав:

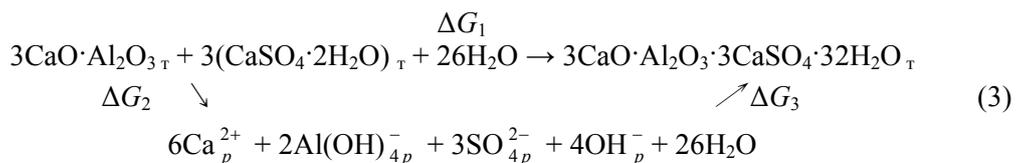
$$P = RT \ln \beta / V, \quad (2)$$

где  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура;  $\beta$  – степень пересыщения;  $V$  – объем, в котором кристаллизуются частицы эттрингита.

Данная работа посвящена расчету величины  $\beta$  в зависимости от состава исходной алюминатной фазы, из которой образуется эттрингит.

Исходные данные для расчетов взяты из [14, 15].

Процесс синтеза эттрингита из алюминатных фаз и гипса расчленим на отдельные стадии, воспользовавшись термодинамическим циклом Борна – Габера:



Здесь  $\Delta G_1$  – общий термодинамический эффект синтеза эттрингита из смеси  $\text{C}_3\text{A}$  и гипса и 26 молекул воды;  $\Delta G_2$  – изменение изобарно-изотермического потенциала системы при растворении  $\text{C}_3\text{A}$  и гипса в воде;  $\Delta G_3$  – изменение свободной энергии при кристаллизации эттрингита из раствора, ккал/моль.

В цикле (3)  $\Delta G_1 = \Delta G_2 + \Delta G_3$ .

Рассчитаем численное значение этих величин, а затем степень пересыщения ионов, используя справочные данные [14, 15], в ряде случаев уточненные авторами:

$$\Delta G_1 = 807 + 3 \cdot 429,6 + 26 \cdot 56,7 - 3639 = -69,0 \text{ ккал/моль,}$$

$$\Delta G_2 = 807 + 3 \cdot 429,6 - 2 \cdot 312 - 6 \cdot 132,2 - 3 \cdot 177,8 - 4 \cdot 37,6 = -5,2 \text{ ккал/моль,}$$

$$\Delta G_3 = 6 \cdot 132,2 + 2 \cdot 312 + 3 \cdot 177,8 + 4 \cdot 37,6 + 26 \cdot 56,7 - 3639 = -63,8 \text{ ккал/моль.}$$

Определим активности ионов, окружающих гидратирующиеся частицы  $C_3A$  и растущие кристаллы этtringита. Первые рассчитываем из величины  $\Delta G_2 = -5,2$  ккал/моль, а вторые – 63,8 ккал/моль.

$$\lg K_{p2} = 5,2 / RT = 3,8;$$

$$K_{p2} = [Ca^{2+}]^6 [0,33 Ca^{2+}]^2 [0,5Ca^{2+}]^3 [0,67Ca^{2+}]^4;$$

$$\lg K_{p2} = -2,566 + 15 \lg [Ca^{2+}]; \lg [Ca^{2+}] = 0,42; [Ca^{2+}] = 2,65 \text{ моль/л;}$$

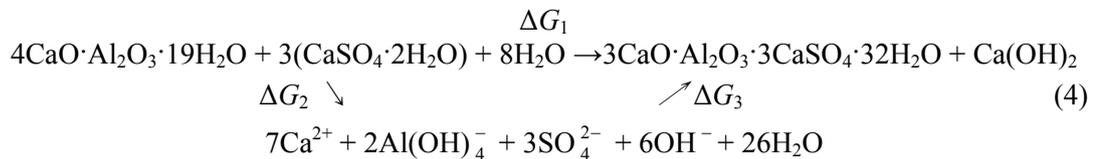
$$[Al(OH)_4^-] = 0,88 \text{ моль/л; } [SO_4^{2-}] = 1,32 \text{ моль/л;}$$

$$+ \lg K_{p5} = -46,8; 15 \lg [Ca^{2+}] = -44,2; \lg [Ca^{2+}] = -2,94; [Ca^{2+}] = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л.}$$

$$\text{Степень пересыщения по ионам } Ca^{2+} \text{ и другим } \beta = 2,65 / 1,15 \cdot 10^{-3} = 2,3 \cdot 10^3.$$

Так как ионы  $Al(OH)_4^-$ ,  $SO_4^{2-}$  и  $OH^-$  имеют такие же численные значения степени пересыщения  $\beta$ , как и ионы  $Ca^{2+}$ , величины этого показателя по первым опускаем.

Рассмотрим синтез этtringита из высокоосновного гидроалюмината кальция  $C_4AH$ :



$$\Delta G_1 = 2091 + 3 \cdot 429,6 + 8 \cdot 56,7 - 3639 - 214,4 = -20,0 \text{ ккал/моль,}$$

$$\Delta G_2 = 2091 + 3 \cdot 429,6 - 7 \cdot 132,2 - 2 \cdot 312 - 3 \cdot 177,8 - 6 \cdot 37,6 - 18 \cdot 56,7 = 50,8 \text{ ккал/моль,}$$

$$\Delta G_3 = 7 \cdot 132,2 + 2 \cdot 312 + 3 \cdot 177,8 + 6 \cdot 37,6 + 26 \cdot 56,7 - 3639 - 214,4 = -70,8 \text{ ккал/моль,}$$

$$\lg K_{p2} = -37,2;$$

$$K_{p2} = 0,00341 \lg [Ca^{2+}]^{18};$$

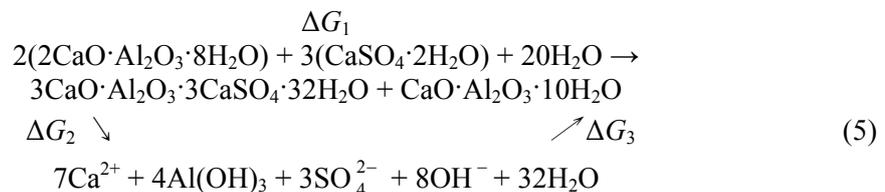
$$\lg K_{p2} = -2,46 + 18 \lg [Ca^{2+}].$$

$$-34,76 = 18 \lg [Ca^{2+}]; \lg [Ca^{2+}] = -1,93; [Ca^{2+}] = 1,17 \cdot 10^{-2} \text{ моль/л.}$$

$$- \lg K_{p3} = 51,9; \lg [Ca^{2+}] = -2,74; [Ca^{2+}] = 1,81 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л.}$$

$$\beta = 1,17 \cdot 10^{-2} / 1,81 \cdot 10^{-3} = 6,46.$$

Рассчитаем изменение изобарно-изотермического потенциала в цикле Борна – Габера для реакции:



В данном случае в связи с низкой основностью  $C_2AH_8$  и  $CAH_{10}$  в сравнении с  $C_4AH_{19}$  и  $C_3AH_6$  в качестве промежуточного продукта реакции синтеза этtringита принимаем не ион  $Al(OH)_4^-$ , а аморфный  $Al(OH)_3$ .

$$\Delta G_1^0 = 2 \cdot 1151,5 + 3 \cdot 429,6 + 20 \cdot 56,7 - 3639 - 1103,7 = -16,9 \text{ ккал/моль,}$$

$$\Delta G_2^0 = 2 \cdot 1151,5 + 3 \cdot 429,6 - 7 \cdot 132,2 - 4 \cdot 273 - 3 \cdot 177,8 - 8 \cdot 37,6 - 12 \cdot 56,7 = 59,8 \text{ ккал/моль,}$$

$$\Delta G_3^0 = 7 \cdot 132,2 + 4 \cdot 312 + 3 \cdot 177,8 + 8 \cdot 37,6 + 32 \cdot 56,7 - 3639 - 1103,7 = -76,3 \text{ ккал/моль.}$$

Эти величины  $\Delta G_{258}^0$ , в противоположность предыдущим случаям, относятся не к 1 моль исходного гидроалюмината кальция, а к 2.

Определим активности ионов и степень пересыщения.

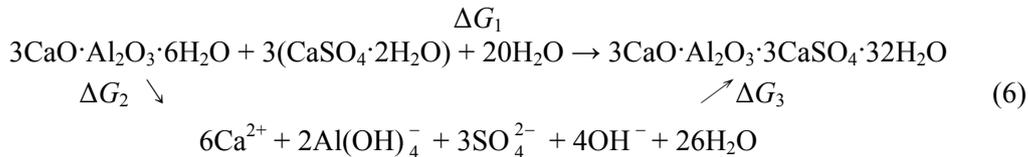
$$\Delta G_2 = 59,8; \lg K_{p2} = -43,84; K_{p2} = -0,42 + 18 \lg [Ca^{2+}],$$

$$[Ca^{2+}] = 3,89 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л.}$$

$$-\Delta G_3 = 76,3 \text{ ккал}; \lg K_{p3} = -55,94; \lg [Ca^{2+}] = -3,08; [Ca^{2+}] = 8,31 \cdot 10^{-4} \text{ моль/л.}$$

$$\beta = 4,68.$$

Произведем расчет  $\Delta G_{258}^0$  реакции синтеза этtringита из гидроалюмината  $C_3AH_6$  кубической сингонии.



$$\Delta G_1^0 = 1198,4 + 3 \cdot 429,6 + 20 \cdot 56,7 - 3639 - 1103,7 = -17,8 \text{ ккал/моль,}$$

$$\Delta G_2^0 = 1198,4 + 3 \cdot 429,6 - 6 \cdot 132,2 - 2 \cdot 312 - 4 \cdot 37,6 - 3 \cdot 117,8 - 6 \cdot 56,7 = 46,0 \text{ ккал/моль,}$$

$$\Delta G_3^0 = 6 \cdot 132,2 + 3 \cdot 312 + 4 \cdot 37,6 + 26 \cdot 56,7 + 3 \cdot 177,8 - 3639 = -63,8 \text{ ккал/моль.}$$

Рассчитаем степень пересыщения ионов в этой системе.

$$\Delta G_2 = +46,0; \lg K_{p2} = -33,7$$

$$K_{p2} = [Ca^{2+}]^6 [1/3 Ca^{2+}]^2 [2/3 Ca^{2+}]^4 [0,5Ca] = 0,11 \cdot 0,2 \cdot 0,125 [Ca^{2+}]^{15} = 0,00275 [Ca]^{15};$$

$$\lg K_{p2} = -2,56 + 15 \lg [Ca^{2+}]; \lg [Ca^{2+}] = -2,076;$$

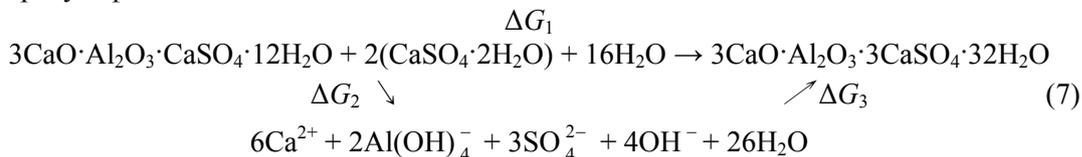
$$[Ca^{2+}] = 8,39 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л.}$$

$$-\Delta G_3 = 63,8 \text{ ккал}; \lg K_{p3} = -46,77; \lg [Ca^{2+}] = -2,81;$$

$$[Ca^{2+}] = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л.}$$

$$\beta = 5,41.$$

Рассмотрим реакцию синтеза этtringита из моносульфатной формы гидросульфалюмината кальция.



$$\Delta G_1 = 1863 + 2 \cdot 429,6 + 16 \cdot 56,7 - 3639 = -9,6 \text{ ккал/моль,}$$

$$\Delta G_2 = 1863 + 2 \cdot 429,6 - 6 \cdot 132,2 - 2 \cdot 312 - 3 \cdot 177,8 - 4 \cdot 37,6 - 10 \cdot 56,7 = 54,2 \text{ ккал/моль,}$$

$$\Delta G_3 = 6 \cdot 132,2 + 2 \cdot 312 + 3 \cdot 177,8 + 4 \cdot 37,6 + 26 \cdot 56,7 - 3639 = -63,8 \text{ ккал/моль.}$$

На основе полученных данных рассчитаем константу равновесия исходного компонента реакции (7)  $C_3ASH_{12}$  и конечного ее продукта – этtringита.

$$\Delta G_2 = 54,2 \text{ ккал/моль}; \lg K_p = -39,73$$

$$K_p = [Ca^{2+}]^6 [0,33Ca^{2+}]^2 [0,5Ca^{2+}]^3 [0,67Ca^{2+}]^4 = 0,11 \cdot 0,125 \cdot 0,2 \cdot [Ca^{2+}]^{15} = 0,0027 [Ca^{2+}]^{15}.$$

$$\lg K_p = -2,56 + 15 \lg [Ca^{2+}]; \lg [Ca^{2+}] = -2,48;$$

$$[Ca^{2+}] = 3,31 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л.}$$

$$-\Delta G_3 = 63,8; \lg K_{p3} = -46,77; \lg [Ca^{2+}] = -2,94; [Ca^{2+}] = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л.}$$

$$\beta = 3,31 \cdot 10^{-3} / 1,15 \cdot 10^{-3} = 2,87.$$

Анализ полученных результатов показывает, что максимальное пересыщение  $\beta$  по ионам кальция, алюминия,  $SO_4^{2-}$  наблюдается при синтезе этtringита из негидратированного трехкальциевого алюмината  $3CaO \cdot Al_2O_3$  ( $2,3 \cdot 10^3$ ). Столь большое значение пересыщения обусловлено высокой гидратационной активностью безводного  $C_3A$ . Другие алюминатные фазы в порядке убывания степени пересыщения по ионам  $Ca^{2+}$  при синтезе этtringита располагаются в следующий ряд:

$$C_4AH_{19} (\beta = 6,46), C_3AH_{16} (5,41), C_2AH_8 (4,68), C_3A \bar{S}H_{12} (2,87)$$

Полученный ряд в основном совпадает с результатами расчетов по величине  $\Delta G_{258}^0$  синтеза этtringита из алюминатных фаз различного состава [12]. Минимальной стойкостью обладает безводный  $C_3A$ , максимальной – камень из моносulfата кальция и  $C_2AH_8$ . Однако логарифмы степеней пересыщения  $\beta$  для большинства гидроалюминатов мало отличаются друг от друга. Это дает основание предполагать, что при сульфатной коррозии камня объем  $V$ , в котором кристаллизуется этtringит [13], играет значительную роль в генерировании опасных величин кристаллизационного давления. Он минимален у  $C_3A$  и  $C_4AH_{19}$  и максимален у  $C_3A\bar{S}H_{12}$  и  $C_2AH_8$  [13], что, наряду со степенью пересыщения, обуславливает повышенную сульфатостойкость камня, содержащего эти последние фазы.

### Список литературы

1. Москвин, В.М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузеев. – М.: Стройиздат, 1980. – 535 с.
2. Рахимбаев, Ш.М. Повышение коррозионной стойкости бетонов путем рационального выбора вяжущего и заполнителей: монография / Ш.М. Рахимбаев, Н.М. Толыпина. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. – 250 с.
3. Хахалева, Е.Н. Повышение коррозионной стойкости бетонных конструкций промышленных предприятий: монография / Е.Н. Хахалева, Ш.М. Рахимбаев, Н.М. Толыпина. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. – 84 с.
4. Less, S.T. Resistance of concrete in salt solutions exposure to extreme intensity / S.T. Less, H.Y. Moon, R.N. Swamy // Cem. And Concr. Compos. – 2005. – №1. – P 65–76.
5. Irassar, E.F. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler / E.F. Irassar // Cem. And Concr. Res. – 2009. – 39. – № 3. – P.241–254.
6. Stark, D. Longtaim study of concrete durability in sulfate soils / D. Stark // Geogre Verbeck Symposium on Sulfate Resistance of Concrete. – 1982. – ACI PS – 77.
7. Бабушкин, В.И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона / В.И. Бабушкин. – М.: Стройиздат, 1968. – 192 с.
8. Бабков, В.В. Аспекты долговечности цементного камня / В.В. Бабков, А.Ф. Полак, Г.П. Комолов // Цемент. – 1988. – № 3. – С.14–16.
9. Мюллауэр, В. Механизмы воздействия сульфатов на бетон: факторы химической и физической устойчивости / В. Мюллауэр, Р.Е. Бедду, Д. Хайнц // Цемент и его применение. – 2013. – № 9–10. – С.34–43.
10. Булатов, А.И. Коррозия тампонажных цементов / А.И. Булатов, Ш.М. Рахимбаев, Д.Ф. Новохатский. – Ташкент: Изд-во Узбекистан, 1970 – 96 с.
11. Булатов, А.И. Коррозия тампонажного камня / А.И. Булатов, Ш.М. Рахимбаев, Л.И. Рябова. – Краснодар: СКО НА РФ, 1993. – 380 с.
12. Рахимбаев, И.Ш. Термодинамический анализ реакций образования этtringита с применением цикла Борна–Габера / И.Ш. Рахимбаев, Н.М. Толыпина // Цемент и его применение. – 2016. – № 2. – С.86–87.
13. Рахимбаев, Ш.М. К вопросу о механизме сульфоалюминатной коррозии цемента / Ш.М. Рахимбаев // Неорганические материалы: Изв. АН. – 1969. – № 5. – С. 34–35.
14. Бабушкин, В.И. Термодинамика силикатов / В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев, О.П. Мчедлов-Петросян. – М.: Стройиздат, 1986. – 408 с.
15. Румянцев, П.Ф. Гидратация алюминатов кальция / П.Ф. Румянцев, В.С. Хотимченко, В.М. Никущенко. – Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1974. – 80 с.

### References

1. Moskvin, V.M. Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection / V.M. Moskvin, F.M. Ivanov, S.N. Alekseev, E.A. Guzeev. – M.: Stroyizdat, 1980. – 535 p.

2. Rakhimbaev, Sh.M. Improving the corrosion resistance of concrete by rational selection of binder and aggregates: monograph / Sh.M. Rakhimbaev, N.M. Tolypina. – Belgorod: BSTU publishing house. 2015. – 250 p.
3. Khakhaleva, E.N. Improving corrosion resistance of concrete structures of industrial enterprises: monograph / E.N. Khakhaleva, Sh.M. Rakhimbaev, N.M. Tolypina. – Belgorod: Publishing house of BSTU. 2016. – 84 p.
4. Less, S.T. Resistance of concrete in salt solutions exposure to extreme intensity / S.T. Less, H.Y. Moon, R.N. Swamy // *Cem. And Concr. Compos.* – 2005. – №1. – P 65–76.
5. Irassar, E.F. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler / E.F. Irassar // *Cem. And Concr. Res.* – 2009. – 39. – № 3. – P.241–254.
6. Stark, D. Longtaim study of concrete durability in sulfate soils / D. Stark // *Geogre Verbeck Symposium on Sulfate Resistance of Concrete.* – 1982. – ACI PS – 77.
7. Babushkin, V.I. Physical and chemical processes of corrosion of concrete and reinforced concrete / V.I. Babushkin. – M.: Sroyizdat, 1968. – 192 p.
8. Babkov, V.V. Aspects of durability of a cement stone / V.V. Babkov, A.F. Polak, G.P. Komolov // *Cement.* – 1988. – № 3. – P. 14–16.
9. Mullauer, V. Mechanisms of the effects of sulfates on concrete: factors of chemical and physical stability / V. Mullauer, R.E. Beddoe, D. Heinz // *Cement and its applications.* – 2013. – № 9–10. – P. 34–43.
10. Bulatov, A.I. Corrosion of well cements / A.I. Bulatov, Sh.M. Rakhimbaev, D.F. Novokhatsky. – Tashkent: Uzbekistan publishing house, 1970. – 96 p.
11. Bulatov, A.I. Corrosion of the cement stone / A.I. Bulatov, Sh.M. Rakhimbaev, L.I. Ryabova. – Krasnodar: SKO ON the Russian Federation, 1993. – 380 p.
12. Rakhimbaev, I.Sh. Thermodynamic analysis of reactions of formation of ettringite with the use of Born – Haber cycle / I.Sh. Rakhimbaev, N.M. Tolypina // *Cement and its application.* – 2016. – № 2. – P. 86–87.
13. Rakhimbaev, Sh.M. To the question about the mechanism of corrosion sulfo-aluminate cement / Sh.M. Rakhimbaev // *Inorganic materials News AS.* – 1969. – № 5. – P. 34–35.
14. Babushkin, V.I. Thermodynamics of silicates / V.I. Babushkin, G.M. Matveev, O.P. Mchedlov-Petrosyan. –M.: Sroyizdat, 1986. – 408 p.
15. Rummyantsev, P.F. Hydration of aluminates of calcium / P.F. Rummyantsev, V.S. Khotimchenko, V.M. Nikishenko. – Leningrad : Nauka Leningrad. otd., 1974. – 80 p.

УДК 691

*Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарева*  
Россия, 430000, г. Саранск,  
ул. Советская, д. 24  
тел.: (8342) 47-71-56

**Леснов Виталий Викторович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Строительные материалы  
и технологии»  
E-mail: VVL377@rambler.ru

**Ерофеев Владимир Трофимович**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Строительные материалы  
и технологии»  
E-mail al\_rodin@mail.ru

*Мордовский государственный университет  
имени Н.П. Огарева*  
Россия, 430000, г. Саранск,  
ул. Богдана Хмельницкого, 39,  
тел. (8342) 29-06-02

**Афонин Виктор Васильевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры автоматизированных систем  
обработки информации и управления  
института электроники и светотехники  
E-mail: afoninvv@fet.mrsu.ru

*Mordovian State University  
named after N.P. Ogarev*  
Russia, 430000, Saransk,  
24, Sovetskaya St.,  
tel.: (8342) 47-71-56

**Lesnov Vitaliy Victorovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Building materials and  
technology»  
E-mail: VVL377@rambler.ru

**Yerofeev Vladimir Trofymovich**,  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Building materials  
and technology»  
E-mail al\_rodin@mail.ru

*Mordovian State University  
named after N.P. Ogarev*  
Russia, 430000, Saransk,  
39, Bogdan Khmel'nitsky St.,  
tel.: (8342) 29-06-02

**Afonin Viktor Vasilevich**,  
Candidate of the Sciences, Assistant Professor  
of the department automated information  
processing and control systems, Institute of  
electronics and lighting engineering  
E-mail: afoninvv@fet.mrsu.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ НАПОЛНЕННЫХ ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ МАТРИЦ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ КАРКАСНЫХ КОМПОЗИТОВ

В.В. Леснов, В.В. Афонин, В.Т. Ерофеев

Изучено влияние содержания суперпластификатора, В/Т, наполнителя, и его удельной поверхности на прочность цементных матриц, предназначенных для каркасных композитов. Получены эффективные матрицы с широким диапазоном прочностных свойств, рассчитаны их математические модели, методом последовательного квадратичного программирования проведен поиск экстремумов моделей.

*Ключевые слова: каркасный композит, матрица, наполнитель, суперпластификатор, прочностные свойства, математическая модель*

## STUDY OF STRENGTH PROPERTIES OF THE FILLED PLASTICIZED CEMENT MATRICES INTENDED FOR carcass COMPOSITES

V.V. Lesnov, V.V. Afonin, V.T. Erofeev

The influence of the content of superplasticizer, W/S, filler and its specific surface area on the strength of cement matrices intended for carcass composites was studied. Effective matrices with a wide range of strength properties are obtained, their mathematical models are calculated, the method of sequential quadratic programming is used to search for model extremums.

*Keywords: carcass composite, matrix, filler, superplasticizer, strength properties, mathematical model*

Прочностные свойства каркасных композитов определяются во многом свойствами матрицы, которой пропитывают пустоты предварительно изготовленного каркаса [1–3]. Пропиточной матрице необходимо качественно заполнить пустоты каркаса, так как только при этом возникает плотная, низкодефектная структура композита и достигаются высокие физико-механические свойства каркасных бетонов. Поэтому для снижения вязкости пропиточных матриц необходимо вводить в их состав высокоэффективные супер- или гиперпластифицирующие добавки [4], а для улучшения процессов структурообразования и повышения экономической эффективности – наполнители [5].

Исходя из этих предпосылок, были проведены исследования по получению и исследованию наполненных пластифицированных матриц на основе портландцемента. Для определения оптимального соотношения между цементом и пластифицирующей добавкой использовался метод математического планирования эксперимента. В качестве варьируемых факторов были выбраны: содержание портландцемента и наполнителя в матрице (ПЦ/Н) –  $X_1$ , водотвердое отношение (В/Т) –  $X_2$ , количество суперпластификатора (СП) в матрице –  $X_3$ . При изготовлении матриц в качестве связующего использовали портландцемент марки ЦЕМ-I 42,5Н (ОАО «Мордовцемент»), наполнителя – порошки, полученные путем помола высокопрочного доломитизированного известнякового щебня марки 1200 (ООО «Биянковский щебеночный завод», Челябинская обл., г. Миньяр) с удельной поверхностью 0,3 и 0,5 м<sup>2</sup>/г, суперпластифицирующей добавки – СП марки «Melflux 1641F». Значения изменяемых факторов эксперимента были предварительно подобраны по проходимости пропиточных матриц через зерна каркаса, представляющие собой насыпку высотой 70–75 мм, изготовленную из зерен доломитизированного известнякового щебня крупностью 5–10 мм. Матрица планирования эксперимента и содержание составляющих компонентов пропиточных матриц приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Матрица планирования эксперимента

Кодированные значения факторов			Натуральные значения факторов		
$X_1$ (ПЦ/Н)	$X_2$ (В/Т)	$X_3$ (СП)	$X_1$ (ПЦ/Н, мас.ч.)	$X_2$ (В/Т)	$X_3$ (СП, %)
1	2	3	4	5	6
-1	+1	-1	30/70	0,275	0,5
-1	0,333	-1	30/70	0,25	0,5
-1	-0,333	-1	30/70	0,225	0,5
-1	-1	-1	30/70	0,2	0,5
-1	+1	0	30/70	0,275	1,0
-1	0,333	0	30/70	0,25	1,0
-1	-0,333	0	30/70	0,225	1,0
-1	-1	0	30/70	0,2	1,0
-1	+1	+1	30/70	0,275	1,5
-1	0,333	+1	30/70	0,25	1,5
-1	-0,333	+1	30/70	0,225	1,5
-1	-1	+1	30/70	0,2	1,5
0	+1	-1	40/60	0,275	0,5
0	0,333	-1	40/60	0,25	0,5
0	-0,333	-1	40/60	0,225	0,5
0	-1	-1	40/60	0,2	0,5
0	+1	0	40/60	0,275	1,0
0	0,333	0	40/60	0,25	1,0
0	-0,333	0	40/60	0,225	1,0
0	-1	0	40/60	0,2	1,0
0	+1	+1	40/60	0,275	1,5
0	0,333	+1	40/60	0,25	1,5

1	2	3	4	5	6
0	-0,333	+1	40/60	0,225	1,5
0	-1	+1	40/60	0,2	1,5
+1	+1	-1	50/50	0,275	0,5
+1	0,333	-1	50/50	0,25	0,5
+1	-0,333	-1	50/50	0,225	0,5
+1	-1	-1	50/50	0,2	0,5
+1	+1	0	50/50	0,275	1,0
+1	0,333	0	50/50	0,25	1,0
+1	-0,333	0	50/50	0,225	1,0
+1	-1	0	50/50	0,2	1,0
+1	+1	+1	50/50	0,275	1,5
+1	0,333	+1	50/50	0,25	1,5
+1	-0,333	+1	50/50	0,225	1,5
+1	-1	+1	50/50	0,2	1,5

Порядок приготовления матриц включал следующие операции: сушку наполнителя, дозирование составляющих и их перемешивание. Портландцемент предварительно перемешивался всухую с суперпластификатором и наполнителем в течение 30 с, затем добавляли воду и перемешивали миксером в течение 120 с. Уплотнение смеси производили на встряхивающем столике 30 ударами с частотой 1 удар в секунду. Образцы твердели одни сутки в формах на воздухе, после чего их подвергали тепловлажностной обработке в пропарочной камере по следующему режиму: подъем температуры до 90 °С – 2 ч, изотермическое выдерживание – 6 ч и естественное остывание до 20 °С. Испытания проводились на образцах-призмах размером 20×20×70 мм. Исследуемыми параметрами пропиточных матриц являлись пределы прочности на сжатие и растяжение при изгибе.

После проведения регрессионного анализа и статистической обработки результатов эксперимента были получены уравнения полиномиальных моделей прочностных характеристик пропиточных матриц (1) – (4):

$$R_{b, 0,3} = 43,22 + 6,42X_1 - 8,94X_2 - 6,84X_3 - 1,09X_1X_2 + 1,03X_1X_3 - 0,73X_1^2 + 3,10X_2^2, \quad (1)$$

$$R_{b, 0,5} = 50,11 + 7,25X_1 - 7,95X_2 - 3,72X_3 - 0,97X_1X_3 - 0,85X_1^2 + 3,26X_2^2, \quad (2)$$

$$R_{bi, 0,3} = 12,20 + 1,62X_1 - 2,00X_2 - 1,87X_3 - 0,36X_1X_2 - 0,51X_1X_3, \quad (3)$$

$$R_{bi, 0,5} = 13,80 + 1,41X_1 - 2,04X_2 - 1,95X_3 - 0,54X_1X_2 - 0,63X_1X_3, \quad (4)$$

где  $R_{b, 0,3}$ ,  $R_{b, 0,5}$  и  $R_{bi, 0,3}$ ,  $R_{bi, 0,5}$  – пределы прочности при сжатии и изгибе пластифицированных цементных пропиточных матриц (МПа), наполненных порошком из доломитизированного известняка с удельной поверхностью, равной 0,3 и 0,5 м<sup>2</sup>/г соответственно.

На основе полученных математических моделей были построены графики изменения предела прочности при сжатии и изгибе пропиточных цементных матриц в зависимости от степени наполнения, содержания СП, водотвердого отношения и удельной поверхности наполнителя, которые показаны на рис. 1–6.

Полученные уравнения полиномиальных моделей (уравнения регрессии) можно интерпретировать как целевые функции трех переменных. Соответственно, можно рассмотреть задачу оптимизации (максимизации или минимизации) прочностных характеристик пропиточных матриц. Несмотря на имеющиеся графики, из которых можно найти минимальные и максимальные значения исследуемых зависимостей, в результате решения задачи нелинейного программирования уточняем экстремальные (максимальные и минимальные) значения прочности цементных матриц.

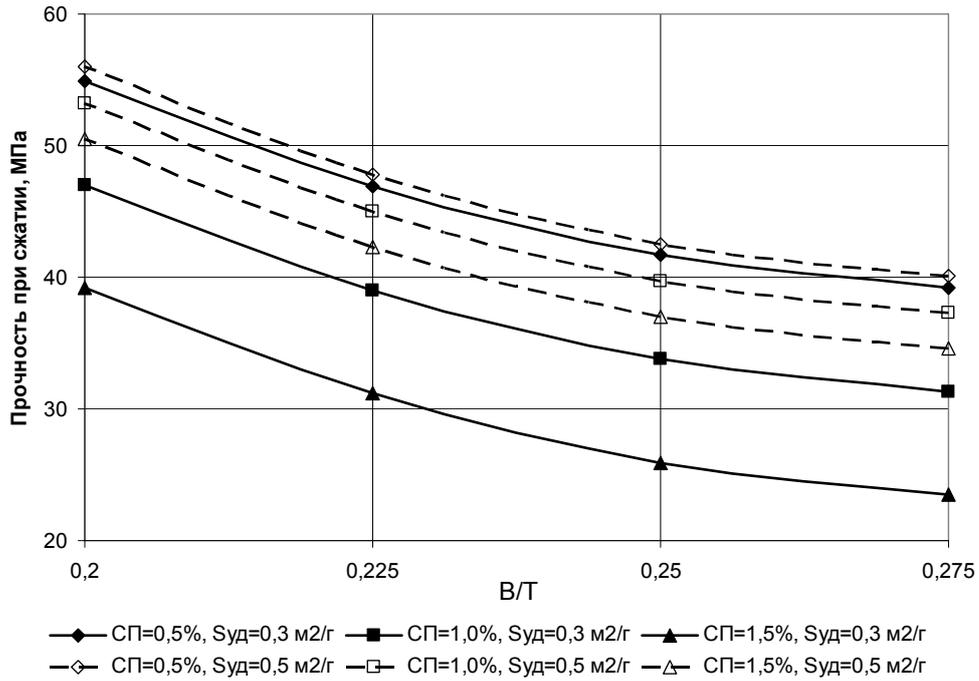


Рис. 1. Изменение предела прочности при сжатии пропиточных матриц при отношении ПЦ/Н = 30/70

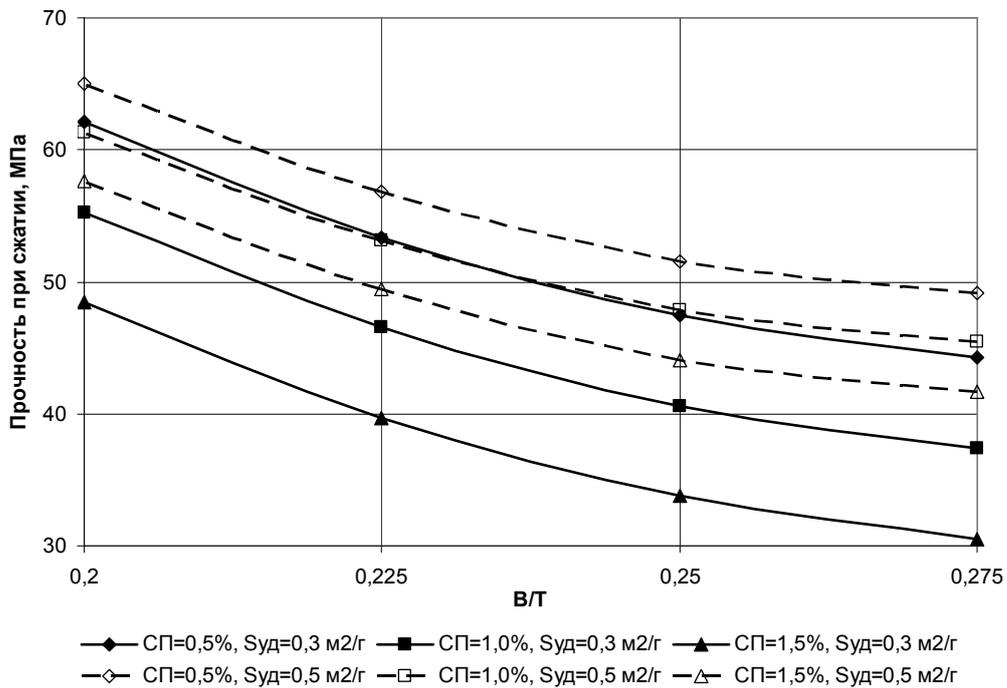


Рис. 2. Изменение предела прочности при сжатии пропиточных матриц при отношении ПЦ/Н = 40/60

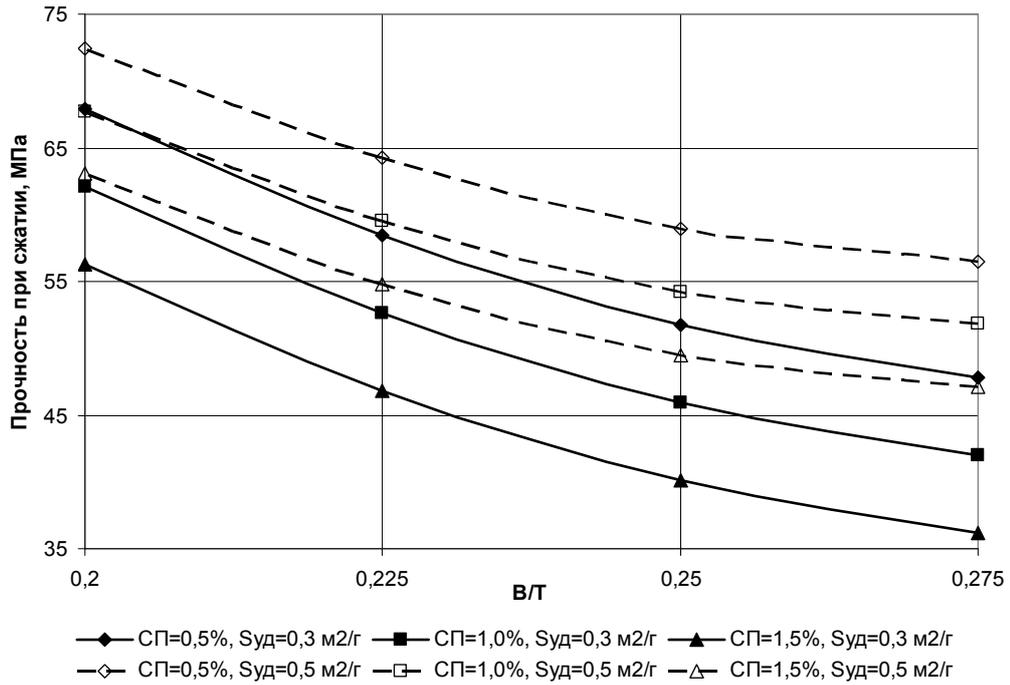


Рис. 3. Изменение предела прочности при сжатии пропиточных матриц при отношении ПЦ/Н = 50/50

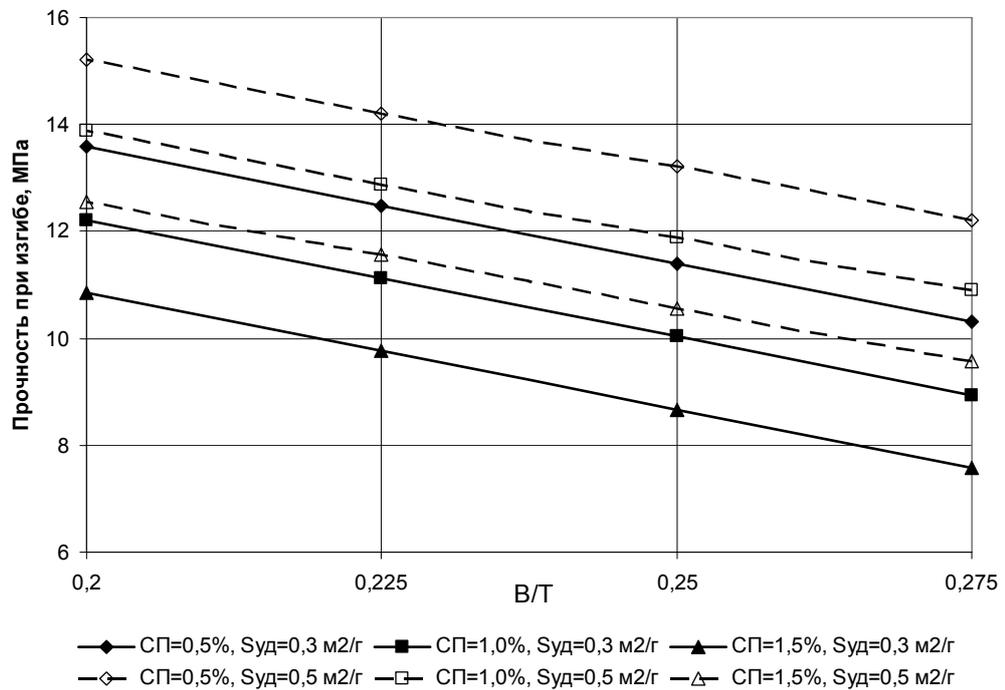


Рис. 4. Изменение предела прочности при изгибе пропиточных матриц при отношении ПЦ/Н = 30/70

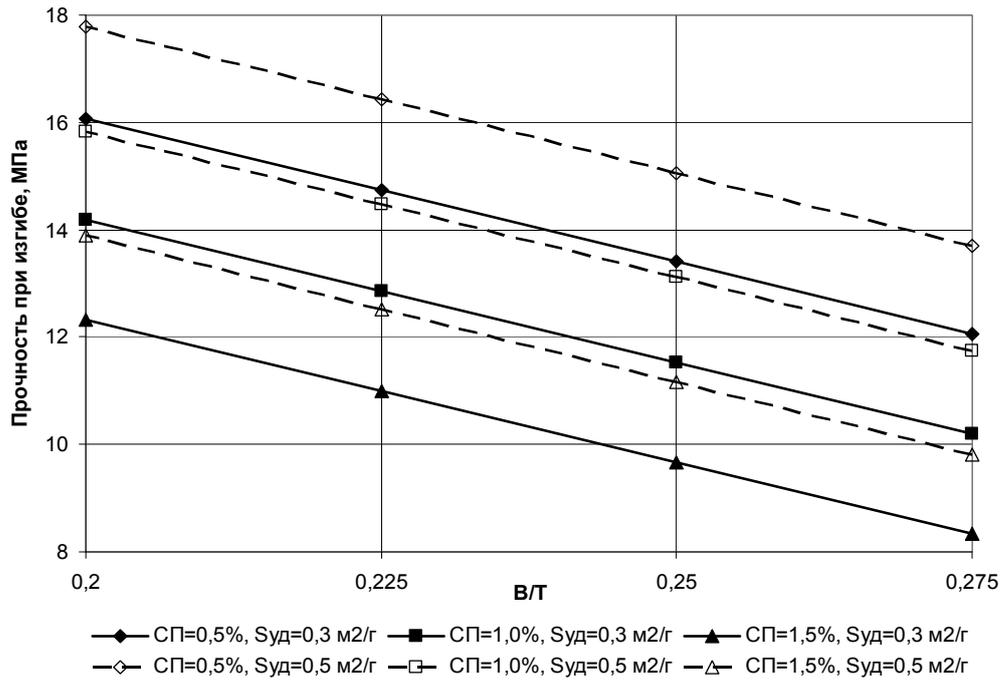


Рис. 5. Изменение предела прочности при изгибе пропиточных матриц при отношении ПЦ/Н = 40/60

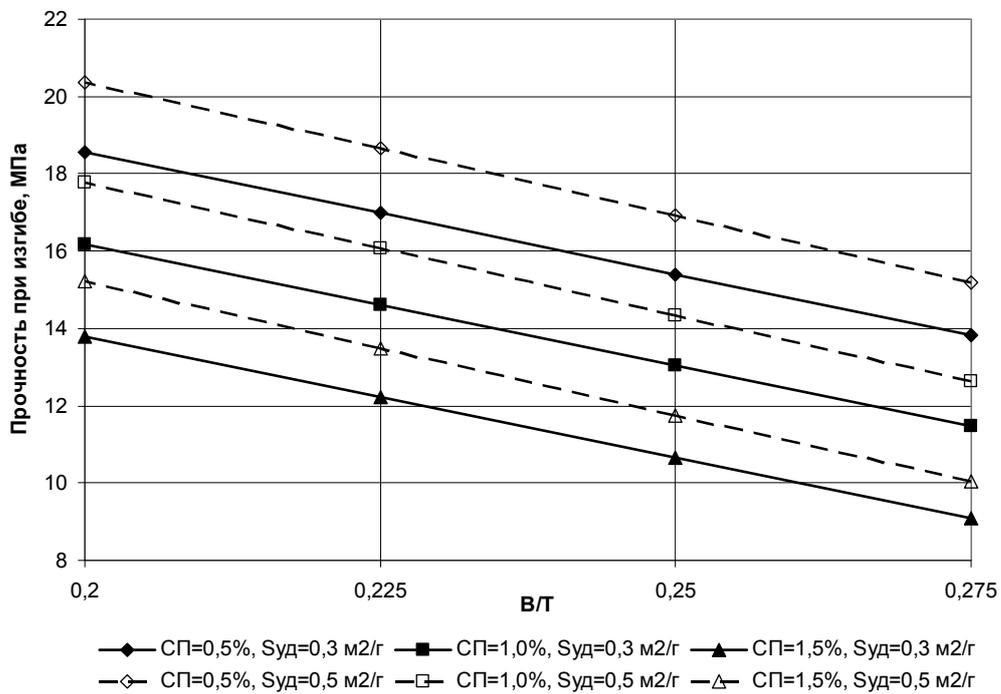


Рис. 6. Изменение предела прочности при изгибе пропиточных матриц при отношении ПЦ/Н = 50/50

Обозначим в виде  $f(X)$  левую часть каждого из уравнений регрессии. Тогда формализация задачи оптимизации будет заключаться в следующем:

$$f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min/\max f(X);$$

$$x_i \in [X_{i\min}; X_{i\max}], i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $n$  – в общем случае количество факторов.

Ограничения  $X_{i\min}$ ,  $X_{i\max}$  на изменения аргументов целевой функции видны из табл. 1. Приведенные выше рис. 1–6 показывают, что графики описываются выпуклыми функциями. Условие выпуклости можно проверить с построением матрицы Гессе и затем убедиться по критерию Сильвестра, что гессиан будет не положительно определенной матрицей для всех четырех целевых функций, которые выражаются уравнениями (1)–(4). В связи с этим можно применить метод оптимизации, который основан на алгоритме последовательного квадратичного программирования – SQP (Sequential Quadratic Programming) и относится к наиболее эффективным оптимизационным методам общего назначения. Поэтому при выборе метода решения той или иной прикладной задачи оптимизации, не обладающей какой-то специальной структурой, часто применяют методы именно этого типа [6, 7].

Расчет оптимизируемых параметров с использованием SQP-метода был произведен в пакете прикладных программ MATLAB на основе библиотечной функции `fmincon`, которая используется для минимизации функций с несколькими переменными и с ограничениями. Схема алгоритма оптимизации приведена на рис. 7.

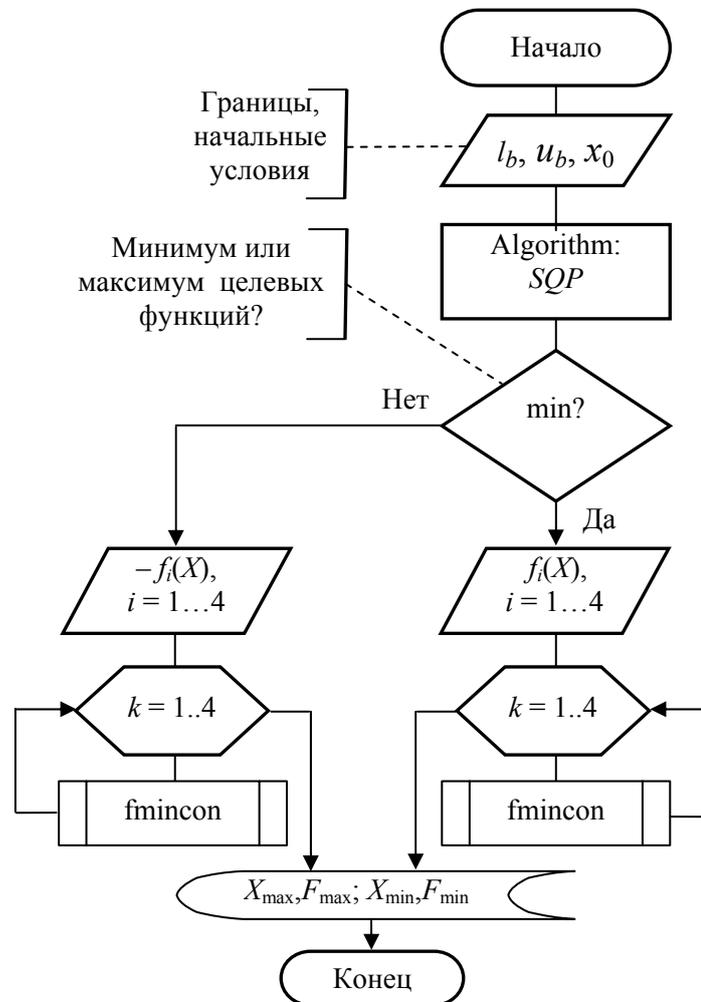


Рис. 7. Схема алгоритма оптимизации

Результаты вычисления минимальных и максимальных значений пределов прочности при сжатии и изгибе представлены в табл. 2.

## Результаты оптимизации полиномиальных моделей при сжатии и изгибе

Удельная поверхность наполнителя матрицы, м <sup>2</sup> /г	Экстремальные значения прочностных характеристик матриц			
	$R_{b,max}$ , МПа	$R_{b,min}$ , МПа	$R_{bi,max}$ , МПа	$R_{bi,min}$ , МПа
0,3	68,8	23,5	18,6	7,6
0,5	72,4	34,5	19,1	8,3

П р и м е ч а н и е .  $R_{b,max}$ ,  $R_{bi,max}$  и  $R_{b,min}$ ,  $R_{bi,min}$  – максимальные и минимальные пределы прочности при сжатии и изгибе наполненных пропиточных матриц.

На основании полученных экспериментальных данных и математических моделей можно сделать следующие выводы:

1. Выбранные диапазоны изменения факторов (ПЦ/Н, В/Т, количество СП) позволяют изготавливать пропиточные цементные матрицы с широкими диапазонами значений прочностных характеристик. Так, прочность матриц при сжатии изменялась в пределах 23,5...68,8 МПа и 34,5...72,4 МПа, а прочность при изгибе – 7,6...18,6 МПа и 8,3...19,1 МПа при введении наполнителя с удельной поверхностью, равной 0,3 и 0,5 м<sup>2</sup>/г соответственно.

2. Увеличение количества СП «Melflux 1641F», водотвердого отношения и содержания наполнителя в составе матриц приводит к понижению прочности при сжатии и изгибе для выбранных условий ускоренного твердения композиций. При повышении удельной поверхности наполнителя, полученного из доломитизированного щебня, возрастают прочностные характеристики пропиточных матриц.

3. Рассмотрены задачи оптимизации прочностных характеристик пропиточных матриц с использованием метода последовательного квадратичного программирования (SQP-метод), получены максимальные и минимальные значения пределов прочности при сжатии и изгибе наполненных пропиточных матриц.

4. Полученные эффективные составы высоконаполненных пластифицированных матриц могут применяться в дальнейшем для изготовления каркасных композитов и материалов на их основе с широким спектром заданных прочностных свойств.

## Список литературы

1. Ерофеев, В.Т. Каркасные строительные композиты : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.Т. Ерофеев. – М., 1993. – 52 с.
2. Леснов, В.В. Дисперсно-армированные каркасные бетоны / В.В. Леснов, В.Т. Ерофеев, М.А. Асташов // Известия ОрелГТУ. Сер. Стр-во. Трансп. – 2008. – №4/20 (551). – С. 70–74.
3. Ерофеев, В.Т. Армированные каркасные композиты для зданий и сооружений / В.Т. Ерофеев, В.И. Римшин, В.Ф. Смирнов [и др.]. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2015. – 360 с.
4. Леснов, В.В. Исследование влияния различных видов дисперсной арматуры и суперпластифицирующих добавок на прочностные свойства каркасных композитов / В.В. Леснов, В.Т. Ерофеев // Русский инженер. – 2017. – №3(56). – С. 46–48.
5. Дворкин, Л.И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями: монография / Л.И. Дворкин, В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, С.М. Чудновский. – Киев: Будивельник, 1991. – 136 с.
6. Измаилов, А.Ф. Численные методы оптимизации / А.Ф. Измаилов, М.В. Солодов. – М.: Физматлит, 2005. – 304 с.
7. Белов, И.К. Применение нелинейного программирования для решения задачи оптимизации состава смесового хладагента в криогенных циклах / И.К. Белов, А.Н. Паркин // Двенадцатая Международная научно-практическая конференция «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития», Международная конференция «Промышленные газы», Международная конференция «Сжиженный

природный газ (СПГ)»: материалы конференций. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – С. 42–45.

### References

1. Erofeev, V.T. Carcass building composites: abstract of the thesis of doctor of technical Sciences / V.T. Erofeev. – M., 1993. – 52 p.
2. Lesnov, V.V. Fiber reinforced carcass concretes / V.V. Lesnov, V.T. Erofeev, M.A. Astashov // *Izvestiya OrelGTU. Ser. «Build. Transp.»*. – 2008. – №4/20 (551). – P. 70–74.
3. Erofeev, V.T. Reinforced carcass composites for buildings and structures / V.T. Erofeev, V.I. Rimshin, V.F. Smirnov [et al.]. – Saransk: Mordovia State University Publishing House, 2015. – 360 p.
4. Lesnov, V.V. Study of the influence of different types of fibres and superplasticizing additives on the strength properties of carcass composites / V.V. Lesnov, V.T. Erofeev // *Russian engineer*. – 2017. – №3(56). – P. 46–48.
5. Dvorkin, L.I. Cement concretes with mineral fillers: monography / L.I. Dvorkin, V.I. Solomatov, V.N. Vyrovoy, S.M. Chudnovskij. – Kiev: Budivelnik, 1991. – 136 p.
6. Izmailov, A.F. Numerical optimization methods / A.F. Izmailov, M.V. Solodov. – M.: Fizmatlit, 2005. – 304 p.
7. Belov, I.K. Application of nonlinear programming to solve the problem of optimization of mixed refrigerant composition in cryogenic cycles / I.K. Belov, A.N. Parkin // The twelfth international scientific and practical conference «Cryogenic technologies and equipment. Development prospects», international conference «Industrial gases», international conference «Liquefied natural gas (LNG)»: materials of conference. – M.: BMSTU Publishing House, 2016. – P. 42–45.

УДК 666.3.016

*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, профессор  
кафедры «Технологии строительных  
материалов и деревообработки»  
E-mail: vabereg@rambler.ru**Снадин Евгений Валерьевич**,  
аспирант  
E-mail: techbeton@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, Professor 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

## УЛУЧШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕНОКЕРАМИЧЕСКОГО СЫРЦА

В.А. Береговой, Е. В. Снадин

Исследовано влияние вибрационного воздействия на прочность пенокерамического сырца, вырабатываемого на основе химически модифицированных природных силицитов. Установлены частоты собственных колебаний минеральных частиц с учетом их размеров, плотности и предельного напряжения сдвига сырьевых суспензий. Показано, что совпадение частот собственных и вынужденных колебаний частиц приводит к усилению тиксотропного эффекта.

*Ключевые слова: пенокерамика, сырьевые суспензии, структурно-механическая компонента, природный силицит*

## IMPROVEMENT OF STRENGTH PARAMETERS OF RAW FOAM CERAMIC

V.A. Beregovoi, E.V. Snadin

The influence of vibration impact on the strength of foam-ceramic raw material produced on the basis of chemically modified natural silicites is studied. The frequencies of natural oscillations of mineral particles taking into account their size, density and ultimate shear stress of raw suspensions are determined. It is shown that the coincidence of the natural and forced vibration frequencies of the particles leads to an increase of the thixotropic effect.

*Keywords: foam ceramics, raw suspensions, structural and mechanical component, natural silicites*

Поризованная керамика входит в число наиболее перспективных и востребованных стеновых строительных материалов. В России производство пористой керамики проходит этап становления: количество заводов, имеющих технологические возможности по выпуску такого вида керамики, не превышает 10 единиц, а ее доля в общем объеме стеновых керамических материалов составляет 7...8 %.

Применение альтернативных сырьевых ресурсов, таких как природные силициты, в производстве конструкционно-теплоизоляционных видов керамических изделий может придать существенный импульс процессу внедрения поризованной керамики в строительство.

В более ранних работах, проведенных авторами, была экспериментально доказана возможность применения силицитового сырья для получения высокопористой керамики [1, 2]. Дальнейшее улучшение качества керамического черепка, составляющего основу материала межпоровых перегородок, а также параметров макроструктуры,

может быть достигнуто за счет оптимизации процесса вспучивания сырьевой массы. С этой целью в ходе исследования был применен способ, основанный на управлении переходом «золь $\leftrightarrow$ гель» структурированной системы.

Согласно работе [3] «псевдоразжижению» бетонной смеси способствуют резонансные явления, обусловленные совпадением частот собственных колебаний минеральных частиц суспензии ( $\omega_c$ ) с частотой вынужденных колебаний, передаваемых системе от внешнего источника.

Рассматривая сырьевую суспензию как структурно-механическую систему, частоту собственных колебаний силицитовых частиц в водной фазе можно выразить

$$\omega_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (1)$$

где  $k$  – восстанавливающая сила, кгс;  $m$  – масса частицы, кг.

Зависимость величины  $k$  от предельного напряжения сдвига раствора ( $\tau$ , Па) и среднего расстояния между взаимодействующими частицами ( $l$ , м) имеет вид [3]

$$k = 0,5 \cdot \tau \cdot l. \quad (2)$$

Выражая параметр  $l$  через водотвердое отношение сырьевой смеси (В/Т), имеем

$$l = \left(\frac{B}{T}\right) \cdot \frac{1}{S \cdot \rho_B}, \quad (3)$$

где  $S$  – удельная площадь поверхности частиц, м<sup>2</sup>/кг;  $\rho_B$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

Для удобства выполнения расчетов массу частицы, участвующей в резонансном разрушении первичной структуры, выразим с использованием аналогичных параметров ( $S$  и  $\rho$ ):

$$m = \frac{36 \cdot \pi}{S^3 \cdot \rho^2}, \quad (4)$$

$$\omega_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{0,5 \cdot \tau \cdot \left(\frac{B}{T}\right) \cdot S^3 \cdot \rho^2}{36 \cdot \pi \cdot S \cdot \rho_B}} = 0,0106 S \cdot \sqrt{\tau \cdot \left(\frac{B}{T}\right) \cdot d \cdot \rho}, \quad (5)$$

где  $d$  – относительная плотность частиц минеральной фазы ( $d = \frac{\rho}{\rho_B}$ ).

Расчеты, произведенные по уравнению (5), дают завышенные результаты параметра  $\omega_c$  для исследуемых минеральных систем. С целью корректировки расчета необходимо уточнить среднее расстояние между взаимодействующими частицами. По аналогии с теоретическими представлениями о формировании и свойствах связанной воды вокруг частиц сферической формы примем допущение, что в процессе вибрационного воздействия передача напряжений осуществляется при минимальной толщине  $l$  гидратной пленки, соответствующей условиям коагуляционного контакта [4].

При сближении частиц происходит взаимное проникновение пленок воды на контакте частиц, что сопровождается возникновением сил, обусловленных структурно-механическими свойствами адсорбционных пленок. Согласно [4] структурная компонента расклинивающего давления наблюдается при толщине пленок  $\sim 10$  нм, тогда уравнение (1) принимает вид

$$\omega_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} = 0,0106 \cdot \rho \cdot \sqrt{\tau \cdot l \cdot S^3}. \quad (6)$$

Расчетные кривые частот собственных колебаний силицитовых частиц (кремнистые опоки) приведены на рис. 1.

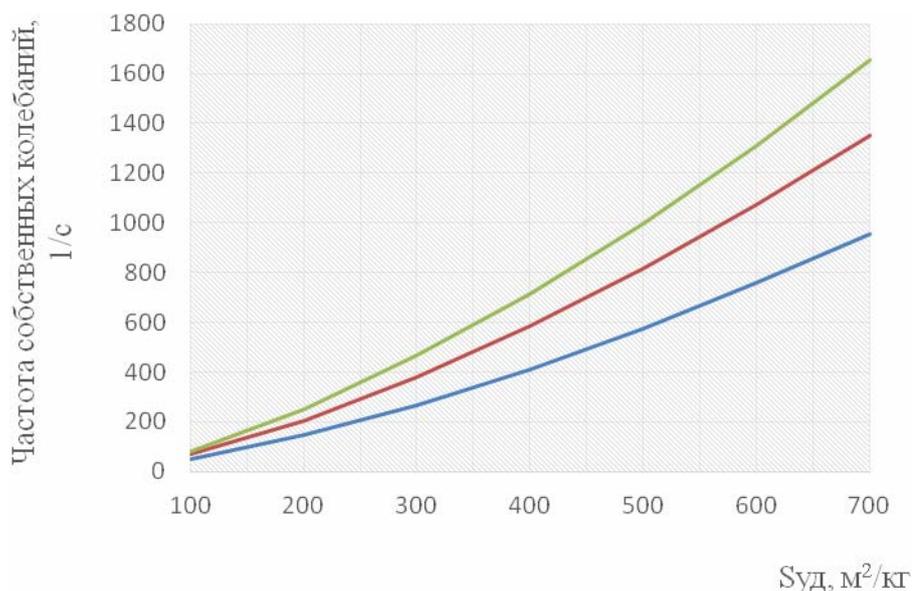


Рис. 1. Влияние удельной поверхности на частоту собственных колебаний частиц минеральной фазы силицитовой суспензии

Еще Ахвердовым Н.И. было показано, что мельчайшие фракции минеральной фазы стремятся к образованию агрегатов крупностью 25...30 мкм. В этом случае удельная поверхность агрегатов составит ~75...110 м²/кг, а величина  $\omega=45...50$  [с⁻¹] (при  $\tau=1000$  Па).

Для проверки расчетных данных был поставлен эксперимент, результаты которого приведены на рис. 2.

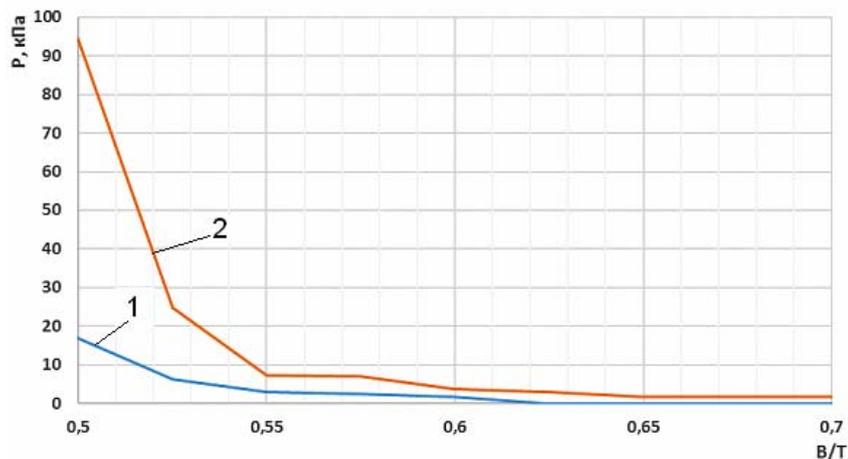


Рис. 2. Влияние В/Т-отношения на пластическую прочность суспензии: 1 – после вибрационного воздействия; 2 – без воздействия

При проведении исследования исходили из того, что на практике получение больших частот (250...350 с⁻¹) связано с усложнением вибрационного оборудования. В связи с этим частота колебаний варьировалась в диапазоне 25...50 с⁻¹ (другие параметры: амплитуда 3...5 мм, продолжительность 3 мин). Установлено, что воздействие вибрационной нагрузки приводит к снижению величины пластической прочности в 2...4 раза при изменении В/Т-отношения сырьевой массы в диапазоне 0,55...0,6 [5].

Процесс восстановления пластической прочности после вибрационного воздействия на исследуемые минеральные системы показан на рис. 3.

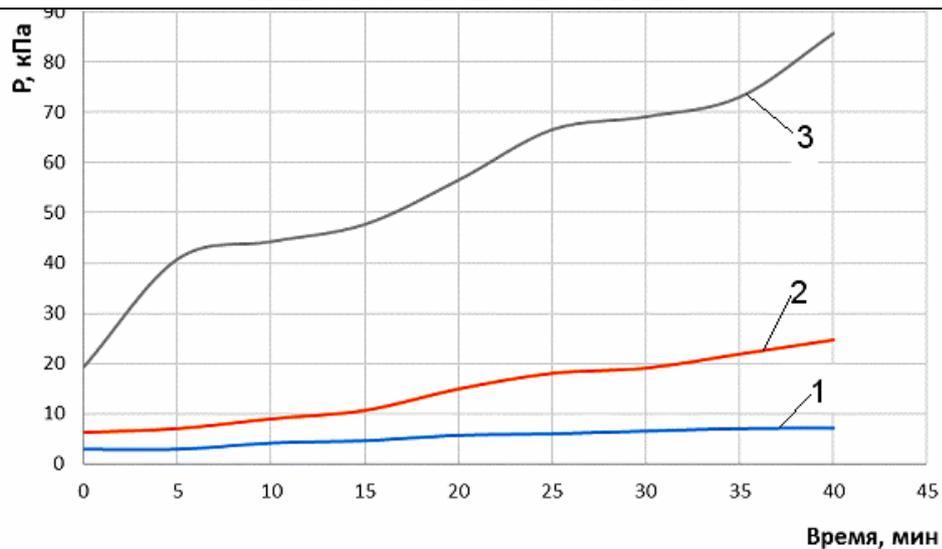


Рис. 3. Влияние В/Т-отношения сырьевой суспензии на кинетику нарастания пластической прочности:

1 – В/Т=0,55; 2 – В/Т=0,525; 3 – В/Т=0,5

Согласно полученным данным, равномерный набор пластической прочности наблюдается при В/Т-отношениях 0,525...0,55. С уменьшением содержания воды восстановление структуры предварительно разжиженной суспензии ускоряется.

С использованием технологии управляемого «золь↔гель» перехода в структуре сырца, вспучиваемого под воздействием вибрационной нагрузки, были получены образцы материала с более качественной макроструктурой без применения связующих веществ (рис. 4).



Рис. 4. Образцы ячеистого материала из природных силицитов: сырец (справа) и керамика (слева)

Показатели прочности на сжатие и средней плотности сырца, а также керамики приведены в таблице.

Прочность материалов на основе природных силицитовых масс

Наименование показателя	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>			
	0,40	0,55...0,6	0,7...0,8	1,0...1,1
Прочность на сжатие, МПа:				
– сырец	0,35	0,7...0,95	нд	нд
– керамика	1,6...1,8	3,5...4,5	7,5...8,0	10,0...10,5

**Выводы**

1. Показана необходимость учитывать склонность силицитовых частиц к агрегированию в водной фазе при оценке параметров вибрационного воздействия на сырьевые суспензии.
2. Оптимальные частоты вибрационного воздействия превышают  $250...300 \text{ с}^{-1}$  для случая изолированных и равномерно распределенных в объеме дисперсионной среды силицитовых частиц с удельной поверхностью более  $400 \text{ м}^2/\text{кг}$ .
3. Для суспензий на основе природных силицитов, размеры частиц которых обеспечивают процесс последующего обжига керамики, тиксотропное разжижение проявляется при соблюдении условия  $0,5 \leq V/T \leq 0,575$ .

## Список литературы

1. 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.
2. Береговой, В.А. Эффективные пенокерамобетоны общестроительного и специального назначения: дис.... д-ра техн. наук: 05.23.05 / В.А. Береговой. – Пенза: ПГУАС, 2012
3. Осипов, В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах / В.И. Осипов; ИГЭ РАН. – М.: ИФЗ РАН, 2012. – 74 с.
4. Береговой, В.А. Псевдоразжижение сырьевых масс в технологии ячеистой керамики на основе природных силицитов / В.А. Береговой, Г.А. Фокин, Е.В. Снадин // Региональная архитектура и строительство, – 2018. – № 2. – С. 26–31.

## References

1. 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.
2. Beregovoy, V.A Effective foam-ceramic-concretes for general and special purpose: the dissertation ... doctors of sciences: 05.23.05 / V.A Beregovoy. – Penza: PGUAS, 2012.
3. Osipov, V.I. Physico-chemical theory of effective stresses in soils / V.I. Osipov; IGE RAS. – M.: IPE RAS, 2012. – 74 p.
4. Beregovoy, V.A. Fluidization of raw materials in the technology of cellular ceramics based on natural silicites / V.A. Beregovoy, G.A. Fokin, E.V. Snadin // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 2. – P. 26–31.

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

**Мажитов Еркибулан Бисенгалиевич,**  
аспирант  
E-mail: mazhitov201090@gmail.com

**Скачков Юрий Петрович,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Строительные конструкции»,  
ректор  
E-mail: office@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

**Mazhitov Erhibulan Bisengalievich,**  
Postgraduate  
E-mail: mazhitov201090@gmail.com

**Skachkov Yuri Petrovich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Building structures», Rector  
E-mail: office@pguas.ru

## ГОРЮЧЕСТЬ ЗОЛЬ-СИЛИКАТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Е.Б. Мажитов, Ю.П. Скачков

Указаны свойства золь-силикатной краски на основе калиевого полисиликатного связующего. Показано, что структура покрытия на основе полисиликатного связующего характеризуется более равномерным распределением пор по размерам. Приведены значения проницаемости покрытия.

*Ключевые слова:* полисиликатное связующее, покрытия, горючесть

### FLAMMABILITY OF ZOL SILICATE COATINGS

Y.B. Mazhitov, Y.P. Skachkov

Information on the properties of silicate paints based on the potassium polysilicate binder is presented. It is shown that the structure of the coating based on the polysilicate binder is characterized by a more uniform pore size distribution. The values of the permeability of the coating are given.

*Keywords:* polysilicate binder, coatings, flammability

В последнее время в практике отделочных работ находят применение силикатные краски на основе полисиликатного связующего, имеющего силикатный модуль от 4 до 25 [1–4]. Нами были разработаны однокомпонентные окрасочные составы на основе золь-силикатного связующего с введением наполнителей и пигментов. В качестве наполнителя предложено применять смесь талька и микрокальцита. Была рассчитана критическая объемная концентрация пигмента (наполнителя), составляющая в зависимости от вида применяемого наполнителя 60,60–66,4 %. Вязкость красочных составов составляет 17–20 с по ВЗ-4, степень высыхания до степени 5 – 70–90 мин, адгезия к растворной подложке – 1 балл, смываемость – не более 2 г/м<sup>2</sup>. Краска образует покрытие, характеризующееся ровной однородной матовой поверхностью. Стойкость к статическому действию воды при температуре 20 °С составляет не менее 24 час. Было установлено, что покрытия на основе полисиликатных растворов характеризуются более быстрым отверждением. Для пленок на основе полисиликатных растворов характерно проявление масштабного фактора. С увеличением толщины полимерного покрытия с 0,1 до 0,3 мм относительная твердость снижается с 0,48 до 0,6 МПа. Анализ полученной зависимости относительной твердости покрытий от их толщины показывает, что относительная твердость с увеличением толщины полимерного покрытия уменьшается по линейному закону [5]. Линейный характер зависимости относительной твердости от толщины свидетельствует о хрупком разрушении пленок.

В продолжение дальнейших исследований была проведена оценка горючести покрытий. В соответствии с ГОСТ 12.1.044 все твердые вещества и материалы подразделяют на 3 группы горючести [6]:

– негоряемые (негорючие) – вещества и материалы, которые в условиях высоких температур не подвержены воспламенению, тлению или обугливанию;

– трудногоряемые (трудногорючие) – вещества и материалы, которые под воздействием высоких температур с трудом воспламеняются, тлеют и обугливаются, но только в присутствии огня. При удалении огня процессы горения, тления и обугливания прекращаются;

– сгораемые (горючие) – вещества и материалы, которые под воздействием огня или высокой температуры воспламеняются и горят или тлеют и после удаления источника огня.

Для выявления степени противодействия покрытий распространению огня вначале проводили испытания с помощью прибора «Огневая труба», при этом материал, не выдержавший испытаний на «Огневой трубе», относили к группе горючих. Если материал проходит испытания по этому методу, то для установления группы горючести его испытывают в более жестких условиях. Принадлежность материалов к группе «негорючих» определяют путем испытания в специальной печи трубчатого типа, а к группе «трудногорючих» – с помощью прибора ОТМ.

Были изготовлены образцы покрытий размером  $150 \times 35 \times 1,34$  мм. В верхней части на продольной оси образца просверливали отверстие для крепления образца при испытании. Высота пламени горелки составляла  $40 \pm 5$  мм, расстояние между нижним краем образца и верхней кромкой горелки 5 мм (рис. 1).

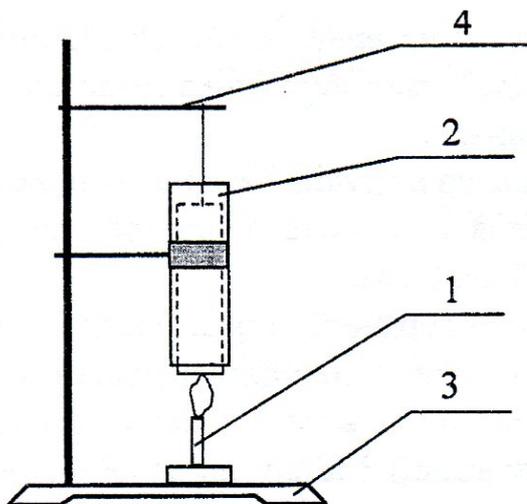


Рис. 1. Схема испытаний с помощью прибора «Огневая труба»:  
1 – горелка; 2 – тонкостенная трубка (длиной  $165 \pm 5$  мм и диаметром  $50 \pm 3$  мм);  
3 – штатив для крепления трубки; 4 – держатель образца

Образец взвешивали и помещали в испытательную установку. Для этого его подвешивали на крючке держателя 4 в центре трубы. Под образец подводили пламя горелки 1 и включали секундомер. В ходе испытаний определяли время зажигания, обеспечивающее устойчивое горение образца. Затем горелку удаляли и фиксировали время самостоятельного горения пламенем и тлением. Максимальное время зажигания образца пламенем горелки (время воздействия пламени) составляло 2 мин.

После испытаний образцы, остывшие до комнатной температуры, извлекали из прибора и взвешивали. Критериями оценки горючести материала по методу «Огневая труба» являлись потеря массы образца и время самостоятельного горения пламенем или тлением.

Потерю массы образца  $\Delta m$  рассчитывали по формуле

$$\Delta m = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $m$  – масса образца покрытия до испытания, г;  $m_1$  – масса образца покрытия после испытания, г.

Полученные экспериментальные данные приведены в таблице.

#### Результаты испытаний покрытий

Вид покрытия	Масса образца до испытания $m$ , г	Масса образца после испытания $m_1$ , г	Время самостоятельного горения образца $\tau_{\text{сам.гор}}$ , с		Потеря массы образца $\Delta m$ , %
			пламенем	тлением	
Силикатное на основе натриевого жидкого стекла	6,822	6,023	нет	0	11,71
Силикатное на основе натриевого полисиликатного раствора	10,416	9,948	нет	0	4,49
Силикатное на основе калиевого жидкого стекла	6,336	5,738	нет	0	10
Силикатное на основе калиевого полисиликатного раствора	13,677	13,230	нет	0	3,27

Примечание. Горения покрытия при максимальном времени воздействия пламени (2 мин) не произошло.

Установлено, что все исследуемые покрытия выдержали испытания по методу «Огневая труба» (рис. 2).

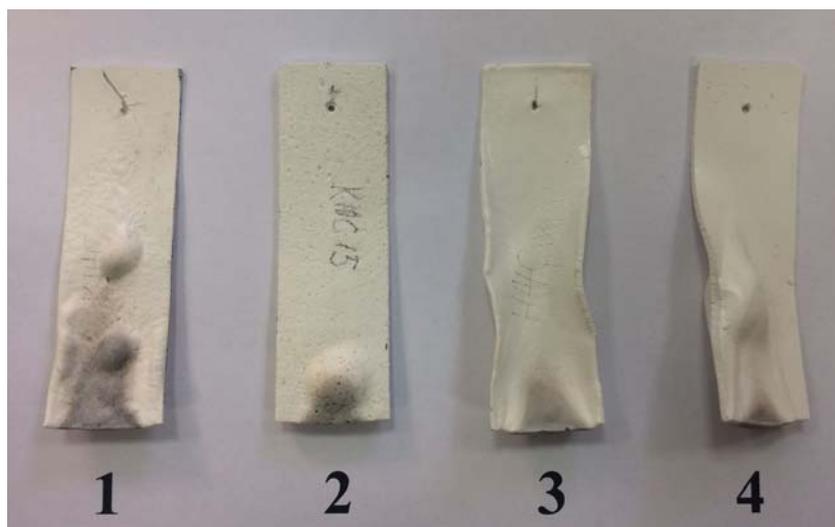


Рис. 2. Внешний вид образцов после испытаний на горючесть по методу «Огневая труба»:

1 – покрытие на основе калиевого жидкого стекла; 2 – покрытие на основе калиевого полисиликатного раствора; 3 – покрытие на основе натриевого жидкого стекла; 4 – покрытие на основе натриевого полисиликатного раствора

Для покрытий на основе полисиликатных растворов характерна меньшая потеря массы. Так, снижение массы покрытий на основе калиевого полисиликатного раствора составляет 3,27 %, а для покрытий на основе калиевого жидкого стекла – 10 %. Аналогичные закономерности характерны и для покрытий на основе натриевого жидкого стекла и натриевого полисиликатного раствора.

Таким образом, разработанный состав краски образует покрытия, которые относятся к группе несгораемых материалов.

#### Список литературы

1. Корнеев, В.И. Производство и применение растворимого стекла / В.И. Корнеев, В.В. Данилов. – Л.: Стройиздат, 1991. – 176 с.
2. Айлер, Р. Химия кремнезема: в 2 т. / Р. Айлер. – М.: Мир, 1982.
3. Получение и применение гидрозолей кремнезема: труды МХТИ им. Менделеева / под ред. проф. Ю.Г. Фролова. – М., 1979. – С. 37.
4. Фиговский, О.Л. Успехи применения нанотехнологий в строительных материалах / О.Л. Фиговский, Д.А. Бейлин, А.Н. Пономарев // Нанотехнологии в строительстве. – 2012. – №3. – С. 6–21.
5. Логанина, В.И. Разработка рецептуры золь-силикатной краски / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Е.Б. Мажитов // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3. – С.51–53.
6. ГОСТ 12.1.044-89. ССБТ Пожаровзрывоопасность веществ и материалов.

#### References

1. Korneev, V.I. Production and use of soluble glass / V.I. Korneev, V.V. Danilov. – L.: Stroizdat, 1991. – 176 p.
2. Eiler, R. Chemistry of silica: 2 vol. / R. Eiler. – M.: Mir, 1982.
3. Preparation and use of silica hydrosols: Proceedings of the Moscow Art Theater. Mendeleev / ed. Prof. Yu.G. Frolova. – M., 1979. – P. 37.
4. Figovsky, O.L. Success of nanotechnology application in Building materials / O.L. Figovsky, D.A. Beilin, A.N. Ponomarev // Nanotechnology in construction. – 2012. – No3. – P. 6–21.
5. Loganina, V.I. Development of the formulation of sol-silicate paint / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, Y.B. Mazhitov // Regional architecture and engineering. – 2017. – No3. – P.51–53.
6. GOST 12.1.044-89. Occupational safety standards system. Fire and explosion hazard of substances and materials.

УДК 691:620.19

*Белгородский государственный  
технологический университет  
им. В.Г. Шухова*

Россия, 308012, Белгород,  
ул. Костюкова, д. 46,  
тел.: (4722) 551662

**Матюхин Павел Владимирович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Теоретическая  
и прикладная химия»  
E-mail: mpvbgtu@mail.ru

**Павленко Вячеслав Иванович**,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Теоретическая  
и прикладная химия»

**Широков Алексей Владиславович**,  
магистрант кафедры «Теоретическая  
и прикладная химия»

*Belgorod State Technological University.  
named after V.G. Shukhov*

Russia, 308012, Belgorod,  
46, Kostyukov St.  
tel.: (4722) 551662

**Matyukhin Pavel Vladimirovich**,  
Candidate of Sciences,  
Associate Professor of the department  
«Theoretical and Applied Chemistry»  
E-mail: mpvbgtu@mail.ru

**Pavlenko Vyacheslav Ivanovich**,  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor of the department «Theoretical  
and Applied Chemistry»

**Shirokov Aleksey Vladislavovich**,  
undergraduate student of the department  
«Theoretical and Applied Chemistry»

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ ПРЕССОВАНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ГЕМАТИТА И ЕГО ПОВЕДЕНИЕ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

П.В. Матюхин, В.И. Павленко, А.В. Широков

Представлены результаты исследований по изучению структуры гематитового железорудного концентрата (гематита), подвергнутого воздействию высоких давлений прессования; результаты исследований влияния высоких давлений прессования на изменение фазового состава гематита и его поведения при высоких температурах.

*Ключевые слова: гематит, микроструктура, термический анализ, рентгенофазовый анализ, строительный, композиционный, материал, свойства*

## STUDY OF THE INFLUENCE OF HIGH PRESSURE COMPACTION ON THE CHANGE OF PHASE COMPOSITION OF HEMATITE AND ITS BEHAVIOR AT HIGH TEMPERATURES

P.V. Matyukhin, V.I. Pavlenko, A.V. Shirokov

The results of research on the structure of hematite iron-ore concentrate (hematite) exposed to high pressures are presented; the results of studies of high pressures effect on the change of the phase composition of hematite and its behavior at high temperatures are given.

*Keywords: hematite, microstructure, thermal analysis, X-ray phase analysis, construction, composite, material, properties*

### Введение

На сегодняшний день актуальным вопросом является разработка новых видов композиционных строительных материалов на основе органических и неорганических компонентов, которые обладают не только высокими физико-механическими характеристиками, но и радиационно-защитными свойствами. Такие материалы успешно будут использоваться при строительстве новых и реконструкции старых зданий и сооружений, в которых планируется применение либо применяются различные ядерно-энергетические установки [1–7]. Такие новые виды строительных композиционных

материалов, обладающие радиационно-защитными свойствами, могут использоваться не только в виде облицовочных материалов, но и в виде несущих конструкций, способных выдерживать значительные нагрузки, в том числе и при постоянном действии на них ионизирующего излучения различной природы [8–13].

Такие современные композиционные материалы представляют собой двух- и более компонентные системы, в основном состоящие из матриц и наполнителей. Матрицы могут иметь керамическую, бетонную, полимерную, металлическую и прочие основы, а наполнители могут быть органическими и неорганическими материалами. В зависимости от индивидуальных свойств матрицы и наполнителя заранее можно спрогнозировать и придать готовому композиту те уникальные свойства и параметры, которые заложены в его компонентах [14–3].

Одним из таких наполнителей, который может быть использован при разработке и получении таких новых строительных композитных материалов, является гематитовый железорудный концентрат. Такой наполнитель широко распространен в природе, что делает его довольно доступными, относительно дешевым компонентом для композитных материалов. Кроме того, он обладает высокими физико-механическими и радиационно-защитными свойствами.

Так как данный оксид железа будет являться наполнителем новых видов композиционных материалов (а его в составе материала может находиться до 70 %), в дальнейшей работе огромный интерес представляет изучение изменения его структуры, фазового состава после воздействия на него высоких давлений прессования до 20000 МПа и изучение его поведения при высоких температурах до 1000 °С. Это позволит сформировать представление о поведении наполнителя в объеме матрицы композиционных материалов, которые планируют разрабатывать и получать при таких же похожих высоких давлениях прессования, а также спрогнозировать поведение такого наполнителя при высоких температурах. Ведь изменение вышеперечисленных свойств наполнителя в процессе производства и эксплуатации композита напрямую влияет на конечные физико-механические и эксплуатационные характеристики разрабатываемого материала в целом.

### **1. Изменение микроструктуры частиц гематита, подвергнутого воздействию высоких давлений прессования**

Первоначальным этапом исследований было изучение структуры частиц гематита, подвергнутого воздействию давлений прессования до 20000 МПа. Для опытов был использован обогащенный гематит, минеральный состав которого представлена 99,7 % оксидами железа  $Fe_2O_3$  и  $Fe_3O_4$ .

На рис. 1 представлены микрофотографии структуры частиц образцов гематита, подвергнутого воздействию давлений прессования 10000 МПа и 20000 МПа, полученные с помощью зондовой электронной микроскопии.

Из представленных на рис. 1 микрофотографий можно сделать следующие выводы: изначально частицам гематита, не подвергавшегося каким-либо воздействиям давлений прессования, присуща неправильная форма с сильной агрегацией и шероховатыми гранями. При увеличении давления прессования до 10000 МПа прослеживается тенденция небольшой степени разрушения частиц гематита, агрегация их поверхности немного сглаживается, образуются небольшие микротрещины на его частицах.

При увеличении давления прессования до 20000 МПа наблюдается значительное увеличение степени разрушения поверхности частиц гематита в общей массе образцов материала, агрегация поверхности его частиц становится более гладкой, микротрещины на поверхностях частиц носят более глубокий характер, их распределение по частицам носит прогрессивных характер.

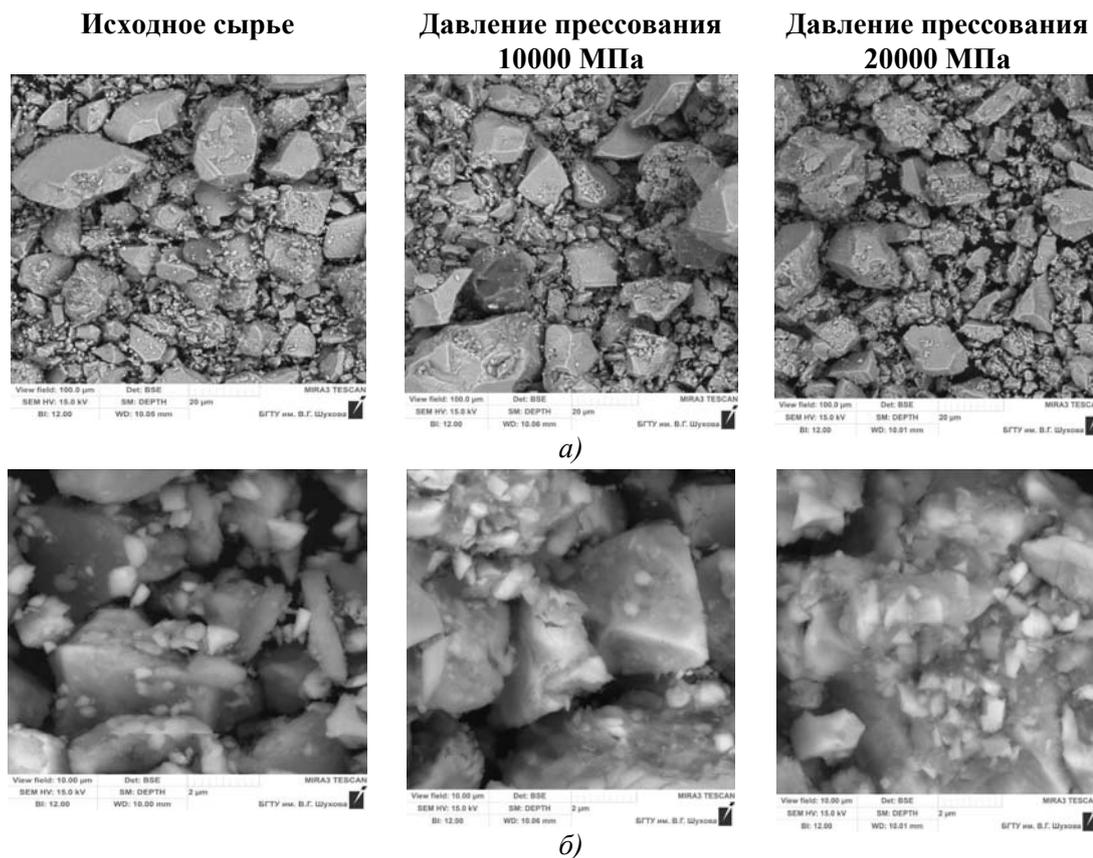


Рис. 1. Микрофотографии структуры частиц гематита, подвергнутого воздействию давлений прессования 10000 МПа и 20000 МПа:  
а – 100x100 мкм; б – 10x10 мкм

Из общего анализа представленных выше микрофотографий можно сделать вывод, что в случае получения композиционного материала при давлениях прессования до 20000 МПа геометрия и структура частиц гематитового наполнителя в нем будет изменяться. В связи с этим представляется большой научный интерес изучение возможного изменения фазового состава гематита после воздействия на него такого давления прессования.

## 2. Изменение фазового состава гематита, подвергнутого воздействию высоких давлений прессования

Изучение изменения фазового состава гематита при воздействии на него высоких давлений прессования было выполнено с помощью рентгеновского фазового анализа с проведением исследований в диапазоне углов  $2\theta$  с углами 4–125 градусов. На рис. 2 представлена дифрактограмма РФА исходного гематита.

На дифрактограмме РФА исходного гематита (см. рис. 2) были зафиксированы рефлексы при 3,690; 2,705; 2,520; 2,296; 2,209; 1,843; 1,697; 1,601; 1,488; 1,456; 1,313; 1,165; 1,057 Å, которые согласно картотеке [SearchMatch] соответствуют фазе гематита ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), и рефлексы при 2,885; 2,750; 2,105 Å, соответствующие фазе магнетита (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), входящего в состав гематита.

На рис. 3 и 4 представлены дифрактограммы РФА гематита, подвергнутого воздействию давления прессования в 10000 МПа и 20000 МПа.

Из представленных на рис. 3–4 дифрактограмм РФА гематита, подвергнутого воздействию давления прессования до 20000 МПа, видно, что значительных изменений его фазового состава (по сравнению с исходным образцом) не наблюдается. Небольшие изменения рефлексов во многих областях на 1–2 тысячных единицы, соответст-

вующие фазам гематита и магнетита, относятся к погрешности проводимых измерений.

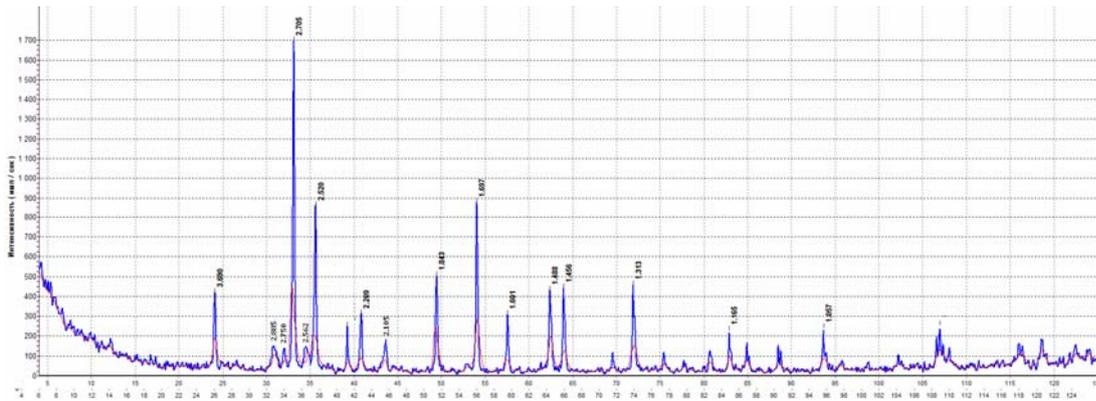


Рис. 2. Дифрактограмма РФА исходного гематита

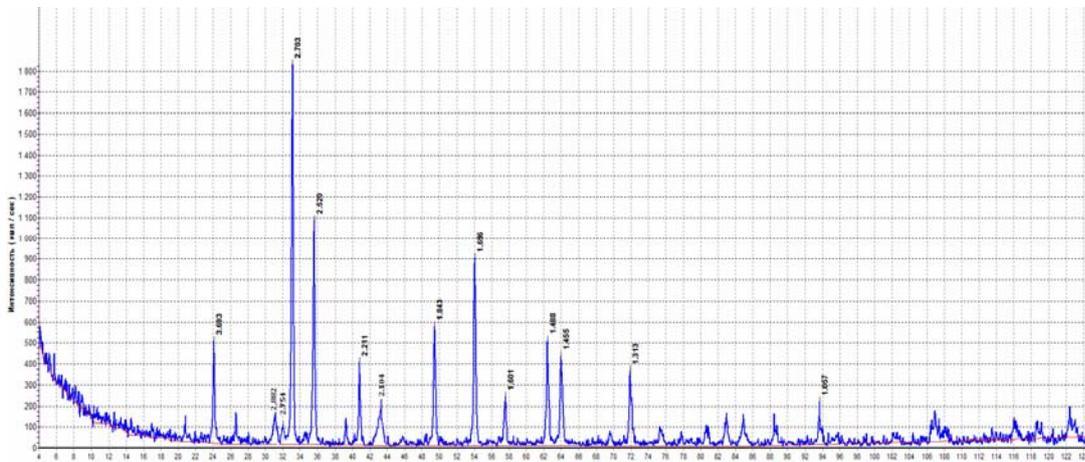


Рис. 3. Дифрактограмма РФА гематита, подвергнутого воздействию давления прессования в 10000 МПа

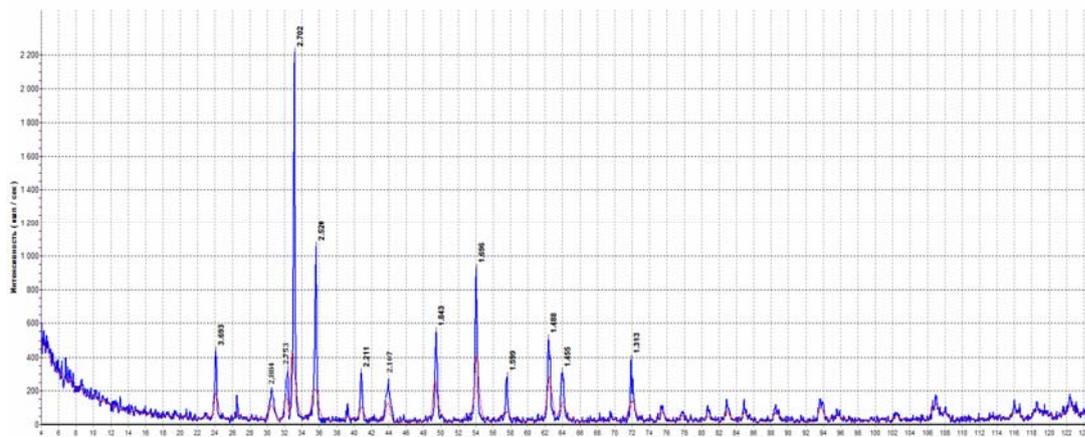


Рис. 4. Дифрактограмма РФА гематита, подвергнутого воздействию давления прессования в 20000 МПа

Таким образом, можно утверждать, что при получении нового вида строительного композиционного материала при давлениях прессования до 20000 МПа изменения фазового состава гематитового наполнителя при этом происходить не будут, что положительно скажется на целостности общей системы.

Так как новые виды строительных радиационно-защитных композиционных материалов планируется получать при высоких давлениях и температурах (в зависимости от используемой матрицы), то, возможно, внутри материала будут возникать высокие температуры, и, соответственно, в дальнейших исследованиях будет представлять большой научный интерес изучение поведения гематита, подвергнутого воздействию высоких давлений прессования при высоких температурах.

### 3. Дифференциальный термический анализ гематита, подвергнутого воздействию высоких давлений прессования

Ниже приведены результаты дифференциального термического анализа гематита, подвергнутого воздействию высоких давлений прессования до 20000 МПа. На рис. 5–7 представлены термограммы исходного гематита, подвергнутого давлению прессования 10000 МПа и подвергнутого давлению прессования 20000 МПа соответственно.

Из рис. 5–7 видно, что по мере увеличения температуры до 1000°C явных эффектов не наблюдается: в исходном материале наблюдается снижение массы, равное 1,13 %, а в материалах, подвергнутых высоким давлениям прессования в 10000 МПа и 20000 МПа, – 1,49 % и 1,58 % соответственно.

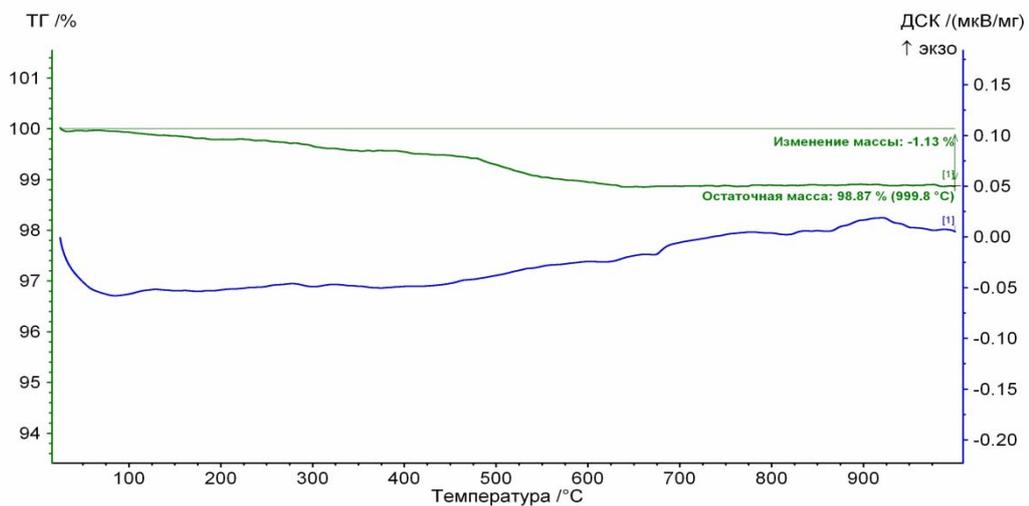


Рис. 5. Термограмма исходного гематита

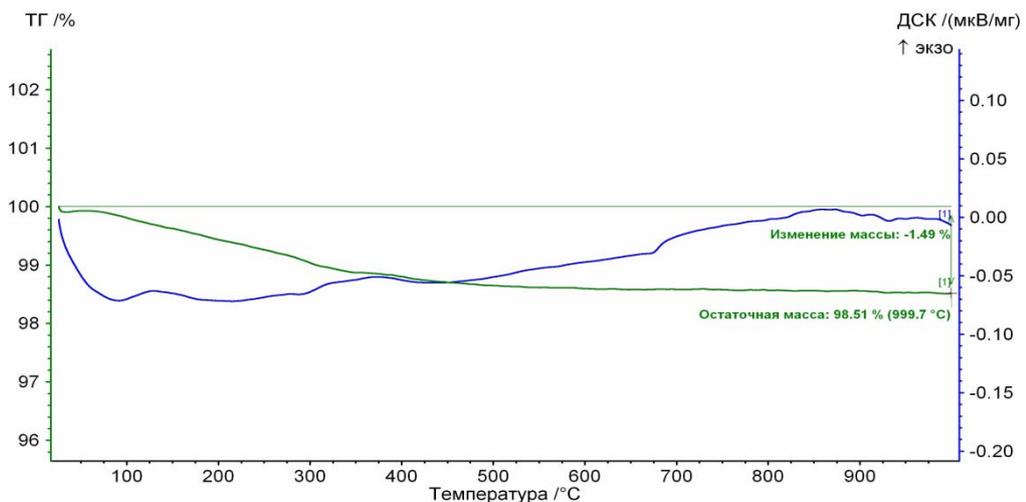


Рис. 6. Термограмма гематита, подвергнутого давлению прессования 10000 МПа

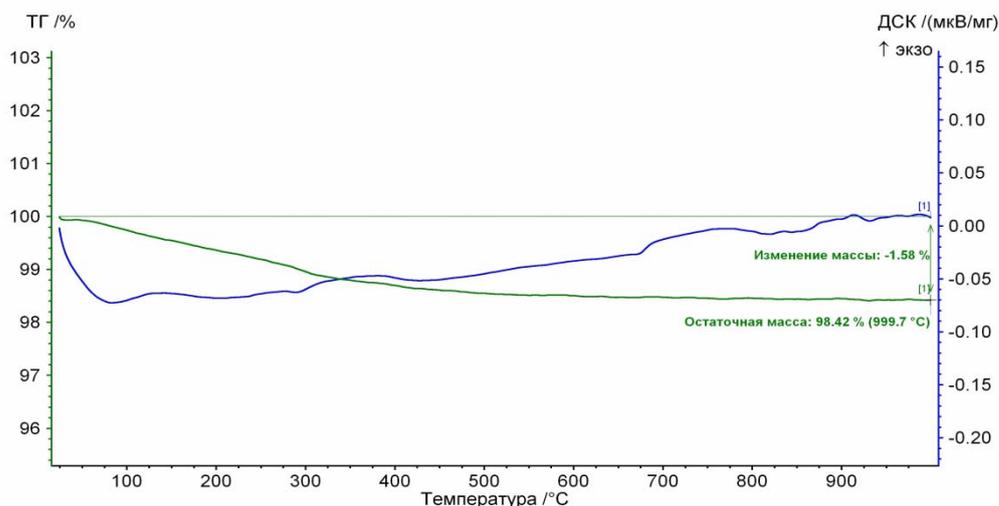


Рис. 7. Термограмма гематита, подвергнутого давлению прессования 20000 МПа

Из кривых ДТА видны незначительные экзотермические эффекты, а именно: магнетит, содержащийся в гематитовом концентрате, при нагревании дает экзотермический эффект в интервале температур 200–320 °С, что соответствует частичному окислению магнетита до маггемита, и экзотермический эффект при температуре 550–700 °С, что характеризуется окислением остаточного магнетита и переходом маггемита в гематит [24–25]. Наблюдаемые изменения незначительны в связи с тем, что магнетита в гематитовом концентрате находится 2,5–3 мас. %, а гематит ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) является самой устойчивой модификацией оксида железа и при дифференциальном термическом анализе эффектов не дает.

### Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что гематит может быть успешно применен в качестве наполнителя при разработке и получении новых видов строительных композиционных материалов, которые планируют получать при высоких давлениях прессования и высоких температурах (в случае, к примеру, если матрицей композиционного материала будет являться металлизированная система). Данный наполнитель при таких давлениях ведет себя термически стабильно и не меняет свой фазовый состав, что положительно будет сказываться на свойствах всей композиционной системы в целом.

### Список литературы

1. Данилов, А.М. Строительные материалы как системы / А.М. Данилов, Е.В. Королев, И.А. Гарькина // Строительные материалы. – 2006. – № 7. – С. 55–57.
2. Гарькина, И.А. Синтез композиционных материалов как сложных систем / И.А. Гарькина, А.М., Данилов Э.Р. Домке, Е.В. Королев // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2009. – № 4. – С. 48–55.
3. Авраамов, Ю.С. Применение механизмов твердо-жидкофазного взаимодействия с целью получения новых радиационно-защитных материалов / Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин, А.Н. Кравченко, П.Н. Трубицын // Итоги и перспективы интегрированной системы образования в высшей школе России: образование – наука – инновационная деятельность: труды конференции. – МГИУ – ИТИП РАО – МИИР – ИМБ – МАН ИПТ, 2011. – С. 386–388.
4. Потапов, Ю.Б. Эффективные строительные композиты и конструкции на их основе с комплексом заданных свойств / Ю.Б. Потапов // Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – №9. – С. 9–11.

5. Данилов, А.М. Материалы специального назначения: выбор элементного состава / А.М. Данилов, Е.В. Королев, А.П. Самошин, В.А. Смирнов // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – № 2. – С. 37–40.
6. Болдырев, А.М. Ресурсосберегающие технологии получения металлобетонных строительных композитов / А.М. Болдырев, А.С. Орлов, Е.Г. Рубцова // Изв. вузов. Строительство. – 2002. – №4. – С. 38–43.
7. Гульбин, В.Н. Строительные материалы для защиты объектов от воздействия электромагнитных излучений / В.Н. Гульбин, В.Ф. Коровяков, Н.С. Колпаков, В.В. Горкавенко // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 5. – С. 7–13.
8. Matyukhin P.V. Theoretical preconditions of new kinds of nuclear protective metal composite materials development based on ferric and bismuth oxides capsulated into metallic aluminum matrix / P.V. Matyukhin // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2011. – № 2. – С. 42.
9. Чердынцев, В.В. Металломатричные радиационно-защитные композиционные материалы на основе алюминия / В.В. Чердынцев, М.В. Горшенков, В.Д. Данилов, С.Д. Калошкин, В.Н. Гульбин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – № 1 (691). – С. 14–18.
10. Королев, Е.В. Серные композиционные материалы специального назначения / Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2008. – № 3. – С. 99–106.
11. Матюхин, П.В. Радиационно-защитный конструкционный композиционный материал / П.В. Матюхин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – № 9 (28). – С. 40–41.
12. Шейченко, М.С. Современные композиционные радиационно-защитные материалы строительного назначения / М.С. Шейченко, Н.И. Алфимова, Я.Ю. Вишневская // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 5. – С. 15–19.
13. Матюхин, П.В. Композиционный материал, стойкий к воздействию высокоэнергетических излучений / П.В. Матюхин, В.И. Павленко, Р.Н. Ястребинский // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 2. – С. 25–27.
14. Потапов, Ю.Б. Концептуальный подход к проектированию эффективных композиций на основе модифицированных олигодиенов / Ю.Б. Потапов, Ю.М. Борисов, Д.Е. Барабаш // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2008. – № 1. – С. 69–74.
15. Баженов, Ю.М. Выбор заполнителя для радиационно-защитных бетонов вариативно-каркасной структуры / Ю.М. Баженов, Е.В. Королев, А.П. Самошин, О.В. Королева // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – № 1. – С. 9–13.
16. Гульбин, В.Н. Радио- и радиационно-защитные композиционные материалы с наноструктурными наполнителями / В.Н. Гульбин, Н.С. Колпаков, В.В. Поливкин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10, № 23 (150). – С. 43–51.
17. Королев, Е.В. Структура и свойства крупнопористых каркасов для радиационно-защитных материалов / Е.В. Королев, О.В. Королева, А.П. Самошин, В.А. Смирнов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2010. – № 1 (13). – С. 308–314.
18. Гуревич, Л.М. Моделирование деформаций при горячей прокатке магниево-алюминиевого композита / Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков, В.Н. Арисова, И.А. Пономарева, Д.В. Щербин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – № 8 (168). – С. 120–124.
19. Лаптев, Г.А. Разработка технологии изготовления металлобетонов / Г.А. Лаптев, Ю.Б. Потапов, В.Т. Ерофеев // Строительство и реконструкция. – 2015. – № 1 (57). – С. 123–129.
20. Алфимова, Н.И. Современные тенденции развития радиационно-защитного материаловедения / Н.И. Алфимова, С.Ю. Пириева, А.В. Федоренко, М.С. Шейченко,

Я.Ю. Вишневецкая // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 4. – С. 20–25.

21. Баженов, Ю.М. Выбор заполнителя для радиационно-защитных бетонов вариатропно-каркасной структуры / Ю.М. Баженов, Е.В. Королев, А.П. Самошин, О.В. Королева // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – № 1. – С. 9–13.

22. Гульбин, В.Н. Исследование структуры и свойств радио- и радиационно-защитных полимерных нанокомпозитов / В.Н. Гульбин, Н.С. Колпаков, В.В. Горкавенко, А.А. Бойков // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 4–11.

23. Матюхин, П.В. Неорганический радиационно-защитный металлокомпозиционный материал строительного назначения / П.В. Матюхин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2007. – № 9. – С. 35–39.

24. Минералы. Простые окислы: справочник: в 5 т. / под ред. Ф.В.Чухрова. – М.: Наука, 1965. – Т.2, вып.2. – 343 с.

25. Минералы. Сложные окислы, титанаты, ниобаты, танталаты, антимонаты, гидроокислы: справочник: в 5 т. / под ред. Ф.В.Чухрова. – М.: Наука, 1967. – Т.3, вып.2. – 676 с.

### References

1. Danilov, A.M. Building materials as systems / A.M. Danilov, E.V. Korolev, I.A. Garkina // Building materials. – 2006. – № 7. – P. 55–57.

2. Garkina, I.A. Synthesis of composite materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.R. Domke, E.V. Korolev // Bulletin of the Moscow Automobile and Highway State Technical University (MADI). – 2009. – № 4. – P. 48–55.

3. Avraamov, Y.S. Application of mechanisms of solid-liquid-phase interaction with the aim of obtaining new radiation-protective materials / Y.S. Avraamov, A.D. Shlyapin, A.N. Kravchenkov, P.N. Trubitsyn // Results and prospects of the integrated education system in the higher school of Russia: education – science – innovative activity Proceedings of the conference. – MGIU – ITIP RAO – MIIR – IMB – MAN IPT. – 2011. – P. 386–388.

4. Potapov, Y.B. Effective building composites and structures on their basis with a set of specified properties / Y.B. Potapov // Industrial and civil construction. – 2010. – № 9. – P. 9–11.

5. Danilov, A.M. Materials of a special purpose: the choice of elemental composition / A.M. Danilov, E.V. Korolev, A.P. Samoshin, V.A. Smirnov // Regional architecture and engineering. – 2009. – № 2. – P. 37–40.

6. Boldyrev, A.M. Resursosberegajushchie technologies of reception of metal-concrete building composites / A.M. Boldyrev, A.S. Orlov, E.G. Rubtsova // Izv. universities. Building. – 2002. – № 4. – P. 38–43.

7. Gulbin, V.N. Building materials for the protection of objects from the effects of electromagnetic radiation / V.N. Gulbin, V.F. Korovyakov, N.S. Kolpakov, V.V. Gorkavenko // Industrial and civil construction. – 2014. – № 5. – P. 7–13.

8. Matyukhin, P.V. Theoretical preconditions of new types of nuclear protective metal composite materials based on ferric and bismuth oxides capsulated into metallic aluminum matrix / P.V. Matyukhin // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2011. – № 2. – P. 42.

9. Cherdintsev, V.V. Metallometric radiation-protective composites based on aluminum / V.V. Cherdintsev, M.V. Gorshenkov, V.D. Danilov, S.D. Kaloshkin, V.N. Gulbin // Metallurgy and heat treatment of metals. – 2013. – No. 1 (691). – P. 14–18.

10. Korolev, E.V. Sulfur composite materials of special purpose / E.V. Korolev // Building materials. – 2008. – № 3. – P. 99–106.

11. Matyukhin, P.V. Radiation-protective structural composite material / P.V. Matyukhin // International Scientific and Research Journal. – 2014. – No. 9 (28). – P. 40–41.

12. Sheychenko, M.S. Modern composite radiation-protective materials for construction purposes / M.S. Sheychenko, N.I. Alfimova, Y.Y. Vishnevskaya // Vestnik Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2017. – № 5. – P. 15–19.
13. Matyukhin, P.V. Composite material resistant to high-energy radiation / P.V. Matyukhin, V.I. Pavlenko, R.N. Yastrebinsky // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2012. – № 2. – P. 25–27.
14. Potapov, Y.B. A conceptual approach to the design of effective compositions based on modified oligodenes / Y.B. Potapov, Y.M. Borisov, D.E. Barabash // The Scientific Herald of the Voronezh State Architectural and Construction University. Series: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science. – 2008. – № 1. – P. 69–74.
15. Bazhenov, Y.M. A choice of a filler for radiation-protective concretes of a variational-frame structure/ Y.M. Bazhenov, E.V. Korolev, A.P. Samoshin, O.V. Koroleva // Regional architecture and engineering. – 2009. – № 1. – P. 9–13.
16. Gulbin, V.N. Radio- and radiation-protective composites with nanostructured fillers / V.N. Gulbin, N.S. Kolpakov, V.V. Polivkin // Izvestiya Volgograd State Technical University. – 2014. – T. 10, No. 23 (150). – P. 43–51.
17. Korolev, E.V. Structure and properties of large-pored frames for radiation-protective materials / E.V. Korolev, O.V. Koroleva, A.P. Samoshin, V.A. Smirnov // Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2010. – № 1 (13). – P. 308–314.
18. Gurevich, L.M. Modeling of deformations during hot rolling of a magnesium-aluminum composite / L.M. Gurevich, Y.P. Trykov, V.N. Arisova, I.A. Ponomareva, D.V. Shcherbin // Izvestiya Volgograd State Technical University. – 2015. – No. 8 (168). – P. 120–124.
19. Laptev, G.A. Development of the technology of manufacturing of concrete / G.A. Laptev, Y.B. Potapov, V.T. Erofeev // Construction and reconstruction. – 2015. – No. 1 (57). – P. 123–129.
20. Alfimova, N.I. Modern tendencies of the development of radiation-protective material science / N.I. Alfimova, S.Y. Pirieva, A.V. Fedorenko, M.S. Sheychenko, Y.Y. Vishnevskaya // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2017. – № 4. – P. 20–25.
21. Bazhenov, Y.M. A choice of a filler for radiation-protective concretes of a variational-frame structure / Y.M. Bazhenov, E.V. Korolev, A.P. Samoshin, O.V. Koroleva // Regional architecture and engineering. – 2009. – № 1. – P. 9–13.
22. Gulbin, V.N. Investigation of the structure and properties of radio- and radiation-protective polymeric nanocomposites / V.N. Gulbin, N.S. Kolpakov, V.V. Gorkavenko, A.A. Boykov // Electromagnetic waves and electronic systems. – 2018. – Vol.23, No. 1. – P. 4–11.
23. Matyukhin, P.V. Inorganic radiation-protective metal-composite materials for construction purposes / P.V. Matyukhin // News of higher educational institutions. Building. – 2007. – № 9. – P. 35–39.
24. Minerals. Simple oxides: Handbook: In 5 tons / Ed. F.V. Chukhrova. – M.: Nauka, 1965. – Vol. 2, Issue 2. – 343 p.
25. Minerals. Complex oxides, titanates, niobates, tantalates, antimonates, hydroxides: Handbook: In 5 tons / Ed. F.V. Chukhrova. – M.: Science, 1967. – Vol. 3, Issue 2. – 676 p.

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 692.522.3

*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

**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

**Скачков Юрий Петрович,**  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Строительные  
конструкции», ректор  
E-mail: office@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

**Skachkov Yuri Petrovich,**  
Doctor of Sciences,  
Professor of the department «Building  
structures», Rector  
E-mail: office@pguas.ru

### КОНСТРУКЦИЯ, СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И РАСЧЕТ МНОГОПУСТОТНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ С ПРОЁМОМ

И.С. Гучкин, Н.Н. Ласьков, Ю.П. Скачков

Приводятся конструкция и способ изготовления пустотной железобетонной плиты перекрытия с технологическим проемом. Рассматриваются особенности проектирования плиты, обусловленные наличием проема и переменной по длине жесткостью поперечного сечения. Анализируется работа шпоночного сопряжения участков плиты на стыке сплошного и пустотного тел. Приводятся выводы и даются рекомендации по изготовлению плит с традиционным армированием и предварительно напряженным.

*Ключевые слова: пустотная плита, технологический проем, конструкция, способ изготовления, прочность, трещиностойкость, жесткость, расчет*

## STRUCTURE, MANUFACTURING METHOD AND CALCULATION OF MULTI HOLLOW REINFORCED CONCRETE SLAB WITH AN OPENING

I.S. Guchkin, N.N. Laskov, Y.P. Skachkov

The design and method of manufacturing a hollow reinforced concrete slab with a technological opening are given. The design features of the slab, due to the presence of opening and variable cross-section stiffness along the length are considered. The work of keys integration of the slab sections at the joint of solid and hollow bodies is analyzed. Conclusions and recommendations are given on the production of slabs with conventional and prestressed reinforcement.

*Keywords: hollow slab, technological opening, construction, manufacturing method, strength, crack resistance, rigidity, calculation*

В типовых многопустотных плитах перекрытий отсутствует технологический проем, поэтому, когда при строительстве зданий он требуется, плиты приходится заменять на ребристые или сплошные с проемом, что усложняет монтаж перекрытия, увеличивает номенклатуру изделий и ведет к удорожанию объекта. В разработанной, с участием сотрудников кафедры строительных конструкций ПГУАС, пустотной плите [1] технологический проем предусмотрен и предназначен для пропуска воздухопроводов в междуэтажных перекрытиях, устройства эвакуационных люков в лоджиях и балконах, люков в перекрытии погребов и спецсооружений.

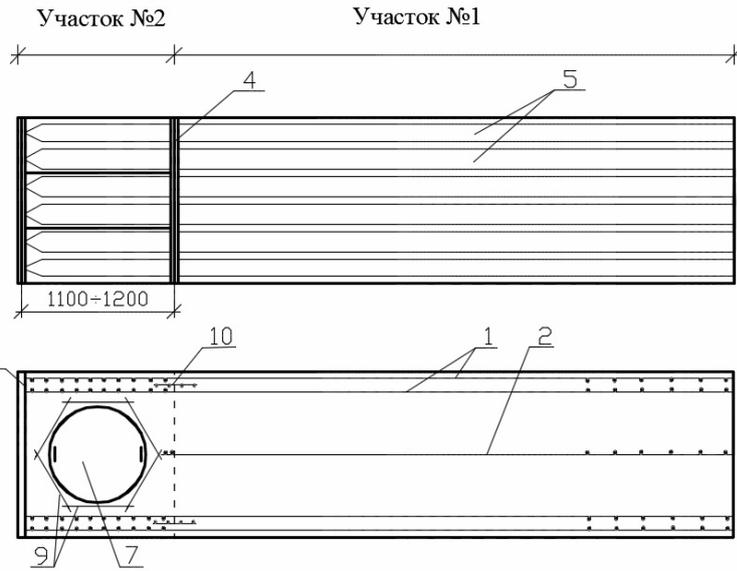
Плита состоит из двух монолитных тел, пустотного и сплошного сечений, объединенных в единый блок бетонными шпонками, размещенными в предварительно отформованном пустотном теле, и продольными стержнями, расположенными в его нижней части. Сплошное тело плиты содержит технологический проем диаметром 600...700 мм, размещенный на расстоянии 250...350 мм от торца. Монолитное тело по контуру проема армируется отдельными стержнями диаметром не менее 12 мм, размещенными в верхней части сечения, а в продольном направлении по осям крайних пустот – каркасами длиной 400...600 мм из холодноотянутой арматурной проволоки диаметром 4–5 мм с шагом поперечных стержней 50...100 мм. Конструкция, опалубка и армирование плиты показаны на рис. 1.

Плиту изготавливают следующим способом. В опалубке размещают каркасы (1, 2), а затем на расстоянии 1,1 м от торца располагают и фиксируют диафрагму (4), разделяя зону бетонирования на два участка – первый и второй. Размещают пуансоны (5), после чего на первом участке укладывают и виброуплотняют бетонную смесь. Затем удаляют пуансоны и диафрагму. В пустоты отформованного бетонного тела устанавливают бетонные заглушки (6). На втором участке размещают вкладыш проема (7), защитный экран (8), стержни (9) и каркасы (10). Укладывают и виброуплотняют бетонную смесь, которая, проникая в пустоты, образует шпонки (11). После набора бетоном распалубочной прочности вкладыш проема и защитный экран извлекают.

Плита рассчитывается на прочность, трещиностойкость и жесткость как обычная типовая, однако имеются некоторые особенности, а именно: в расчетной схеме учитываются переменная жесткость сечения по длине плиты и различная форма поперечного сечения на участках с проемом (1) и без такового (2). При этом прочность и трещиностойкость нормального сечения на изгибающий момент проверяются расчетом на участках 1 и 2, а прочность на действие поперечной силы – на участке 1. Прогиб плиты определяется на участке 2. Все расчеты выполняются в соответствии с требованиями актуализированной редакции СНиП 52-01–2003. Нагрузка на плиту, включая первый и второй участки (см. рис.1), принимается равномерно распределенной.

Особое внимание при проектировании плиты [4] следует уделять прочности шпоночного сопряжения первого и второго участков. При этом размеры бетонных шпонок должны обеспечивать оптимальную работу соединения. Поскольку диаметр шпонки определяется технологическими требованиями, то речь может идти только о ее длине, которая не должна превышать оптимального значения из условий обеспечения плавности сопряжения и нецелесообразности работы шпонки на изгиб в составе сборного элемента. Расчетная схема шпонки показана на рис. 2.

а



б

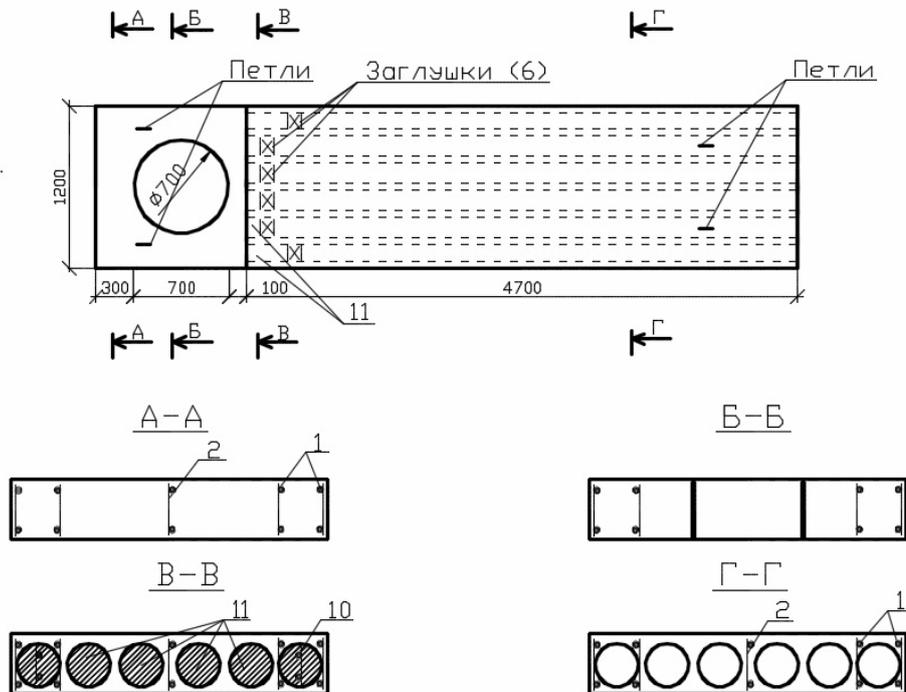
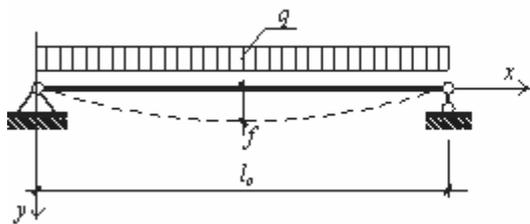


Рис. 1. Конструкция плиты:  
а – опалубка, армирование; б – основные размеры и сечения

а.



б.

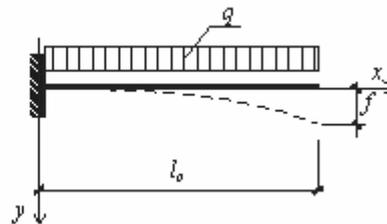


Рис. 2. К расчету бетонной шпонки:  
а – схема деформирования плиты; б – расчетная схема бетонной шпонки

Вывод формулы для определения максимально допустимой длины шпонки:

– изогнутую ось элемента (плиты) аппроксимируем квадратной параболой и находим прогиб  $f$ ;

– составляем уравнение изогнутой оси элемента

$$y = \frac{4f}{l_0}x - \frac{4f}{l_0^2}x^2; \quad (1)$$

– находим первую производную

$$y' = \frac{4f}{l_0} - \frac{8f}{l_0^2}x; \quad (2)$$

– записываем уравнение изгибающего момента

$$M_x = -q \frac{(l_b - x)^2}{2} \text{ или } M_x = -\frac{Q}{2l_b}(l_b^2 - 2l_b x + x^2), \quad (3)$$

где  $Q$  – поперечная сила в зоне сопряжения участков, воспринимаемая шпонкой ( $l_b$  – расчетная длина шпонки).

Дифференциальное уравнение изогнутой оси имеет вид:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -\frac{M_x}{E_b \cdot \nu \cdot I}, \quad (4)$$

где  $E_b$  – начальный модуль упругости бетона;  $\nu$  – коэффициент, учитывающий упругопластический характер деформаций бетона в зависимости от вида действующей нагрузки;  $I$  – момент инерции сечения шпонки.

Решив совместно уравнения (4) и (3), получим:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -\frac{Q}{2E_b \cdot \nu \cdot I \cdot l_b}(l_b^2 - 2l_b x + x^2). \quad (5)$$

После однократного интегрирования имеем:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{Q}{2E_b \cdot \nu \cdot I \cdot l_b}(l_b^2 x - l_b x^2 + \frac{x^3}{3}) + A, \quad (6)$$

где  $A$  – независимая постоянная.

Поскольку при  $x = 0$   $\frac{\partial y}{\partial x} = 0$ , получаем:  $A = 0$ .

Принимая  $x = l_b$  и приравнявая правые части уравнений (2) и (6), получаем расчетное значение  $l_b$  из условий оптимальной работы шпонки на изгиб:

$$\frac{4f}{l_0} - \frac{8f}{l_0^2}l_b = \frac{Q}{2E_b \nu l_b} \left( l_b^3 - l_b^3 + \frac{l_b^3}{3} \right)$$

или

$$l_b^3 + \frac{48E_b \nu l f}{Q l_0^2} l_b - \frac{24E_b l f}{Q l_0} = 0.$$

Решением этого уравнения будет:

$$l_{b, \max} = -\frac{24E_b l f \nu}{Q l_0^2} + \sqrt{\left( \frac{24E_b \nu l f}{Q l_0^2} \right)^2 + \frac{24E_b \nu l f}{Q l_0}}. \quad (7)$$

*Например, для пустотной плиты марки ПК-60.12-6, изготовленной из бетона класса В20 (прогиб 3 см), длина бетонной шпонки, определяемая по формуле (7), примерно составляет 19 см.*

Ввиду монолитного сопряжения участков плиты расчет шпонки на местное сжатие (смятие) не требуется.

**Плита может изготавливаться как в обычном варианте, так и предварительно напряжённой. Во втором случае предварительно напряжённая арматура располагается вдоль крайних пустот, а обычная – вдоль пустот в створе проёма. Таким образом, армирование оказывается смешанным, и это необходимо учитывать в расчёте плиты на технологические и эксплуатационные нагрузки.**

#### Выводы

- Разработаны конструкция и способ изготовления пустотной железобетонной плиты с проемом.
- Учтены особенности проектирования пустотной плиты с проемом, обусловленные переменной жесткостью сечений на разных участках длины.
- Дается анализ работы шпоночного сопряжения участков плиты, сплошного и пустотного.
- Разработан метод определения длины бетонной шпонки, расположенной в зоне сопряжения тел плиты с различной формой поперечного сечения.

#### Список литературы

1. Патент RU №2581069. Многопустотная плита перекрытия с проемом / И.С.Гучкин, В.В.Можаев, Бюл.№10. – 2016.
2. Гучкин, И.С. Техническая эксплуатация и реконструкция зданий / И.С. Гучкин. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 342 с.
3. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: Росстандарт, 2012.
4. 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.

#### References

1. Patent RU No. 2581069. A hollow floor slab with an opening/ I.S. Guchkin, V.V. Mozhaev, Byl. № 10. – 2016.
2. Guchkin, I.S. Technical operation and reconstruction of buildings / I.S. Guchkin. – M.: Publishing house of ASV, 2016. – 342 c.
3. СП 63.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. Actualized edition of SNiP 52-01-2003. – M.: Rosstandart, 2012.
4. 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 624

*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

**Алимов Марат Фатихович,**  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»

**Горенков Александр Олегович,**  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»

*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

**Alimov Marat Fatihovich,**  
Postgraduate of the department «Building  
designs»

**Gorenkov Alexander Olegovich,**  
Postgraduate of the department «Building  
structures»

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕД

В.П. Селяев, П.В. Селяев, М.Ф. Алимов, А.О. Горенков

Предложена основанная на вероятностных моделях методика прогнозирования срока службы и конструкционного обеспечения ресурса железобетонного изгибаемого элемента при заданных условиях эксплуатации с учетом экспериментальных данных о статической изменчивости геометрических и прочностных характеристик изделия. Установлено, что основное влияние на индекс надежности, характеризующий безопасную работу конструкции, оказывают показатели статистической изменчивости по нагрузке и высоте поперечного сечения балки.

*Ключевые слова: вероятностный метод, агрессивное воздействие, модель деградации, индекс надежности*

## ASSESSMENT OF RELIABILITY OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WORKING IN CORROSIVE MEDIA

V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, M.F. Alimov, A.O. Gorenkov

A technique (based on probabilistic models) of prediction the service life and structural support of a reinforced concrete bending element under given operating conditions, taking into account experimental data on the static variability of geometric and strength characteristics of the product, is proposed. It has been established that the main influence on the reliability index, which characterizes the safe operation of the structure, is provided by the statistical variability indicators for the load and the height of the beam cross section.

*Keywords: probabilistic method, aggressive influence, degradation model, reliability index*

Актуальность проблемы долговечности, обеспечения надежности железобетонных конструкций в процессе эксплуатации возрастает, и это связано не только со старением основных фондов, но и с применением новых материалов (высокопрочных бетонов, композитной арматуры), интенсификацией производства и, как следствие, повышением агрессивности технологических сред.

По данным экспертов развитых стран Запада, затраты на ремонт и восстановление строительных конструкций составляют около 50 % всех расходов, связанных со строительством.

В 1984 году Де Ситтер (Дания) сформулировал «закон пяти», согласно которому один доллар, потраченный на обеспечение долговечности на стадии проектирования и строительства, эквивалентен пяти долларам, потраченным на превентивную, и двадцати пяти долларам, потраченным на коррективную эксплуатацию. Требования максимальной надежности и экономичности находятся в диалектическом противоречии, разрешение которого актуально.

Нами разработан метод оценки надежности железобетонных изгибаемых элементов, подверженных в процессе эксплуатации агрессивным химическим воздействиям.

В работах Н.С. Стрелецкого, А.П. Кудзиса, В.Д. Рейзера, Л.М. Пухонто, В.П. Селяева [1–5] предлагается оценивать вероятность разрушения конструкции по характеристике безопасности  $\beta$  (индекс надежности).

Строительная конструкция считается пригодной к эксплуатации, если выполняется предельное условие

$$\max M \leq \min R \quad (1)$$

где  $M$  – усилие в поперечном сечении элемента конструкции от внешних воздействий: силовых, температурных, деформационных;  $R$  – усилие, воспринимаемое материалом поперечного сечения конструкции.

$M$  и  $R$  – случайные величины с нормальным законом распределения. В методе расчета по предельным состояниям с помощью коэффициентов надежности обеспечивается в левой части неравенства максимально возможное (с заданной доверительной вероятностью) значение  $M$ , а в правой – минимально возможное значение  $R$ .

Отказ, наступление предельного состояния выражается условием

$$R < M. \quad (2)$$

Вероятность отказа может быть определена как сумма произведений двух вероятностей  $P\{M < R\}$  и  $P\{R = r\}$ , где  $r$  – некоторое значение  $R$ .

$$P_f = \sum P_r \{M > R\} \cdot P_r \{R = r\}. \quad (3)$$

При непрерывном распределении  $P_f$  переходит к интегралу вида

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} F_M(x) f_R(x) dx = 1 - \Phi(\beta), \quad (4)$$

где  $P_f$  – вероятность отказа;  $P_r$  – вероятность реализации события;  $F_M$  – функция распределения вероятности величины  $M$ ;  $f_R$  – плотность распределения вероятности величины  $R$ ;  $\Phi$  – стандартизированная функция вероятности для нормального распределения характеристики безопасности  $\beta$ .

Индекс надежности для независимых случайных величин принято определять по формуле

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{M}}{(S_M^2 + S_R^2)^{0.5}}, \quad (5)$$

где  $\bar{M}$ ,  $\bar{R}$  – средние значения величин  $M$  и  $R$ ;  $S_M$  и  $S_R$  – стандартные отклонения величин  $M$  и  $R$ .

Представим усилия  $M$  и  $R$  функциями от переменных факторов  $x_i$  и  $y_i$ :  $M_{(x_i)}$ ,  $R_{(y_i)}$ . Считая изменчивость факторов в зависимостях  $M$  и  $R$  незначительной, можно дисперсии  $S_M^2$  и  $S_R^2$  определить методом линеаризации по формулам вида

$$S_M^2 = \left(\frac{\partial M}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial M}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_{x_n}^2; \quad (6)$$

$$S_R^2 = \left(\frac{\partial R}{\partial y_1}\right)^2 \sigma_{y_1}^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial y_2}\right)^2 \sigma_{y_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial y_n}\right)^2 \sigma_{y_n}^2, \quad (7)$$

где  $\sigma_{x_i}$ ,  $\sigma_{y_i}$  – показатели (стандарты) статистической изменчивости факторов  $x_i$  и  $y_i$ , определяемые на основе экспериментального изучения изменчивости каждого из этих факторов.

Индекс надежности нормируется, и в соответствии с Еврокодом для первой группы предельных состояний рекомендовано принимать значение  $\beta_{n_1} = 3,8$ , для второй группы –  $\beta_{n_2} = 2,5$  [6].

Следовательно, прогнозирование ресурса конструкции можно производить из условия

$$\beta(t) \leq \beta_{n_i}. \quad (8)$$

Рассмотрим изменение надежности изгибаемого железобетонного элемента с прямоугольной формой поперечного сечения и одиночным армированием. Действие агрессивной среды происходит со стороны сжатой зоны (модель плиты). Рассмотрим две модели деградации, которые ранее были представлены в [7]. Несущая способность обеспечивается прочностью нормальных сечений.

При расчете прочности нормальных сечений средние значения  $\bar{R}$  и  $\bar{M}$  будем определять по формулам

$$\bar{M} = \frac{\bar{q}l^2}{16}; \quad \bar{R} = \bar{R}_s \bar{A}_s \bar{h}_0 - 0,5 \frac{(\bar{R}_s \bar{A}_s)^2}{\bar{R}_b \bar{b}}. \quad (9)$$

Числовые значения (параметры) случайных величин: среднеарифметические  $m$ , среднеквадратические  $S$ , коэффициенты вариации – приняты по данным примера [8] и приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	Параметры	$R_s$	$A_s$	$h_0$	$b$	$R_b$	$q$	$l$
1	Ед. изм.	кг/см <sup>2</sup>	см <sup>2</sup>	см	см	кг/см <sup>2</sup>	кг/см	см
2	Средние значения $m$	4900	2,06	5,5	100	112	10,76	200
3	Коэфф. вариации $v$	0,02	0,03	0,05	0,05	0,135	0,2	0,01
4	Среднеквадратическое отклон. $S$	98	0,06	0,275	5,0	15,12	2,1	2,0
5	Отклонение $S'_{om}$ $M$ и $R$	92,8	1352	2776	454,5	1228	5380	530
6	$\frac{S'}{M_{(R)}}$ , %	0,18	2,6	5,4	0,89	2,4	20	1,0

Среднеквадратические отклонения ( $S'_h, S'_{R_s}, S'_{R_b}, S'_{A_s}, S'_b, S'_l, S'_q$ ) величин  $R$  и  $M$ , вызванные изменениями параметров, определяли по формулам

$$S'_h = \frac{\partial R}{\partial h} S_h; S'_{A_s} = \frac{\partial R}{\partial A_s} S_{A_s}; S'_{R_s} = \frac{\partial R}{\partial R_s} S_{R_s}; S'_b = \frac{\partial R}{\partial b} S_b; S'_{R_b} = \frac{\partial R}{\partial R_b} S_{R_b};$$

$$S'_l = \frac{\partial M}{\partial l} S_l; S'_q = \frac{\partial M}{\partial q} S_q. \quad (10)$$

По формулам (9) и значениям параметров, приведенным в табл. 1, определим значения  $S', \bar{R}, \bar{M}, S_M^2, S_R^2$  и по формуле (5) – индекс надежности  $\beta$ .

$$R = 50969 \text{ кг см}; M = 26900 \text{ кг см}; S_R^2 = 11325784 (\text{кг см})^2;$$

$$S_M^2 = 29233844 (\text{кг см})^2; \beta = 3,78.$$

Следовательно, в данном случае индекс надежности  $\beta \approx 3,78$  удовлетворяет предельным условиям.

Из данных табл. 1 следует, что основное влияние на надежность конструкции оказывают показатели изменчивости по нагрузке  $S'_M$  и высоте поперечного сечения  $S'_h$ .

Для оценки влияния агрессивной среды на надежность железобетонной плиты рассмотрим первую и вторую модели деградации (см. рисунок), для которых деградационные функции приведены в [7] и представлены функциями (11) и (12).

$$M_{u1} = M_{u0} D(M_1) = M_{u0} \left[ 1 - \frac{\xi_{11}}{1 - 0.5\xi_0} \right], \quad (11)$$

$$M_{u2} = M_{u0} D(M_2) = M_{u0} \left[ 1 - \frac{\xi_{12}(1 - k_{xc})}{1 - 0.5\xi_0} + \frac{0,5\xi_{12}^2 k_{xc}(1 - k_{xc})}{\xi_0(1 - 0.5\xi_0)} \right], \quad (12)$$

где  $M_{u1}$  и  $M_{u2}$  – моменты, воспринимаемые материалом нормального сечения плиты соответственно для первой и второй модели деградации;  $\bar{M}_{u0} = \bar{R}$  момент, определяемый по формуле (9);  $\xi_{11} = \frac{a_1}{h_0}$ ;  $\xi_{12} = \frac{a_2}{h_0}$  – относительная высота зоны деградации;

$k_{xc} = \frac{R_{b(t)}}{R_{b(0)}}$  – коэффициент химического сопротивления, определяемый через

относительное изменение прочности бетона внешних слоев плиты, контактирующих с агрессивной средой.

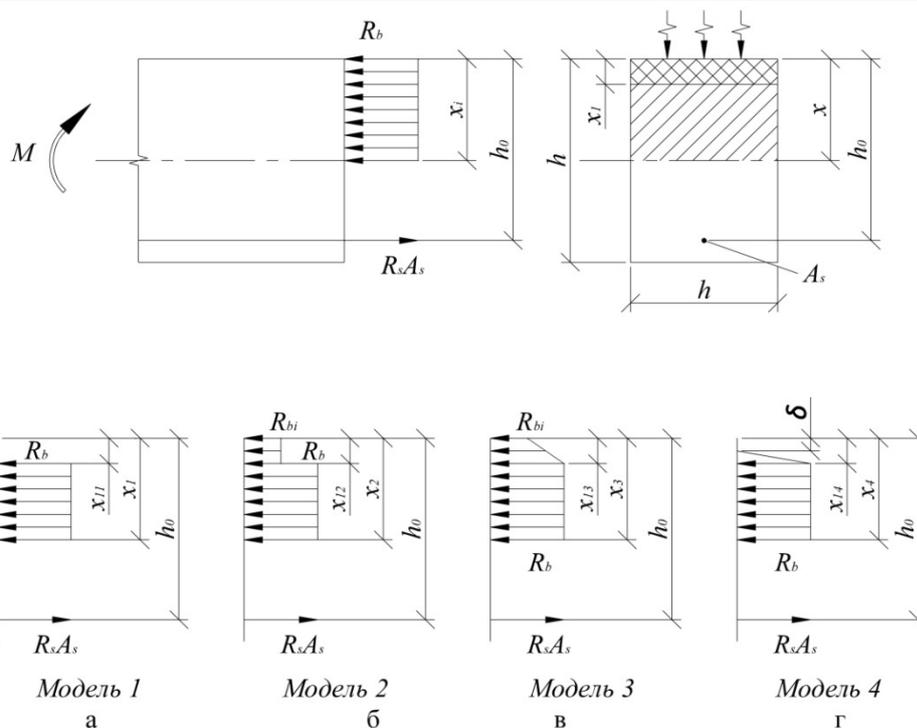
Предложено [9] параметры деградации определять по формулам  $a_i = 0,1\sqrt{Dt}$ ;

$$k_{xc} = \alpha \exp\{-\beta t\}, D = \frac{kR^2}{t_{0,5}}.$$

В формулах (11) и (12) в качестве случайных величин приняты:  $M_{u0}$ ;  $\xi_0$ ;  $k_{xc}$ ;  $a_i$ ;  $h_0$ . Средние значения  $\bar{M}_{u0}$  и  $\bar{\xi}_0$  определяли расчетом по формуле (9) и по формуле

$\bar{\xi}_0 = \frac{R_s A_s}{R_b A_b}$ . Среднеквадратические отклонения  $S_{M_{u0}}$  и  $S_{\xi_0}$  определялись по формулам

типа (6), (7) с учетом изменчивости параметров  $R_s, A_s, h_0, k_{xc}, b, R_b$  и экспериментальных данных. Числовые характеристики случайных величин приведены в табл. 2.



К расчету изгибаемого элемента

Таблица 2

№ п/п	Параметры	$M_{u0}$	$h_0$	$\xi_0$	$a$	$k_{xc}$
1	Единица измерения	кгсм	см	см/см	см	$\frac{\text{кг/см}^2}{\text{кг/см}^2}$
2	Среднеарифметическое значение $m$	50969	5,5	0,16	0,8	0,5
3	Кoeff. вариации $\nu$	0,066	0,05	0,16	0,025	0,02
4	Среднеквадратическое отклон. $S$	3365	0,275	0,025	0,02	0,01

Определение индекса надежности происходило при условии, что в процессе взаимодействия с агрессивными средами глубинный показатель  $a$  находится в пределах сжатой зоны бетона плиты и равен  $a = 0,8 \text{ см} < x = 0,16h_0 = 0,88 \text{ см}$ . Коэффициент химического сопротивления  $k_{xc} = 0,5$ . При этих условиях индекс надежности по первой модели  $\beta_1 = 2,6$ , по второй  $\beta_2 = 3,2$ . Под действием агрессивной среды надежность плиты снизилась на 18 % и 15 % при расчете по первой и второй модели деградации соответственно. Так как глубинный показатель равен 0,8 см, то, принимая по экспериментальным данным коэффициент диффузии  $0,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{М}^2}{\text{час}}$ , можем рассчитать время эксплуатации при  $\beta_2 \geq 3,2$ .

$$t = \frac{a^2}{0,01 \cdot D} = \frac{0,0064}{0,2 \cdot 10^{-6}} = 32000 \text{ час} = 3,65 \text{ лет.}$$

Применяя предложенный метод, можно решить задачу прогнозирования ресурса конструкции, определения ее конструктивных параметров из условия обеспечения нормативного индекса надежности  $\beta \geq 3,8$  при заданном сроке нормальной эксплуатации.

**Выводы.** Предложена основанная на вероятностных моделях методика прогнозирования срока службы и конструкционного обеспечения ресурса конструкции при

заданных условиях эксплуатации с учетом экспериментальных данных изменчивости конструктивных и кинетических ( $a$ ,  $k_{xc}$ ) параметров модели.

### Список литературы

1. Стрелецкий, Н.С. К вопросу учета долговечности в расчете конструкций / Н.С. Стрелецкий // Промышленное строительство. – 1963. – №9.
2. Кудзис, А.П. Оценка надежности железобетонных конструкций / А.П. Кудзис. – Вильнюс: Мокслас, 1985. – 156 с.
3. Рейзер, В.Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций / В.Д. Рейзер. – М.: Стройиздат, 1986. – 180 с.
4. Пухонто, Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений (силосов, бункеров, резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен) / Л.М. Пухонто. – М.: Изд-во АСВ. 2004. – 424 с.
5. Селяев, В.П. Анализ надежности железобетонных конструкций с полимерными покрытиями / В.П. Селяев, Г.М. Головенкова, В.Н. Журавлева // Композиционные материалы и конструкции для сельского строительства: межвуз. темат. сб. науч. тр. / Мордов. гос. ун-т. – Саранск, 1983. – С. 73–78.
6. European committee for standardization, European prestandard env. 1992.-1-1. Eurocode2: Design of concrete structures. Part 1. General rules and rules for bildings. CEN., December. 1991. Brussels.253 p.
7. Селяев, В.П. Расчет долговечности железобетонных конструкций / В.П. Селяев // Вестник Мордовского университета. – 2008. – № 4. – С. 136–140.
8. Селяев, В.П. Проектирование железобетонных конструкций многоэтажных промышленных зданий. Часть 1. Монолитные железобетонные перекрытия / В.П. Селяев, В.Н. Уткина. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-тв. 2014. – 87 с.
9. Селяев, В.П. Прогнозирование ресурса железобетонных изгибаемых элементов, работающих в агрессивной среде, по первой стадии предельных состояний / В.П. Селяев, В.М. Бондаренко, П.В. Селяев // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №1.– С.17–25.

### References

1. Streletsky, N.S. To a question of accounting of durability in calculation of designs / N.S. Streletsky // Industrial construction. – 1963. – No. 9.
2. Kudzis, A.P. Assessment of reliability of reinforced concrete designs / A.P. Kudzis. – Vilnius: Mokslas, 1985. – 156 p.
3. Reyzer, V.D. Methods of the theory of reliability in problems of rationing of calculated parameters of building constructions / V.D. Reyzer. – M.: Stroyizdat, 1986. – 180 p.
4. Pukhonto, L.M. Durability of reinforced concrete designs of engineering constructions (silos, bunkers, tanks, water towers, retaining walls) / L.M. Pukhonto. – M.: DIA publishing house. 2004. – 424 p.
5. Selyaev, V.P. The analysis of reliability of reinforced concrete designs with polymeric coverings / V.P. Selyaev, G.M. Golovenkova, V.N. Zhuravleva // Composite materials and designs for rural construction: interhigher education institution / Mordov. state. un-t. – Saransk, 1983. – P. 73–78.
6. European committee for standardization, European prestandard env. 1992.-1-1. Eurocode2: Design of concrete structures. Part 1. General rules and rules for bildings. CEN., December. 1991. Brussels.253 p.
7. Selyaev, V.P. Calculation of durability of reinforced concrete designs / V.P. Selyaev // Bulletin of the Mordovian university. – 2008. –No. 4. – P. 136–140.
8. Selyaev, V.P. Design of reinforced concrete structures of multystoried industrial buildings. Part 1. Monolithic reinforced concrete overlappings / V.P. Selyaev, V.N. Utkina.– Saransk: Mordov publishing house. un-tv, 2014. – 87 p.
9. Selyaev, V.P. Forecasting of a resource of the reinforced concrete bent elements working in hostile environment on the first stage of limit states / V.P. Selyaev, V.M. Bondarenko, P.V. Selyaev // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 1. – P. 17–25.

УДК 539.372

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

**Бакушев Сергей Васильевич,**  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Механика»  
E-mail: bakuchsv@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

**Bakushev Sergey Vasilevich,**  
Doctor of Sciences,  
Professor of the department «Mechanics»  
E-mail: bakuchsv@mail.ru

## ГЛАВНЫЕ ПЛОЩАДКИ И ГЛАВНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

С.В. Бакушев

Рассматриваются вопросы определения ориентации главных площадок и действующих на них главных напряжений в упругих телах, находящихся в условиях плоской задачи, в цилиндрической системе координат. Предварительно находятся напряжения (нормальные и касательные) на площадках, произвольно наклонённых к радиусу-вектору рассматриваемой точки тела. Из условия отсутствия на главных площадках касательных напряжений определяются ориентация главных площадок и действующие на них главные напряжения. Для исключения неизвестных геометрических параметров – приращения угла и приращения радиуса-вектора – в формулах, определяющих ориентацию главных площадок и величину главных напряжений, используются решение треугольника по трём сторонам, а также условие равенства углов при взаимно перпендикулярных прямых. При этом решение задачи сводится к нахождению корней алгебраического уравнения четвёртого порядка с переменными коэффициентами. Для его решения предлагается использовать итерационный алгоритм, основанный на вычислении искомого приращения радиуса-вектора для предварительно заданного приращения угла. Для уточнения решения задачи следует выполнить повторный перерасчёт приращения радиуса-вектора для нового значения приращения угла, взятого, например, в половинчатом значении от его начального значения. Рассмотрен числовой пример определения ориентации главных площадок и величины главных напряжений в задаче о действии распределённого изгибающего момента на вершину клина, находящегося в условиях плоской деформации. Представленные в статье результаты могут быть использованы при оценке прочности твёрдых тел, которые находятся в условиях плоской задачи и напряжённо-деформированное состояние которых описывается в цилиндрической системе координат.

*Ключевые слова:* упругое тело, плоская деформация, главные напряжения, цилиндрическая система координат

## PRINCIPAL PLANES AND PRINCIPAL STRESSES IN CYLINDRICAL COORDINATE SYSTEM

S.V. Bakushev

Questions of orientation determination of principal planes and principal stresses in elastic bodies that are under condition of plane elastic problem in cylindrical coordinate system are analyzed in this publication. Preliminary (direct and shearing) stresses are determined on the arbitrary sloping planes to radius-vector of body spot under analysis. In the condition of shearing stress absence on the principal planes orientation of principal planes and working on them principal stresses are determined. To exclude unknown geometrical parameters – rate of angle increase and rate of radius-vector increase in formula, determining orientation of principal planes and principal stresses intensity,

solution of triangle on three sides and also condition of equality of triangles at mutually perpendicular straight lines are used. Thus the problem solving reduce to determination of algebraic quartic equation roots with variable coefficient. To solve it, it is recommended to use iteration algorithm, based on determination of analyzed radius-vector increase rate for preliminary defined angle increase rate. For refinement of the solution, recalculation of radius-vector increase rate for new value of angle increase rate taken for example as a half from its initial value should be done. Therefore, we have studied the numeric example of orientation determination of principal planes and principal stresses value in the question of effect of distributed bending moment at the wedge vertex, existing in the condition of planar deformation. The presented results can be used while evaluating solid bodies resistance that exist in the condition of plain elastic problem, their stress strain behavior is described in cylindrical coordinate system.

*Keywords: elastic body, planar deformation, principal stresses, cylindrical coordinate system*

**Введение.** Оценка прочности деформируемых тел выполняется, как известно, с использованием критериев прочности. Если напряжённо-деформированное состояние тела описывается в криволинейной системе координат, то оценка его прочности может быть затруднена. Это связано с тем, что критерии прочности, как правило, формулируются в терминах главных напряжений. Ввиду этого возникает альтернатива: либо критерии прочности записать в соответствующей криволинейной системе координат, либо в соответствующей криволинейной системе координат найти главные напряжения.

В произвольной криволинейной системе координат главные площадки и действующие на них главные нормальные напряжения в некоторой точке твёрдого тела определяются либо на основании известного в этой точке тела тензора напряжений, либо путём исследования напряжений на произвольно сориентированной элементарной площадке в заданной точке твёрдого тела. Первый подход является наиболее общим и универсальным, однако не лишённым определённых сложностей в математическом плане<sup>1</sup>. Второй подход обычно используется для тел, находящихся в условиях плоской задачи [1].

В данной работе рассматривается деформируемое твёрдое тело, находящееся в условиях плоской задачи. Его напряжённо-деформированное состояние описывается в ортогональной криволинейной (цилиндрической) системе координат. Для оценки прочности этого тела выберем вторую альтернативу и найдём главные площадки и действующие на них главные напряжения в цилиндрической системе координат, рассматривая напряжения на произвольно сориентированной элементарной площадке в некоторой точке тела. Будем следовать работе [2], где излагаются вопросы определения напряжений на наклонных площадках в цилиндрической системе координат.

Следует отметить, что использование криволинейных ортогональных координат при оценке напряжённо-деформированного состояния твёрдого тела не является чем-то исключительным, а широко применяется в расчётной практике для тел сложной конфигурации. Так, в работе [3] для тела, находящегося в плоскодеформированном состоянии, строится численное решение разрешающей системы уравнений (уравнений равновесия и условия текучести Кулона – Мора) в криволинейных характеристических обобщённых координатах Михлина. В работе [4] излагается метод получения физических соотношений в приращениях для геометрически нелинейно, но физически линейно деформируемого тела в произвольных криволинейных координатах. В работе [5] представлены дифференциальные уравнения равновесия нелинейно упругой среды для решения осесимметричных задач в ортогональной криволинейной параболической системе координат. Особенности выбора систем координат, в которых координатные линии являются линиями скольжения или линиями главных напряжений для плоской деформации идеальной жесткопластической среды, отмечены в работе [6]. При этом получены решения, содержащие функции координат, определяемые метрическим тензором для двумерного пространства. В работе [7] рассматриваются трёхмерные уравнения математической теории пластичности с условием пластичности Треска и

<sup>1</sup> Новожилов В.В. Теория упругости. М.: Судпромгиз, 1958. 370 с.

ассоциированным с ним законом течения для напряжённых состояний, соответствующих ребру поверхности текучести. При этом вводятся такие криволинейные координаты, что уравнения равновесия, преобразованные к новым переменным, сводятся к трём интегрируемым уравнениям. В работе [8] выводится матрица преобразования тензора деформации, записанного в декартовой системе координат к произвольным ортогональным криволинейным координатам, что позволит уточнить выражение для дифференциала вектора перемещения.

Перейдём к нашей задаче и найдём главные площадки и действующие на них главные напряжения в цилиндрической системе координат, рассматривая напряжения на произвольно сориентированной элементарной площадке в некоторой точке тела.

**Построение расчётных соотношений.** Рассмотрим элемент тела  $a, b, c$  единичной толщины в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа, в цилиндрической системе координат  $(r, \theta, z)$ , выделенный в окрестностях некоторой точки  $a$  деформированного тела, находящегося в условиях плоской задачи (рис. 1).

Ориентацию в пространстве произвольной наклонной площадки  $bc$  будем определять нормалью  $\bar{n}$ . При этом  $oa = ob = r$ ,  $ac = \Delta r$ . Обозначим угол между направлением радиуса-вектора полярной системы координат  $\xi$  и нормалью к наклонной площадке  $\bar{n}$  буквой  $\alpha$ . Проекции вектора полного напряжения  $\bar{P}$ , действующего на наклонной площадке, на оси  $\xi$  и  $\eta$  обозначим  $P_\xi$  и  $P_\eta$ .

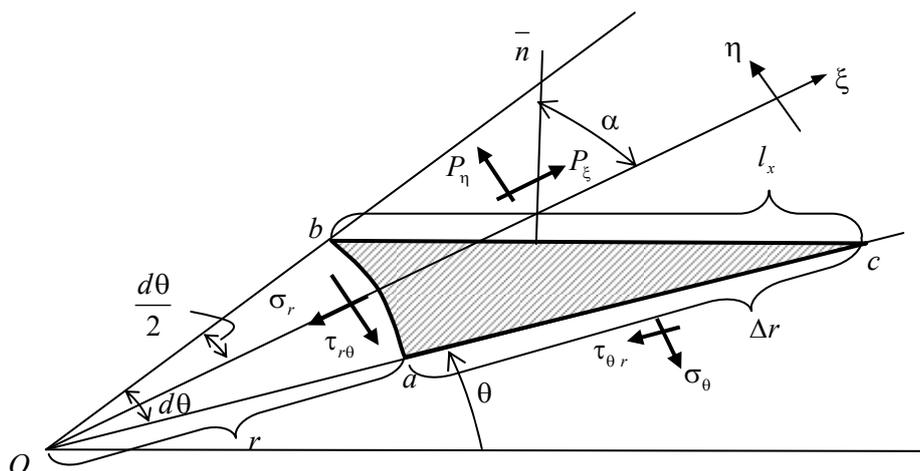


Рис. 1. Элемент упругого тела  $abc$

Бесконечно малый элемент  $abc$  находится в равновесии. Следовательно, сумма проекций всех сил, действующих на выделенный элемент  $abc$ , на оси  $\xi$  и  $\eta$  должна быть равна нулю:

$$\begin{aligned} \sum \xi = 0: & P_\xi l_x - \tau_{\theta r} \cdot \Delta r \cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) - \sigma_\theta \cdot \Delta r \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) - \sigma_r 2r \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) = 0; \\ \sum \eta = 0: & P_\eta l_x + \tau_{\theta r} \cdot \Delta r \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) - \sigma_\theta \cdot \Delta r \cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) - \tau_{r\theta} 2r \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В соотношениях (1) длина наклонной площадки  $l_x$  может быть получена из рассмотрения геометрии вырезанного элемента  $abc$  (рис. 2).

Действительно, длины сторон равнобедренной трапеции  $abdfc$  равны:

$$ab = 2r \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right), \quad cd = 2(r + \Delta r) \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right), \quad ac = bd = \Delta r,$$

$$de = cf = \frac{1}{2} \left[ 2(r + \Delta r) \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) - 2r \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \right] = \Delta r \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right),$$

$$af^2 = be^2 = \Delta r^2 \left[ 1 - \sin^2\left(\frac{d\theta}{2}\right) \right], \quad ec = dc - de = (2r + \Delta r) \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right).$$

Следовательно, из прямоугольного треугольника  $bce$  находим:

$$l_x^2 = \Delta r^2 + 4r(r + \Delta r) \sin^2\left(\frac{d\theta}{2}\right). \quad (2)$$

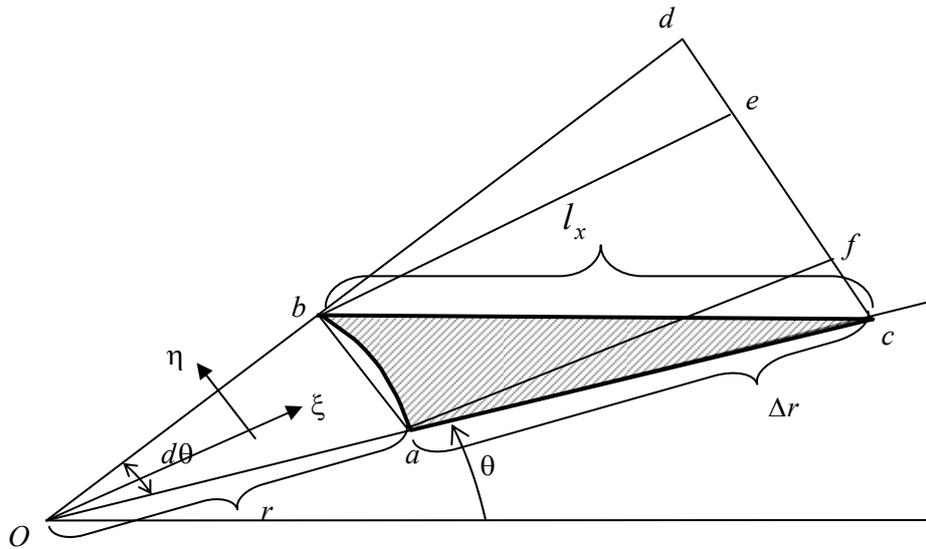


Рис. 2. Геометрия вырезанного элемента  $abc$

Для контроля выполним предельный переход в соотношении (2). В итоге получаем:

- для  $d\theta \rightarrow 0$ ,  $l_x = \Delta r$ ;
- для  $\Delta r \rightarrow 0$ ,  $l_x = 2r \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right)$ .

В силу малости угла  $d\theta$  положим  $\sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) = \frac{d\theta}{2}$  и  $\cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) = 1$ . При этом соотношения (1) преобразуются к виду:

$$P_\xi l_x - \tau_{\theta r} \Delta r - \sigma_\theta \Delta r \frac{d\theta}{2} - \sigma_r r d\theta = 0;$$

$$P_\eta l_x + \tau_{\theta r} \Delta r \frac{d\theta}{2} - \sigma_\theta \Delta r - \tau_{r\theta} r d\theta = 0. \quad (3)$$

Аналогично, для формулы (2) получим:

$$l_x^2 = \Delta r^2 + r(r + \Delta r) d\theta^2. \quad (4)$$

Таким образом, в отличие от уравнений равновесия бесконечно малого элемента в прямоугольных декартовых координатах, уравнения равновесия в цилиндрических координатах (3) содержат в явном виде приращения криволинейных координат  $\Delta r$  и  $d\theta$ .

Далее, подставив (4) в соотношения (3), найдём проекции вектора полного напряжения, действующего на наклонной площадке, на оси  $\xi$  и  $\eta$ :

$$P_{\xi} = \frac{\sigma_r r d\theta + \sigma_{\theta} \Delta r \frac{d\theta}{2} + \tau_{r\theta} \Delta r}{\sqrt{\Delta r^2 + r(r + \Delta r)(d\theta)^2}}; \quad P_{\eta} = \frac{\sigma_{\theta} \Delta r + \tau_{r\theta} \left( r - \frac{\Delta r}{2} \right) d\theta}{\sqrt{\Delta r^2 + r(r + \Delta r)(d\theta)^2}}. \quad (5)$$

Нормальное и касательное напряжения на наклонной площадке выражаются через напряжения  $P_{\xi}$  и  $P_{\eta}$  при помощи соотношений (рис. 3):

$$\sigma_n = P_{\xi} \cos \alpha + P_{\eta} \sin \alpha; \quad \tau_n = -P_{\xi} \sin \alpha + P_{\eta} \cos \alpha. \quad (6)$$

Легко видеть, что угол при вершине  $b$  треугольника  $abc$  (см. рис. 3) равен углу  $\alpha$ , то есть

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{s}{h - \Delta r}. \quad (7)$$

Здесь  $h = \frac{1}{2}(\Delta r + l_x + r \cdot d\theta)$  – полупериметр,  $s = \sqrt{\frac{(h - \Delta r)(h - l_x)(h - r \cdot d\theta)}{h}}$  – радиус вписанной окружности.

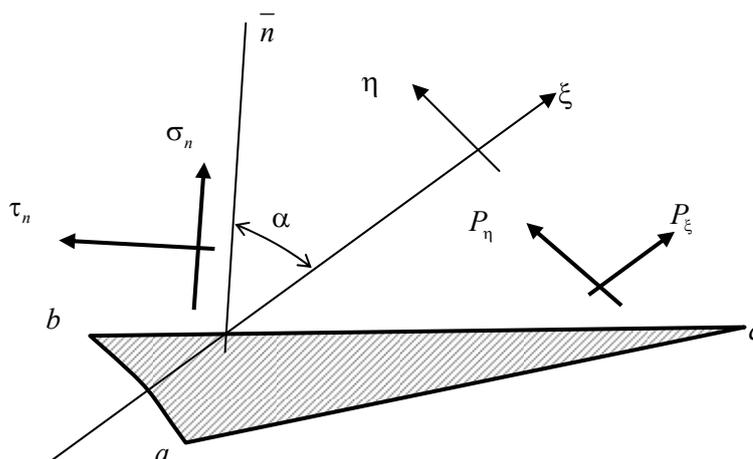


Рис. 3. Нормальное и касательное напряжения на наклонной площадке

На главных площадках касательные напряжения отсутствуют, то есть  $\tau_n = 0$ . Но тогда из соотношения (6<sub>2</sub>) найдём угол  $\alpha_{01}$ , определяющий ориентацию нормали одной из главных площадок по отношению к оси  $\xi$  (см. рис. 3):

$$\operatorname{tg} \alpha_{01} = \frac{P_{\eta}}{P_{\xi}} = \frac{\sigma_{\theta} \Delta r + \tau_{r\theta} \left( r - \frac{\Delta r}{2} \right) d\theta}{\sigma_r r d\theta + \sigma_{\theta} \Delta r \frac{d\theta}{2} + \tau_{r\theta} \Delta r}. \quad (8)$$

Вторая главная площадка будет перпендикулярна к площадке, ориентация которой задается углом  $\alpha_{01}$ , то есть её ориентация будет определяться углом  $\alpha_{02} = \alpha_{01} + 90^{\circ}$ .

Нормальные напряжения, действующие на главных площадках, найдём из уравнения (6<sub>1</sub>):

$$\sigma_{01} = P_{\xi} \cos \alpha_{01} + P_{\eta} \sin \alpha_{01}; \quad \sigma_{02} = -P_{\xi} \sin \alpha_{01} + P_{\eta} \cos \alpha_{01}. \quad (9)$$

$$\text{Здесь } \sin \alpha_{01} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_{01}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{01}}}; \quad \cos \alpha_{01} = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{01}}}.$$

В расчётные формулы для определения главных напряжений (9) и ориентации главных площадок (8) входят неизвестные величины приращений цилиндрических координат: радиуса-вектора  $\Delta r$  и угла  $d\theta$ . Для их определения воспользуемся следующим:

1. Поскольку тангенсы полного и половинного аргументов связаны соотношением

$$\operatorname{tg} \alpha_{01} = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_{01}}{2}}{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_{01}}{2}}, \quad \text{то, сопоставив формулы (7) и (8) для угла } \alpha = \alpha_{01}, \quad \text{получим}$$

уравнение:

$$\frac{\sigma_{\theta} \Delta r + \tau_{r\theta} \left( r - \frac{\Delta r}{2} \right) d\theta}{\sigma_r r d\theta + \sigma_{\theta} \Delta r \frac{d\theta}{2} + \tau_{r\theta} \Delta r} = \frac{2 \frac{s}{h - \Delta r}}{1 - \left( \frac{s}{h - \Delta r} \right)^2}. \quad (10)$$

2. Так как сумма внутренних углов треугольника  $abc$  равна  $180^\circ$ , то

$$\operatorname{arctg} \frac{s}{h - \Delta r} + \operatorname{arctg} \frac{s}{h - l_x} + \operatorname{arctg} \frac{s}{h - r \cdot d\theta} = \pi. \quad (11)$$

Уравнение (11) преобразуем к виду:

$$d\theta = \frac{(3h^2 - 2hl_x - s^2) + (l_x - 2h) \cdot \Delta r}{r(2h - l_x - \Delta r)}. \quad (12)$$

Полученное соотношение (12) подставим в уравнение (10). После элементарных преобразований получим алгебраическое уравнение четвёртого порядка относительно величины  $\Delta r$  с переменными коэффициентами:

$$A \cdot \Delta r^4 + B \cdot \Delta r^3 + C \cdot \Delta r^2 + D \cdot \Delta r + E = 0. \quad (13)$$

Коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  и  $E$  вычисляются по формулам:

$$A = \frac{1}{2} (l_x - 2h) \tau_{r\theta} + r \sigma_{\theta};$$

$$B = \left[ 2rs + r^2 - (l_x - 2h)h + \frac{1}{2} (3h^2 - 2hl_x - s^2) \right] \tau_{r\theta} + \\ + \left[ r(l_x - 2h) - (l_x - 2h)s - 2hr \right] \sigma_{\theta};$$

$$C = \left\{ \left[ \frac{1}{2} h^2 - \frac{1}{2} s^2 + r^2 + 2rs \right] (l_x - 2h) - (3h^2 - 2hl_x - s^2)h - 2hr(r + s) \right\} \tau_{r\theta} + \\ + \left[ sh(l_x - 2h) - 2hr(l_x - 2h) + r(h^2 - s^2) - s(3h^2 - 2hl_x - s^2) \right] \sigma_{\theta} - \\ - 2rs(l_x - 2h) \sigma_r;$$

$$D = \left[ \frac{1}{2} (3h^2 - 2hl_x - s^2)(h^2 - s^2) + r^2(h^2 - s^2) - 2hr(r + s)(l_x - 2h) \right] \tau_{r\theta} + \\ + \left[ sh(3h^2 - 2hl_x - s^2) + r(l_x - 2h)(h^2 - s^2) \right] \sigma_{\theta} - 2rs(3h^2 - 2hl_x - s^2) \sigma_r;$$

$$E = 2rsh(3h^2 - 2hl_x - s^2) \sigma_r + r^2(h^2 - s^2)(l_x - 2h) \tau_{r\theta}.$$

Поскольку искомая величина приращения  $\Delta r$  неявно входит в коэффициенты уравнения (13), то для его решения следует воспользоваться итерационным алгорит-

мом, суть которого состоит в том, что для заданного малого угла  $d\theta$  отыскивается приращение радиуса-вектора  $\Delta r$  такое, что удовлетворяется уравнение (13). Один из вариантов данного алгоритма приведён ниже.

Рассмотрим некоторую точку  $M(r_0, \theta_0)$  сплошной среды, которая находится в условиях плоской деформации и напряжённо-деформированное состояние которой описывается в цилиндрической системе координат. В точке  $M(r_0, \theta_0)$  вычисляются значения напряжений:  $\sigma_r(r_0, \theta_0)$ ;  $\sigma_\theta(r_0, \theta_0)$ ;  $\tau_{r\theta}(r_0, \theta_0)$ . Далее:

1. Задаёмся величиной приращения угла  $d\theta$ .
2. Задаёмся величиной приращения радиуса-вектора  $\Delta r$ .
3. Вычисляем величины  $l_x$ ,  $h$ ,  $s$ .
4. Вычисляем коэффициенты уравнения (13).
5. Решаем уравнение (13) и находим приближённое значение приращения  $\Delta r$ .
6. Процесс итераций будет продолжаться до тех пор, пока приближённое значение приращения радиуса-вектора  $\Delta r$  на  $k+1$ -й итерации будет отличаться от приближённого значения приращения радиуса-вектора  $\Delta r$  на  $k$ -й итерации не более чем на величину наперёд заданного малого числа (точности вычислений).

Сходимость рассматриваемого итерационного процесса обеспечивается физикой задачи, поскольку внутри деформируемого тела всегда существуют взаимно перпендикулярные главные площадки при любой внешней нагрузке.

Как следует из сформулированного алгоритма, решение данной задачи зависит, вообще говоря, от заданной изначально величины приращения угла  $d\theta$ . Поэтому для уточнения решения следует повторить вычисления для другой величины приращения угла  $d\theta$ , взяв его равным, например, половине первоначального приращения.

После определения приращений  $d\theta$  и  $\Delta r$  по формулам (8) и (9) найдём ориентацию главных площадок и действующие на них главные напряжения.

**Пример.** В качестве примера рассмотрим определение главных площадок и главных напряжений в задаче о действии распределённого изгибающего момента на вершину бесконечного треугольного клина<sup>1</sup>, находящегося в условиях плоской задачи. Напряжения в произвольной точке  $M(r_0, \theta_0)$  клина, в соответствии с рис. 4, будут определяться по формулам:

$$\begin{aligned}\sigma_r(r, \theta) &= -\frac{2M}{r^2} \frac{\sin 2\left(\theta - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right)}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1) - (\alpha_2 - \alpha_1) \cos(\alpha_2 - \alpha_1)}; \\ \sigma_\theta(r, \theta) &= 0; \\ \tau_{r\theta}(r, \theta) &= \frac{M}{r^2} \frac{\cos 2\left(\theta - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) - \cos(\alpha_2 - \alpha_1)}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1) - (\alpha_2 - \alpha_1) \cos(\alpha_2 - \alpha_1)}.\end{aligned}\tag{14}$$

Пусть  $r_0 = 1$  м;  $\theta_0 = 25^\circ$ . Углы  $\alpha_1 = 10^\circ$ ,  $\alpha_2 = 80^\circ$ . Величина действующего распределённого изгибающего момента  $M = 100 \frac{\text{кН} \cdot \text{м}}{\text{м}}$ . Напряжения в точке  $M(r_0, \theta_0)$ , в соответствии с формулами (14), будут равны:  $\sigma_r(r, \theta) = 246,36 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$ ;  
 $\sigma_\theta(r, \theta) = 0$ ;  $\tau_{r\theta}(r, \theta) = 81,26 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$ .

<sup>1</sup> Киселёв В.А. Плоская задача теории упругости. М.: Высш. школа, 1976. 151 с.

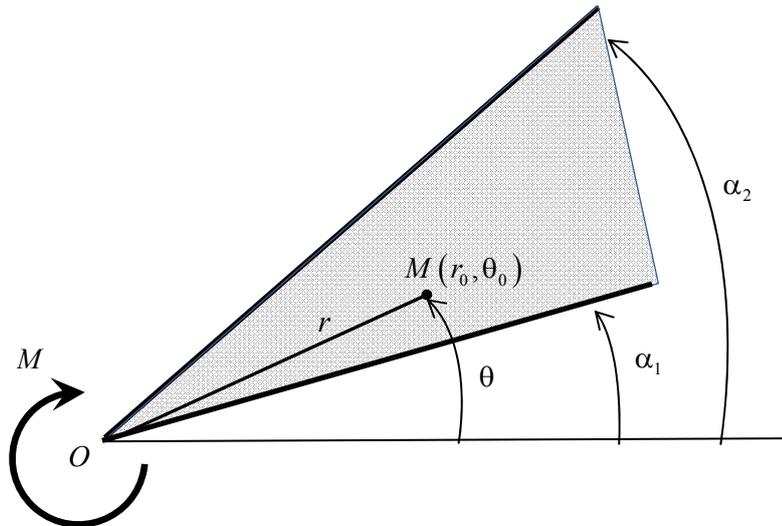


Рис. 4. Действие момента на вершину бесконечного треугольного клина

Начальные значения приращения угла  $d\theta$  и радиуса-вектора  $\Delta r$  принимались следующими:  $d\theta = 1^0 \frac{\pi}{180}$  рад;  $\Delta r = 0,001$  м. Вычисления приращения радиуса-вектора  $\Delta r$  выполнялись с точностью 0,00001. В результате были найдены:

– угол  $\alpha_{01} = 12,51^0$ ; главные напряжения  $\sigma_{01} = 212,49 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$ ;  $\sigma_{02} = 0$ .

Для уточнения решения были выполнены повторные вычисления для исходных данных:  $d\theta = 0,5^0 \frac{\pi}{180}$  рад;  $\Delta r = 0,001$  м. В результате  $\alpha_{01} = 11,69^0$ ;  $\sigma_{01} = 195,87 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$ ;  $\sigma_{02} = 0$ .

При этом погрешность при вычислении угла  $\alpha_{01}$  составила 7,01 %; при определении главного напряжения  $\sigma_{01}$  – 8,48 %.

**Заключение.** В случае плоской деформации главными напряжениями будут напряжения, задаваемые формулами (9), и напряжение  $\sigma_z = \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)$ . В случае обобщённого плоского напряжённого состояния главными напряжениями будут напряжения, определяемые формулами (9), и напряжение  $\sigma_z = \sigma_3 = 0$ . Эти напряжения действуют на трёх взаимно перпендикулярных площадках. Оценка величины этих напряжений для нахождения наибольшего и наименьшего среди главных напряжений, действующих в заданной точке упругого тела, требует дополнительного численного исследования в каждом конкретном случае.

**Выводы.** Полученные результаты могут быть использованы при оценке прочности упругих твёрдых тел, которые находятся в условиях плоской задачи и напряжённо-деформированное состояние которых описывается в цилиндрической системе координат.

#### Список литературы

1. Бакушев, С.В. Геометрически и физически нелинейная механика сплошной среды: Плоская задача / С.В. Бакушев. – М.: Книжный дом «Либроком», 2013. – 312 с.
2. Бакушев, С.В. Напряжения на наклонных площадках для плоской задачи теории упругости в полярных координатах / С.В. Бакушев, А.А. Пугачёв // Проблемы

современного строительства: сб. науч. тр. Международ. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГУАС, 2009. – 83–88 с.

3. Фадеев, Е.П. Расчёт напряжённого состояния в сыпучих материалах при плоскодеформированном состоянии / Е.П. Фадеев, Е.А. Лямина // XXIX Международная конференция «Машиноведение и инновации. Конференция молодых учёных и студентов (МИКМУС-2017)» (Москва, 06-08 декабря 2017 г.). – М., 2017. – 447–450 с.

4. Клочков, Ю.В. Определяющие соотношения в криволинейной системе координат физически линейно деформируемого тела в геометрически нелинейной постановке / Ю.В. Клочков, А.П. Николаев, Н.А. Гуреева // Известия ВолгГТУ. – 2014. – № 3(150). – С. 92–94.

5. Андреевская, Т.М. Уравнения равновесия нелинейно упругого тела в трёхмерных параболических координатах / Т.М. Андреевская, М.Н. Кирсанов // Инновационные информационные технологии. – 2013. – № 2(2). – С. 114–117.

6. Бровман, М.Я. О выборе систем координат при анализе плоской пластической деформации / М.Я. Бровман // Известия РАН, МТТ. – 2011. – №3. – С. 29–41.

7. Радаев, Ю.Н. К теории трёхмерных уравнений математической теории пластичности / Ю.Н. Радаев // Известия РАН, МТТ. – 2003. – №5. – С. 102–121.

8. Xuyan Liu Expression of strain tensor in orthogonal curvilinear coordinates. / Xuyan Liu, Yingfeng Ji, Quanqiang Liang. // Geodesy and Geodynamics. Geodesy and Geodynamics. – 2010. – № 1(1). – P.48–56. – DOI 10.3724/SP.J.1246.2010.00048.

#### References

1. Bakushev, S.V. Geometrically and physically nonlinear mechanics of continuum: flat / S.V. Bakushev. – M.: Book House «Librokom», 2013. – 312 p.

2. Bakushev, S.V. Stresses on inclined planes for flat stress problem in polar coordinates / S.V. Bakushev, A.A. Pugachev // Modern construction issues: col. of scientific works International scientific and technical conference. – Penza: PGUAS, 2009. – P. 83–88.

3. Fadeev, E.P. Stress calculation in granular materials at plane strain condition / E.P. Fadeev, E.A. Lyamina // XXIX international conference «Engineering science and innovations. Conference of young scientists and students (MIKMUS-2017)» (Moscow, 06-08 December 2017). – M., 2017. – P. 447–450.

4. Klochkov, Y.V. Definitive relation in curvilinear coordinates of linearly elastic body in geometrically nonlinear arrangement / Y.V. Klochkov, A.P. Nikolaev, N.A. Gureeva // Izvestiya of VolgSTU. – 2014. – N 3 (150). – P. 92–94.

5. Andreevskaya, T.M. Equilibrium equations of non linear elastic body at 3D parabolical coordinates / T.M. Andreevskaya, M.N. Kirsanov // Innovation information technologies. – 2013. – N2(2). – P. 114–117.

6. Brovman, M.Y. About the choice of coordinate systems at planar deformation analysis / M.Y. Brovman // Izvestiya RAN, MTT. – 2011. – N 3. – P. 29–41.

7. Radaev, Y.N. To the theory of 3D equations of plasticity mathematical theory / Y.N. Radaev // Izvestiya RAN, MTT. – 2003. – N 5. – P. 102–121.

8. Xuyan Liu Expression of strain tensor in orthogonal curvilinear coordinates. / Xuyan Liu, Yingfeng Ji, Quanqiang Liang. // Geodesy and Geodynamics. Geodesy and Geodynamics. – 2010. – № 1(1). – P.48–56. – DOI 10.3724/SP.J.1246.2010.00048.

УДК 624.072.21

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

**Комаров Виктор Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Болдырева Ольга Вячеславовна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: boov@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

**Komarov Victor Alexandrovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Professor of the department «Building  
structures»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Boldyreva Olga Vjacheslavovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Building structures»  
E-mail: boov@yandex.ru

## СТЕРЖНЕВЫЕ МОДЕЛИ БЕТОННЫХ ПОЛОС КОНСОЛЬНЫХ ОПОР

В.А. Комаров, О.В. Болдырева

Разработаны стержневые модели сопротивления сжатию и срезу бетонных полос, расположенных между наклонными сечениями в балках с консольными опорами. Определены принципы их построения.

Выявлен характер образования и разрушения сжатых полос, особенности напряженно-деформированного состояния в зависимости от условий их работы в короткой консоли и приопорной зоне балки.

Стержневые модели сжатия и среза наклонных полос определяются с учётом характера реальной физической работы бетона в предельных состояниях.

Даны рекомендации по применению стержневых моделей при оценке прочности бетона на сжатие и срез в расчётных сечениях сжатых полос бетона.

*Ключевые слова: консольная балка, опора, опорная и грузовая площадки, условная и физическая площадки, сжатая полоса, срез, стержневые модели, принципы построения*

## ROD MODEL OF CONCRETE STRIPS OF CONSOLE SUPPORTS

V.A. Komarov, O.V. Boldyreva

Rod models of resistance to compression and shear of concrete strips located between inclined sections in beams with cantilever supports are developed. The principles of their construction are defined.

The nature of formation and destruction of compressed strips, especially the stress-strain state depending on the conditions of their work in the short console and the support zone of the beam.

Rod models of compression and cut of inclined strips are determined taking into account the nature of the real physical work of concrete in the limiting states.

Recommendations for the use of core models in the assessment of concrete compressive strength and shear in the calculated cross sections of compressed concrete strips are given.

*Keywords: cantilever beam, support, support and cargo area, conventional physical platform, compressed strip, cutting, core models, principles of construction*

Актуальной проблемой проектирования строительных конструкций является совершенствование нормативных методов их расчёта. При проектировании железобетонных конструкций особое значение имеет проблема оценки прочности бетона в сжатых полосах коротких консолей балок, работающих в условиях сложного напряжённого состояния. Недостаточные экспериментальные и теоретические исследования работы

указанных элементов являются причиной отсутствия нормативной методики их расчёта [1].

Главной особенностью напряжённо-деформированного состояния коротких консолей балок является образование концентраций главных напряжений в наклонных полосах бетона и горизонтальных поясах на участках между грузовыми (условными и физическими) и опорными площадками. В связи с этим при совершенствовании метода расчёта прочности бетона в сжатых полосах коротких консолей балок перспективной является методика расчёта по их аналоговым стержневым моделям. Она основана на копировании полей концентрации напряжений и позволяет наиболее точно описать физическую работу элементов в зоне действия поперечных сил, а также максимально эффективно использовать материал в сопротивлении конструкций.

В ПГУАС реализуется комплексная программа, целью которой является определение особенностей напряжённо-деформированного состояния самой консоли и опорной зоны балки.

Актуальность данного направления подтверждается характером сопротивления и разрушения бетона в коротких консолях балок, определяемым взаимным влиянием нормальных и касательных напряжений. Исследования направлены на изучение механизма сопротивления и разрушения бетона по сечениям сжатия и среза с помощью моделирования.

Использование математического и физического моделирования основано на методе копирования схем разрушения и комплексном подходе к оценке влияния основных факторов.

На основе полученных результатов выявлена характерная особенность сопротивления бетона для её использования при построении каркасно-стержневых моделей сжатия и среза. Такой особенностью является одновременная работа бетона по сечению сжатия между опорной и грузовыми (условными и физическими) площадками и сечению среза по граням опорной и условной (физической) грузовыми площадками [2]. При построении аналоговых стержневых моделей сжатия приняты в качестве основы известные стержневые модели.

Расчётную модель сжатой полосы бетона в консольной опоре ригеля по направлению к условной грузовой опоре предлагается рассматривать по аналогии со стержневой моделью короткой консоли балки при пролётах среза  $a < 0,9h_{01}$ . Расчётные модели сжатых полос бетона между опорной и физическими грузовыми площадками с пролётами среза  $a \leq 1,5h_{01}$  – по аналогии со стержневыми моделями коротких балок с высотой, равной рабочей высоте консоли  $h_{01}$  [2].

Расчётные аналоговые стержневые модели сопротивления сжатию наклонных полос бетона представлены на рис. 1, 2.

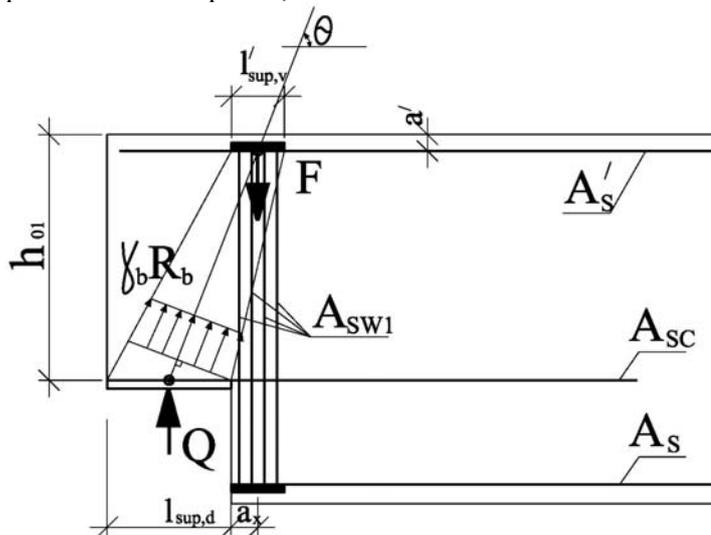


Рис. 1. Аналоговая стержневая модель сжатой полосы бетона короткой консоли балки между опорной и условной грузовыми площадками

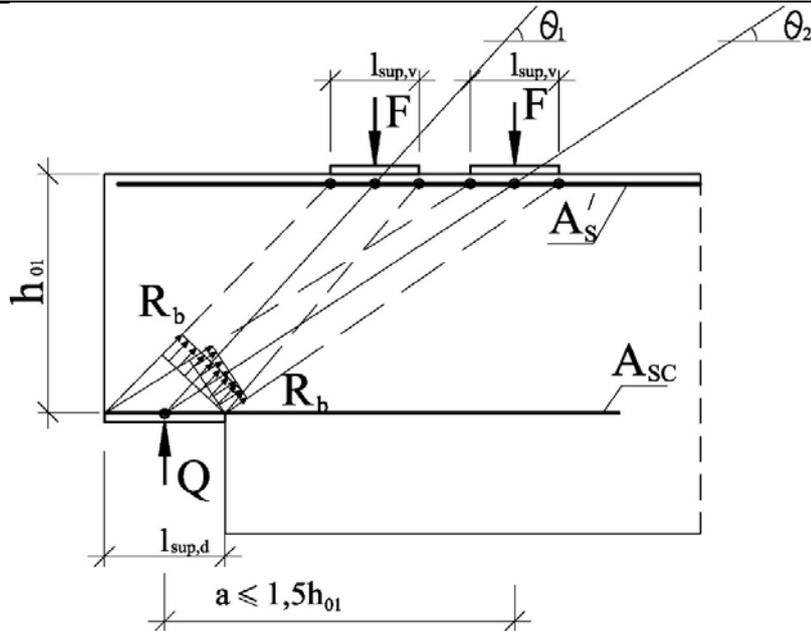


Рис. 2. Аналоговая стержневая модель сжатой полосы бетона консольной опоры по направлению к физическим грузовым площадкам при пролётах среза  $a \leq 1,5h_{01}$

Предельным состоянием расчётного сечения является достижение главными сжимающими напряжениями  $\sigma_1$  предельных значений бетона осевому сжатию  $R_b$ .

Процесс разрушения бетона в сжатой полосе между опорной и грузовой площадками в результате среза, согласно исследованиям [2], происходит в такой последовательности. Образуются граничные трещины Т-Г сдвига полосы относительно окружающего бетона. Затем увеличивается высота верхнего и нижнего клиньев, формирующихся в зонах смятия бетона под опорными и грузовыми площадками, одновременно развиваются пластические деформации (рис. 3). Боковые поверхности клиньев, сближаясь, образуют Х-образные диагональные плоскости среза сжатой полосы. Поперечные растягивающие усилия распределяются по треугольной эпюре вдоль боковых граней бетонных полос-призм (см. рис. 3).

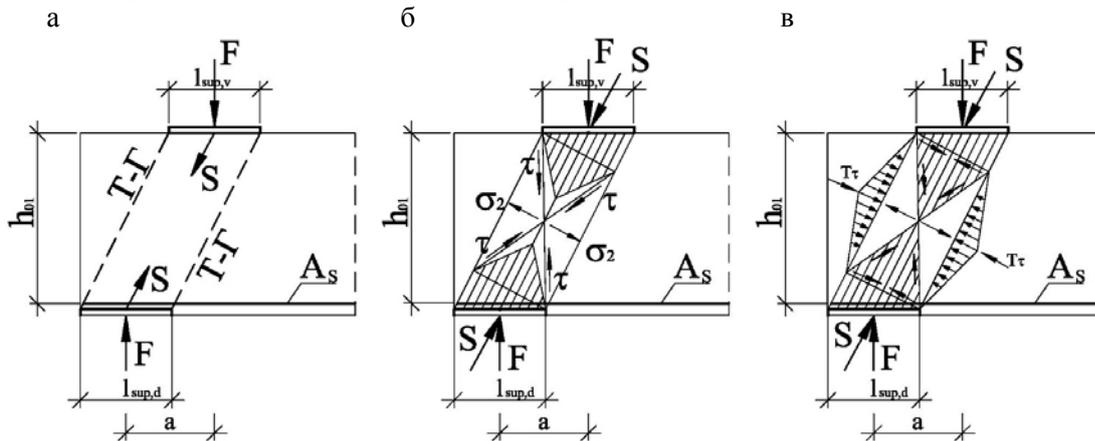


Рис. 3. Схема поэтапного сопротивления разрушения бетона сжатой полосы:  
а – схема образования трещин; б – схема формирования диагональных сечений среза;  
в – схема сопротивления бетона, окружающего расчётную бетонную полосу

При нагрузке примерно 0,8–0,85 от разрушающей происходит увеличение объёма призмы в результате активного процесса трещинообразования в бетоне полосы, сдерживающее влияние оказывает окружающий бетон. Эпюра бокового сопротивления бетона является зеркальным отражением треугольной эпюры поперечных растягивающих усилий.

Сопротивление бетона, окружающего расчётную полосу-призму, условно названо эффектом обоймы.

Разрушение сжатых полос при срезе происходит по диагональному сечению, соединяющему грани грузовой и опорной условной (физической) площадок.

Сопротивление бетона, окружающего расчётные сжатые полосы бетона, является несимметричным. Причинами являются различный характер напряжённого состояния и объём бетона, окружающего сжатые полосы с внешней и внутренней сторон. Бетон с внутренней стороны наклонной полосы испытывает растяжение, максимальное значение которого соответствует уровню расположения продольной арматуры  $A_{sc}$ .

Образование и раскрытие начальной граничной трещины происходит в результате совместного действия сдвигающих и растягивающих усилий. В дальнейшем при росте нагрузки образуются и раскрываются трещины по ширине полосы с образованием граничной трещины у края опорной площадки. В связи с тем что ординаты треугольных эпюр сопротивления окружающего бетона имеют небольшие значения, при оценке сопротивления бетона ими можно пренебречь.

При построении стержневой модели сопротивления бетона срезу в сжатой полосе СМ- $\tau$  принят принцип моделирования сопротивления срезу сжатой полосы-призмы.

Модель СМ (см. рис. 1, 2) дополняется диагональными стержнями, имитирующими срез наклонной полосы. При этом упраздняются стержни, уже входящие в СМ и имитирующие боковые грани полосы. Модель СМ- $\tau$  образуется путём замены каждого наклонного стержня в модели СМ двумя наклонными Х-образными стержнями, расположенными по направлению диагональных сечений среза сжатой бетонной полосы.

Сложная стержневая система состоит из симметрично расположенных относительно вертикальной оси ферменных аналогий сопротивления, в которых возникают растягивающие усилия среза  $S_\tau$ .

Схема аналоговой расчётной модели оценки прочности сопротивления бетона сжатию и срезу сжатых полос консольных опор над опорной площадкой по направлению к условной грузовой площадке и физическим грузовым площадкам при пролётах среза  $0,5h_{01} \leq a \leq 1,5h_{01}$  приведена на рис. 4.

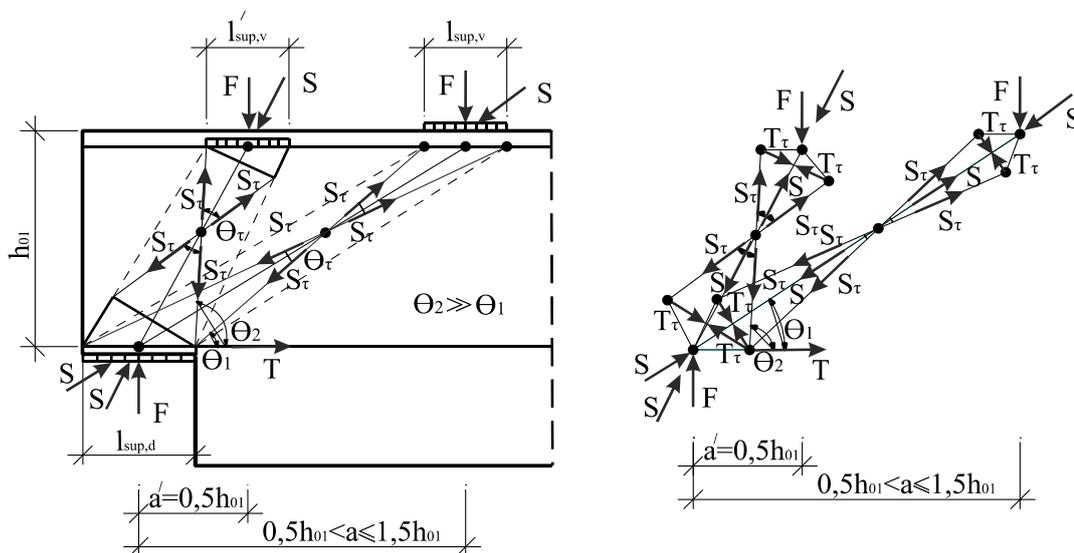


Рис. 4. Аналоговая стержневая модель сопротивления срезу бетона наклонной полосы при пролётах среза  $0,5h_{01} \leq a \leq 1,5h_{01}$

Предельным состоянием расчётного сечения является достижение максимальными касательными напряжениями предельных значений  $\tau_u = \gamma_\tau R_{bt}$ .

Анализируя модели, описывающие сжатие и срез наклонных бетонных полос над опорной площадкой консольной опоры балки для характерных случаев, когда пролёт среза достигает минимального и максимального значений, можно сделать вывод: с

увеличением пролёта среза до  $a=1,5h_{01}$  определяющим является сопротивление бетонной полосы сжатию. Причина заключается в том, что ширина наклонной сжатой полосы минимальна при максимальной длине сечения среза. С уменьшением пролёта среза до минимального ( $a=0,5h_{01}$ ) границей возможного среза является случай, когда диагональ среза сжатой полосы совпадает с высотой консольной опоры балки. В этом случае грани грузовых и опорных площадок совпадают по вертикальному сечению. При этом возможно разрушение сжатой полосы от сжатия, а также в результате среза. Такое положение предполагает одновременное использование моделей сжатия и среза при определении прочности бетона в расчётных сечениях наклонных сжатых полос.

#### Вывод

Разработаны стержневые модели сжатия и среза наклонных бетонных полос, основанные на полученной схеме разрушения между опорной и грузовыми площадками.

#### Список литературы

1. СП 63.13330. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. – М., 2012.
2. Баранова, Т.И. Теория расчета железобетонных конструкций на основе аналоговых каркасно-стержневых моделей / Т.И. Баранова, Ю.П. Скачков. – М.: Изд-во «Спутник+», 2011. – 224 с.
3. Комаров, В.А. Оценка прочности бетона ригелей с подрезкой многоэтажных каркасов / В.А. Комаров, О.В. Болдырева // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2016. – №4. – С.6–9.
4. Комаров, В.А. Прочность сжатых полос бетона консольных опор ригелей с подрезкой / В.А. Комаров, О.В. Болдырева // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3(32). – С.105–112.
5. Комаров, В.А. Прочность бетона в сжатом силовом потоке короткой консоли ригеля с подрезкой / В.А. Комаров // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2018. – №4. – С.15–19.

#### References

1. SP 63.13330. Concrete and reinforced concrete structures without prestressing reinforcement. – M., 2012.
2. Baranova, T.I. Theory of calculation of reinforced concrete structures based on analog frame-and-rod models / T.I. Baranova, Yu.P. Skachkov. – M.: Publishing House «Sputnik+», 2011. – 224 p.
3. Komarov, V.A. Assessment of the strength of concrete slits with the cutting of multistory frames / V.A. Komarov, O.V. Boldyrev // Construction mechanics and calculation of structures. – 2016. – №4. – P. 6–9.
4. Komarov, V.A. Strength of compressed strips of concrete cantilever supports of the girders with trimming / V.A. Komarov, O.V. Boldyrev // Regional architecture and engineering. – 2017. – №3 (32). – P. 105–112.
5. Komarov, V.A. Strength of concrete in the short console of the beam with cutting / V.A. Komarov // Construction mechanics and calculation of structures. – 2018. – №4. – P. 15–19.

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  
кафедры «Технологии строительных  
материалов и деревообработки»  
E-mail: vabereg@rambler.ru

**Скачков Юрий Петрович,**  
доктор технических наук, профессор кафедры  
«Строительные конструкции», ректор  
E-mail: office@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 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 of the  
department «Technology of building materials  
and wood processing»  
E-mail: vabereg@rambler.ru

**Skachkov Yuri Petrovich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Building structures», Rector  
E-mail: office@pguas.ru

## ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЖАРКОГО И ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

А.М. Береговой, В.А. Береговой, Ю.П. Скачков

Исследован комплекс теплотехнических показателей наружного ограждения, способствующий установлению комфортного микроклимата помещений и обеспечивающий снижение тепловой потребности здания в различных климатических условиях. Показано, что наружные ограждающие конструкции с большой теплоаккумулирующей способностью или относительно проницаемой капиллярно-пористой структурой материала могут с большим эффектом использоваться в условиях значительных колебаний температуры воздуха и резких похолоданий, а также при интенсивной солнечной радиации.

*Ключевые слова: наружные ограждения, теплотехнические свойства, климатические условия, теплоаккумулирующая способность, капиллярно-пористая структура материала*

## THERMOTECHNICAL PROPERTIES OF EXTERNAL ENCLOSURE STRUCTURES IN THE CONDITIONS OF HOT AND COLD CLIMATE

A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy, Y.P. Skachkov

The complex of thermo technical indicators of the external enclosures is investigated, which contributes to the establishment of a comfortable microclimate of the apartments and ensures the reduction of the thermal demand of the building in different climatic conditions. It is shown that external enclosing structures with a large heat-accumulating capacity or a relatively permeable capillary-porous structure of the material can be used with great effect in conditions of significant fluctuations in air temperature and sharp cooling, as well as in intense solar radiation.

*Keywords: external enclosure, thermotechnical properties, climatic conditions, heat-accumulating capacity, capillary-porous structure of the material*

Теплотехнические показатели наружных ограждающих конструкций энергоэффективного здания должны обеспечивать минимальный расход энергоресурсов на формирование комфортного микроклимата помещений. При этом большое влияние на выбор этих показателей оказывают климатические факторы района строительства, а также

особенности режима отопления здания. В работах [1, 2] рассматриваются вопросы повышения тепловой защиты наружных ограждений при прерывистом отоплении.

В условиях холодного и умеренного климата здания испытывают дефицит тепла, тогда как на территориях теплого и жаркого климата ощущается дефицит холода. Способ повышения тепловой защиты наружной оболочки здания за счет значительного увеличения ее сопротивления теплопередаче не всегда получается эффективным, так как он не исключает возможность перегрева помещений при интенсивной солнечной радиации и их сравнительно быстрого охлаждения на территориях с холодным климатом в случае аварийного отключения системы отопления здания.

Борьба с перегревом внутренней среды здания в условиях жаркого климата обычно проводится с помощью инженерной системы кондиционирования воздуха, однако этот путь формирования комфортного микроклимата помещений не вполне отвечает требованиям, предъявляемым к энергоэффективному зданию, так как он повышает расход энергоресурсов. Для предотвращения интенсивного охлаждения помещений, огражденных «легкими» элементами наружной оболочки здания, необходимо оснастить его надежно функционирующей системой отопления, исключающей случаи ее выхода из строя, особенно в периоды резкого похолодания. Однако такой подход не вполне оправдан для многих зданий с централизованным теплоснабжением из-за плохого состояния теплотрасс.

В поставленную задачу исследования входила оценка комплекса теплотехнических показателей наружного ограждения, способствующего установлению комфортного микроклимата помещений и обеспечивающего снижение тепловой потребности здания в различных климатических условиях.

Опыт эксплуатации зданий показывает, что в условиях окружающей среды, отличающихся значительными колебаниями температуры, интенсивности солнечной радиации и периодами резких похолоданий с большим эффектом используются наружные ограждающие конструкции, имеющие большую теплоаккумулирующую способность (объемную теплоемкость  $C_0 \cdot \gamma$ , кДж / (м<sup>3</sup>·°С)) или такую капиллярно-пористую структуру материала, которая позволяет регулировать в сравнительно широком диапазоне протекающие в них процессы массопереноса (воздухо- и паропроницаемости). Такие конструкции можно рассматривать как надежно функционирующую систему регулирования микроклимата помещений, позволяющую минимизировать амплитуду колебания температуры внутреннего воздуха, снизить расход тепловой энергии на отопление помещений, формировать в них более стабильный тепловой режим и воздухообмен.

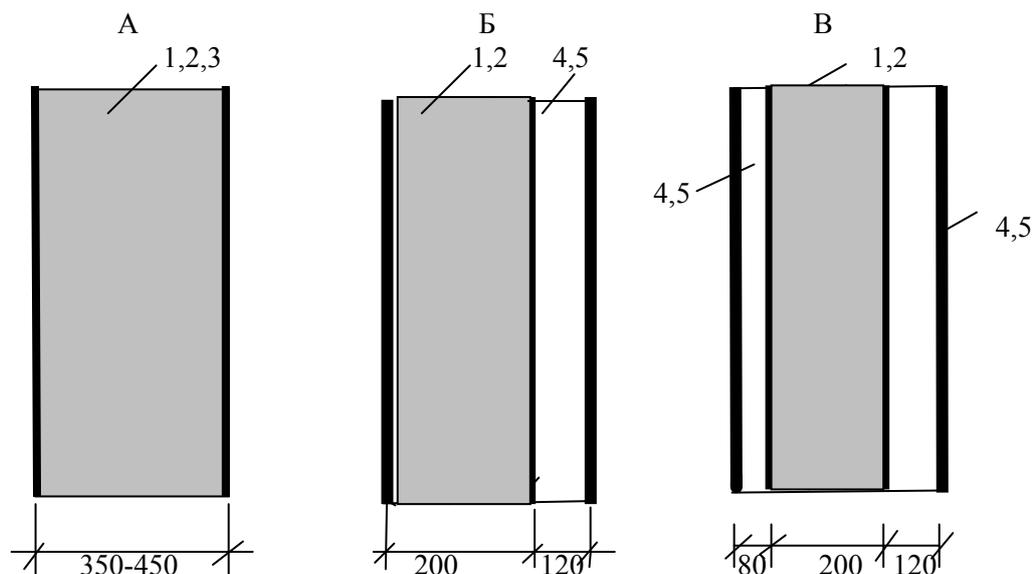
Задача по разработке составов некоторых видов таких материалов и их использованию в конструкциях наружных ограждений была решена в Пензенском ГУАС. Среди них тяжелый композит, неавтоклавный ячеистый бетон, пеноарболитобетон, пенокерамобетон – материалы с сильно различающимися значениями плотности и коэффициентами теплопроводности  $\lambda$ . В табл. 1 приведены теплотехнические показатели разработанных и некоторых других материалов.

Т а б л и ц а 1

Теплотехнические показатели разработанных материалов

Строительные материалы	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·°С)	$C_0$ , кДж/(кг·°С)	$C_0 \cdot \gamma$ , кДж/(м <sup>3</sup> ·°С)
Материалы с большой объемной теплоемкостью				
Композит на полимерном и цементном вяжущем с наполнителем из отходов свинцово-содержащего стекла	4 000	0,32...0,45	0,5	2 000
Тяжелый бетон	2 000	1,9	0,84	1 680
Кирпич глиняный	1 800	0,7	0,88	1584
Материалы, позволяющие регулировать процессы массопереноса в наружных ограждениях				
Неавтоклавный ячеистый бетон	300	0,08	0,84	252
Пеноарболитобетон с наполнителем из соломы	200	0,06	2,3	460
	400	0,07	2,3	920

На рисунке показаны конструктивные схемы наружных ограждений из строительных материалов, разработанных в ПГУАС.



Конструктивные схемы наружных стен:

А – однослойные; Б – двухслойные; В – трехслойные

(1 – ячеистый бетон; 2 – пеноарболитобетон; 3 – пенокерамика; 4 – тяжелый композит; 5 – тяжелый или легкий бетон)

Разработанные составы тяжелого композита с наполнителем из отходов свинцово-содержащего стекла, предназначенные для использования в наружных конструкциях зданий для защиты от радиации, имеют большие значения объемной теплоемкости, тепловой инерции и теплоаккумулирующей способности. Их удельная теплоемкость  $C_0$ , кДж/(кг·°C), сравнительно невелика, однако благодаря высокой плотности материала показатель  $C_0 \cdot \gamma$  у них больше, чем у таких хорошо известных материалов, как тяжелый бетон и глиняный кирпич плотностью соответственно 2 000 кг/м<sup>3</sup> и 1 800 кг/м<sup>3</sup> (см. табл. 1). Результаты измерений показали, что, несмотря на высокую плотность, полученные композиты отличаются небольшим коэффициентом теплопроводности ( $\lambda = 0,25 \dots 0,5$  Вт/(м·°C)), сравнимым с показателем  $\lambda$  ячеистых бетонов плотностью 600...900 кг/м<sup>3</sup>.

Такое уникальное сочетание теплотехнических и защитных свойств полученного композита в комбинации со слоем утеплителя низкой плотности позволяет обеспечить интенсивное затухание амплитуды колебаний температуры  $A_t$  в ограждении, защиту внутренней среды проживания на территориях с радиоактивным фоном облучения, а также препятствует быстрой потере тепла композиционным материалом, аккумулирующим его при росте величины теплового потока.

В условиях жаркого климата большая теплоаккумулирующая способность наружных ограждающих конструкций, обеспечивающая снижение показателя  $A_t$ , а также их низкая теплопроводность дают возможность существенно снизить перегрев помещений.

Этот вывод подтверждают исследования ряда зарубежных специалистов, установивших, что, во-первых, тепловая инерция, связанная с теплоаккумулирующей способностью ограждений, имеет важное значение для условий теплого и жаркого климата, а во-вторых, здание с хорошим уровнем теплоизоляции, но имеющее при этом малую тепловую инерцию, может оказаться совершенно непригодным для проживания в условиях жаркого климата.

Второй тип материалов, полученных из ячеистого бетона, пеноарболитобетона, пенокерамобетона, имеет ряд положительных эксплуатационных характеристик:

– достаточную тепловую инерцию;

– хорошие прочностные и теплоизоляционные свойства;  
 – относительно проницаемую капиллярно-пористую структуру, что позволяет регулировать протекающие в ней процессы массопереноса.

Величина тепловой инерции  $D$  этих материалов, аналоги которых широко используются в однослойных конструкциях наружных стен, способствует формированию стабильного теплового режима помещений. Это особенно важно при применении таких конструкций в зданиях, эксплуатируемых на территориях с холодным климатом, где эти процессы приобретают более интенсивный характер. В табл. 2 [3] показано, что максимальные тепловые потери  $Q^{\max}$  в период резкого похолодания через наружные стены оказываются тем больше, чем меньше их тепловая инерция  $D$ .

Величина  $Q_N^{\max}$  находилась по формуле В.Н. Богословского:

$$Q_N^{\max} = [(t_b - t_n) \cdot n \cdot F_N \cdot \eta_N / R_{N,пр}] + \Delta Q_N, \quad (1)$$

где  $Q_N^{\max}$  – величина теплотерь в начале периода резкого похолодания, а  $\Delta Q_N$  – дополнительные теплотери, зависящие от величины  $D$ ,

$$\Delta Q_N = \psi_N \cdot A_{тн} \cdot n_N \cdot F_N (\Delta Z_{р.п.} - \Delta Z_N) / \Delta Z_{р.п.} \cdot R_{N,пр}. \quad (2)$$

В первой графе табл. 2 значения  $Q^{\max}$  и  $D$  даны для наружной стены из полученного ячеистого бетона.

Т а б л и ц а 2

Максимальные тепловые потери  $Q^{\max}$ , Вт/м<sup>2</sup>, через наружные стены с сопротивлением теплопередаче  $R = 3,57 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$

Величина тепловой инерции $D$	2,39	1,73	1,17	0,70
Максимальные тепловые потери $Q^{\max}$	10,95	12,27	13,45	14,44

Особенности капиллярно-пористой структуры второго типа полученных материалов позволяют в стадии проектирования наружных ограждающих конструкций регулировать потоки тепла, пара и воздуха, протекающие через толщу наружных ограждений. В [4–6] по результатам моделирования дана оценка эффекту энергосбережения и процессам тепломассопереноса в процессе эксфильтрации и инфильтрации воздуха через наружные ограждения.

Таким образом, на примере конструкций ограждений из строительных материалов, изготовленных в Пензенском ГУАС, исследован комплекс теплотехнических показателей, способствующий формированию комфортного микроклимата помещений и обеспечивающий снижение тепловой потребности здания, эксплуатируемого в различных климатических условиях.

В условиях жаркого климата большая теплоаккумулирующая способность, а также низкая теплопроводность наружных ограждений с использованием изготовленного тяжелого композита обеспечивают существенное уменьшение амплитуды колебаний температуры в массиве ограждения и дают возможность снизить перегрев помещений. В условиях холодного климата полученные конструкционно-теплоизоляционные пеноматериалы, обладающие достаточной тепловой инерцией и относительно проницаемой капиллярно-пористой структурой, позволяют регулировать протекающие в них процессы тепломассопереноса.

### Список литературы

1. Вытчиков, Ю.С. Оптимизация выбора уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий, эксплуатируемых в условиях прерывистого отопления / Ю.С. Вытчиков, М.Е. Сапарёв, А.А. Чулков // Промышленное и гражданское строительство. – М., 2017. – №3. – С. 90–93.

2. Малявина, Е.Г. Влияние теплового режима наружных ограждающих конструкций на нагрузку системы отопления при прерывистой подаче теплоты / Е.Г. Малявина, Р.Р. Асатов. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n> (дата обращения: 06.09.2018).
3. Береговой, А.М. Архитектурно-строительные аспекты экономии тепла в регулируемой энергосистеме жилой застройки / А.М. Береговой, А.П. Прошин, В.А. Береговой [и др.] // Известия Вузов. Строительство. – 2004. – № 7. – С. 91–97.
4. 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.
5. 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.
6. 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](http://www.science-education.ru/121-17257) ( дата обращения: 04.02.2015).

### References

1. Vythchikov, Yu.S. Optimization of the choice of the level of thermal protection of the enclosing structures of buildings operated in conditions of intermittent heating / Yu.S. Vythchikov, M.E. Saparev, A.A. Chulkov // Industrial and civil construction. – M., 2017. – No. 3. – P.90–93.
2. Malyavina, E.G. Influence of thermal conditions of external enclosing structures on the load of the heating system with intermittent supply of heat / E.G. Malyavina, R.R. Asatov. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n> (reference date: 06/09/2018).
3. Beregovoy, A. M. Architectural aspects of heat saving in a regulated power system for residential buildings / A. M. Beregovoy A. P. Proshin, V.A. Beregovoy //News of higher educational institutions. Construction. – 2004. – № 27. – P. 91–97.
4. Beregovoy, A.M. The effect of energy saving in the 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. – С. 140–144.
5. Beregovoy, A.M. Evaluation of heat losses during exfiltration of air through the porous structure of the material of the enclosing structure /A.M. Beregovoy, M.A. Derina, V.A. Beregovoy, A.V. Maltsev // Regional architecture and engineering.–2014.–No.2.– P. 79–83.
6. Beregovoy, A.M. Exterior enclosing structures in the system of air residential multi-storey 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) (date of circulation: 04.02.2015).

УДК 624.074.2.011

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

**Миряев Борис Васильевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: miryaevbv@gmail.com

**Городнов Игорь Игоревич**,  
студент  
E-mail: feelpain28@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

**Miryaev Boris Vasilyevich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Building constructions»  
E-mail: miryaevbv@gmail.com

**Gorodnov Igor Igorevich**,  
student  
E-mail: feelpain28@yandex.ru

## КУПОЛЬНОЕ ПОКРЫТИЕ ЖИЛОГО ДОМА

Б.В. Миряев, И.И. Городнов

Дается описание экспериментального купола с узлами новой конструкции. Приводятся результаты испытаний купола и двух вариантов узлов. Установлено, что деформации обычных узлов значительно увеличивают прогибы покрытия. Предложенная конструкция узла с полимерцементным раствором повышает жесткость купола и снижает трудоемкость его изготовления.

*Ключевые слова: сетчатый деревянный купол, жилой дом, узлы, испытания, полимерцементный раствор*

## THE DOME ROOF OF A RESIDENTIAL BUILDING

B.V. Miryaev, I.I. Gorodnov

The description of an experimental dome with nodes of new design is given. The results of tests of the dome and two variants of the nodes are presented. It is determined that the deformation of regular nodes significantly increases the deflection of a dome. The proposed design of the node with polymer-cement mortar increases rigidity of a dome and reduces complexity of its manufacturing.

*Keywords: reticulate wooden dome, residential building, nodes, tests, polymer-cement mortar*

Купола-оболочки по сравнению с традиционными сооружениями прямоугольной формы обладают рядом несомненных преимуществ:

- теплотери сферических зданий при всех прочих равных условиях на 20–30 % меньше, чем у традиционных прямоугольных;
- при действии ветровой и снеговой нагрузок в элементах купола возникают существенно меньшие усилия, чем в элементах традиционных зданий, за счет обтекаемой формы и меньшего аэродинамического сопротивления;
- купола-оболочки из легких материалов относятся к наиболее сейсмостойким сооружениям;
- малая масса и небольшие размеры сборных элементов позволяют доставлять такие конструкции авиацией в самые удаленные районы и быстро монтировать их вручную.

В последнее время за рубежом и в России при возведении жилых домов все чаще используются малопролетные деревянные купола [1, 2]. Как правило, многогранная поверхность таких покрытий является частью 180-гранника, образованного на основе икосаэдра. Несущий каркас купола собирается из деревянных ребер, на концах которых прикреплены стальные оцинкованные пластины, позволяющие соединять ребра с центральной узловой деталью в виде стальной трубы. После сборки каркаса к ребрам прикрепляются обшивки и производятся все последующие строительные работы. К недостаткам такой конструкции относится повышенный расход стали и, как

следствие, наличие в узлах «мостиков холода», которые могут вызвать интенсивное образование конденсата. Кроме того, при возведении купола большая часть работ выполняется на строительной площадке под открытым небом, что приводит к существенному увеличению сроков строительства. Подобных недостатков лишены купола, собираемые из треугольных панелей с лобовым упором в узлах. Но этим куполам присущи свои недостатки. Элементы панелей имеют сложную конфигурацию и при их изготовлении необходимо соблюдать высокую точность. Кроме того, передача усилий с одной панели на другую осуществляется через скошенные торцы ребер, что приводит к повышенной деформации всего покрытия в целом. Об этом свидетельствуют результаты испытаний крупномасштабной модели купольного покрытия универсального павильона [3].

Авторами разработано купольное покрытие быстровозводимого жилого дома с новым конструктивным решением узлов (рис. 1). В центральной части узлов такого купола располагается вставка из полимерцементного раствора или фибробетона, благодаря чему повышается прочность узла и снижается его деформативность. Кроме того, существенно уменьшается трудоемкость изготовления панелей, т.к. значительно упрощается конструкция ребер и снижаются требования к точности их изготовления.



Рис. 1. Общий вид дома с купольным покрытием

Купольное покрытие дома пологое, высотой 1,5м, собирается из 54 треугольных панелей 5 типоразмеров. По периметру каждой панели располагаются деревянные бруски, к которым прикрепляются обшивки. Наружная обшивка выполняется из бакелизированной фанеры толщиной 5мм, внутренняя обшивка – из фанеры ФК толщиной 4мм. Соединение панелей осуществляется на болтах.

Для проверки работы разработанных узлов была изготовлена и испытана экспериментальная купольная конструкция в масштабе 1:2,5. Купол диаметром 3300 мм собирался из 54 треугольных панелей (рис. 2). Обрамление панелей выполнено из деревянных брусков сечением 15×30 мм. Две фанерные обшивки были заменены одной верхней обшивкой, изготовленной из ДВП марки Т толщиной 3,2 мм. Такой подход позволил существенно упростить конструкцию экспериментального купола. С нижней стороны панели деревянные бруски соединялись между собой треугольными фанерными накладками толщиной 4 мм при помощи клея и шурупов 2,5×15. Изготовление панелей производилось с помощью кондукторов-шаблонов, благодаря чему отклонение фактических размеров от проектных не превысило 1,5 мм.

Исследование экспериментального купола проводилось в два этапа. На первом этапе были изготовлены панели обычной конструкции, когда передача усилий с одной панели на другую осуществлялась с помощью простого лобового упора. После проведения статических испытаний конструкция была разобрана. На втором этапе все углы

панелей (кроме расположенных по периметру) были отпилены в соответствии с новым конструктивным решением узлов. После завершения сборки купола отверстия, образовавшиеся в его узлах, были заполнены полимерцементным раствором (ПЦР) с добавлением ПВА. Такой подход позволил определить влияние предложенного конструктивного решения узлов на напряженно-деформированное состояние купола в целом.



Рис. 2. Экспериментальная купольная конструкция

Нагружение купола осуществлялось с помощью чугунных грузов. Нагрузка от грузов передавалась через систему траверс и тяг на 2 точки каждого из 72 ребер исследуемого покрытия. Максимальная нагрузка в пересчете на один узел составила 345Н. Продольные деформации 18 ребер определялись с помощью 33 активных тензодатчиков с базой 20мм (рис. 3). Вертикальные прогибы измерялись прогибомерами БПАО.

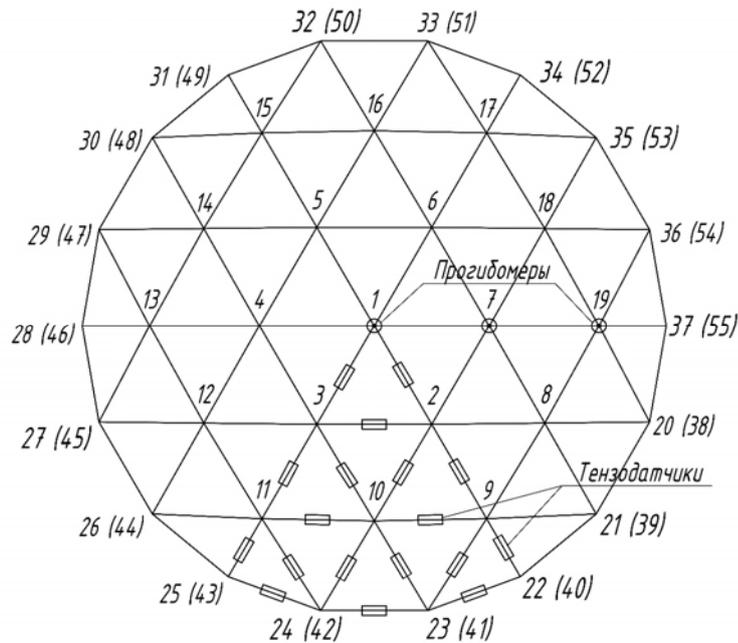


Рис. 3. Схема расстановки приборов

Одновременно с испытаниями купола проводились экспериментальные исследования узлов: сжатого и растянутого. Сжатый узел собирался из 6 одинаковых угловых

фрагментов панелей (рис. 4). Исследование этого узла так же, как и исследование покрытия, осуществлялось в два этапа. На первом этапе сжимающие усилия передавались с одного фрагмента узла на другой посредством лобового упора. На втором этапе углы фрагментов были отпилены, и центральная часть узла была заполнена полимерцементным раствором (рис. 5). Растянутый узел отличался от сжатого большей длиной двух ребер, к которым прикреплялись грузовые подвески.

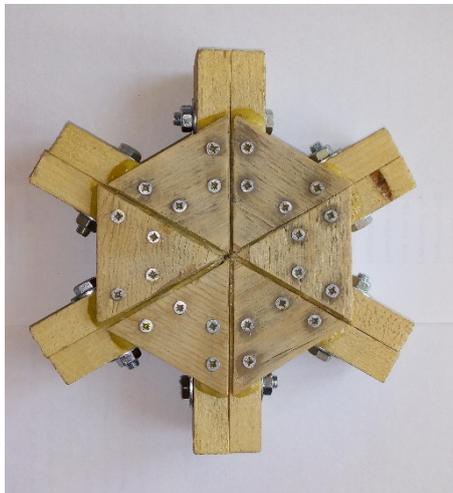


Рис. 4. Узел с лобовым упором

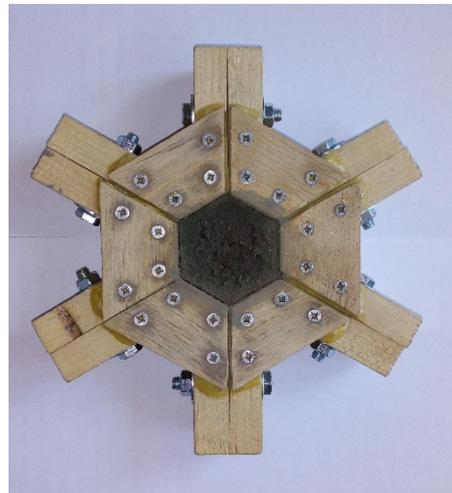


Рис. 5. Узел с вставкой из полимерцементного раствора

Деформации узлов измерялись с помощью двух индикаторов часового типа. Нагружение узлов осуществлялось с помощью рычажных устройств. Испытания купола и узлов проводились при одинаковом временном режиме. Показания приборов за время одной ступени нагружения снимались дважды: сразу после приложения очередной порции нагрузки и непосредственно перед следующей порцией. На рис. 6 представлены графики деформаций узлов в зависимости от нагрузки.

Сжатый узел при первом и втором вариантах исполнения характеризуется почти линейными зависимостями деформаций от нагрузки в стадии нагружения. Деформативность узла с центральной вставкой из полимерцементного раствора оказалась значительно меньше деформативности узла с лобовым упором.

Зависимость деформаций от нагрузки для растянутого узла имеет явно нелинейный характер, а величина деформации растяжения более чем в 2 раза превысила величину деформаций сжатия. Это объясняется тем, что передача растягивающих усилий с одного фрагмента узла на другой осуществлялась поперек волокон древесины через шайбы, имеющие сравнительно небольшие площади. На первых двух этапах нагружения растянутого узла наблюдался быстрый рост деформаций. На последующих этапах рост деформаций замедлялся, что, очевидно, вызвано самоупрочнением древесины в зоне контакта с шайбами.

Расчет экспериментального купольного покрытия выполнялся шаговым методом. На нулевом шаге расчет производился в линейной постановке без учета деформации узлов на нагрузку, соответствующую одному этапу нагружения. Для каждого стержня длиной  $l$  в зависимости от полученного усилия определялись абсолютная деформация древесины  $\delta_E$  при  $E=11700\text{МПа}$ , абсолютная деформация узла  $\delta_Y$  в соответствии с рис. 6 и комплексный эквивалентный модуль деформации

$$E_{\text{экв}} = \frac{Nl}{A(\delta_E + \delta_Y)}.$$

На первом шаге расчета купола жесткости стержней были определены с учетом полученных эквивалентных модулей деформаций. На втором и последующих шагах расчета жесткости стержней корректировались в зависимости от текущих значений

деформаций узлов. На рис. 7 показаны графики прогибов первого узла купола в зависимости от величины нагрузки, в таблице приведены экспериментальные и теоретические значения усилий в стержнях.

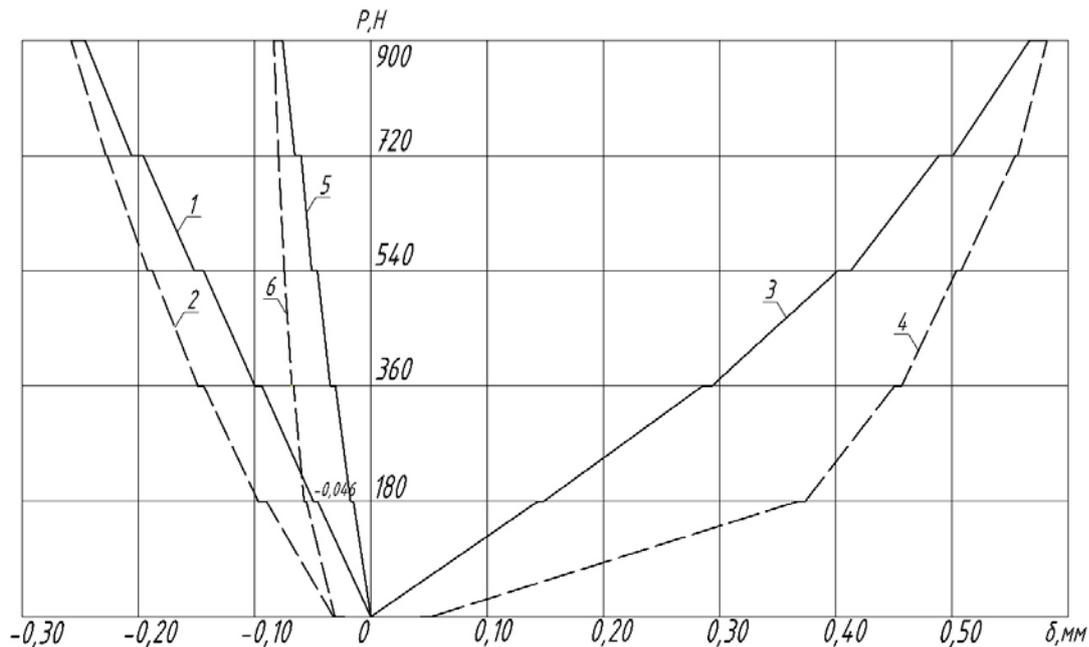


Рис. 6. Деформации узлов в зависимости от нагрузки:

- 1 – сжатие (узел с лобовым упором; стадия нагружения);
- 2 – сжатие (узел с лобовым упором; стадия разгрузки);
- 3 – растяжение (узел с лобовым упором; стадия нагружения);
- 4 – растяжение (узел с лобовым упором; стадия разгрузки);
- 5 – сжатие (узел с вставкой из ПЦР; стадия нагружения);
- 6 – сжатие (узел с вставкой из ПЦР; стадия разгрузки)

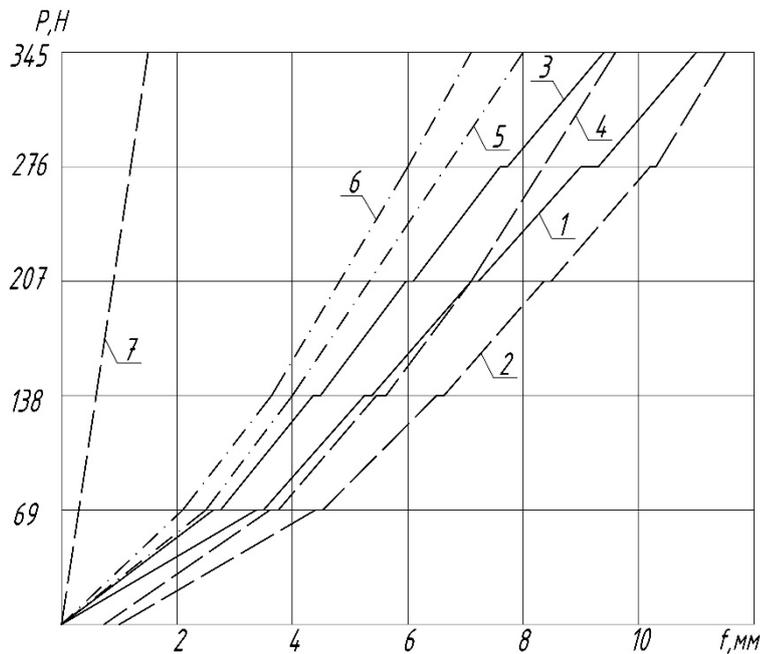


Рис. 7. Прогибы узла 1 в зависимости от нагрузки:

- 1 – сжатие (узел с лобовым упором; стадия нагружения);
- 2 – сжатие (узел с лобовым упором; стадия разгрузки);
- 3 – растяжение (узел с лобовым упором; стадия нагружения);
- 4 – растяжение (узел с лобовым упором; стадия разгрузки);
- 5 – сжатие (узел с вставкой из ПЦР; стадия нагружения);
- 6 – сжатие (узел с вставкой из ПЦР; стадия разгрузки)
- 7 – сжатие (узел с лобовым упором; стадия нагружения)

## Значения усилий в стержнях купола

№ стержня	Узлы с лобовым упором					Узлы с полимерцементным раствором				
	Усилия в ребрах, Н			Расхождение, %		Усилия в ребрах, Н			Расхождение, %	
	Экспериментальные	Теоретические		Без учета жесткости узлов	С учетом жесткости узлов	Экспериментальные	Теоретические		Без учета жесткости узлов	С учетом жесткости узлов
		Без учета жесткости узлов	С учетом жесткости узлов				Без учета жесткости узлов	С учетом жесткости узлов		
1-2	-565	-535	-535	5	5	-560	-535	-535	4	4
2-3	-586	-525	-525	10	10	-580	-525	-526	9	9
2-10	-510	-545	-546	7	7	-520	-545	-550	5	5
2-9	-580	-555	-556	4	4	-590	-555	-547	6	7
9-10	-357	-417	-417	17	17	-360	-417	-406	16	13
9-22	-815	-785	-784	4	4	-810	-785	-776	3	4
9-23	-244	-289	-289	18	18	-260	-289	-280	11	7
10-23	-580	-600	-588	3	1	-580	-600	-600	3	3
22-23	2090	2010	2004	4	4	2070	2010	1977	3	4
23-24	2150	2010	2008	7	7	2120	2010	1987	5	6

В результате исследования купола и его узлов установлено, что конструкция узлов оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние покрытия. При узлах с лобовым упором вертикальные перемещения узлов в несколько раз превышают теоретические значения, вычисленные по линейному расчету без учета деформаций узлов.

Учет деформаций узлов позволяет значительно сократить расхождение между теоретическими и экспериментальными данными, однако и в этом случае прогибы покрытия оказались на 26 % больше расчетных. Это расхождение вызвано, очевидно, тем обстоятельством, что в куполе практически невозможно обеспечить идеального сопряжения панелей, поэтому деформации узлов в покрытии будут выше деформации отдельно изготовленного узла.

Испытания узла и купола с вставками из полимерцементного раствора показали, что жесткость узла и всего покрытия значительно возрастают, причем расхождение между расчетными и экспериментальными прогибами не превышает 22 %. Это указывает на то, что при таком конструктивном решении узла влияние точности изготовления элементов на напряженно-деформированное состояние купола снижается.

Учет деформаций узлов приводит к незначительному перераспределению усилий в стержнях приопорной зоны. Так, изменение усилий в стержнях 10-23 и 22-23 не превышает 4 %.

## Выводы

1. В результате экспериментального исследования узлов различных видов получены зависимости деформации узлов от нагрузки. Для сжатых узлов зависимости имеют линейный характер, для растянутого узла на первых трех этапах нагружения зависимость нелинейна.

2. Деформации узлов значительно увеличивают прогибы купольного покрытия и приводят к небольшому перераспределению усилий в приопорной зоне.

3. Предложенная конструкция узла с центральной вставкой из полимерцементного раствора значительно увеличивает жесткость покрытия и существенно снижает трудоемкость изготовления панелей за счет более простой конструкции узла.

### Список литературы

1. Миряев, Б.В. Обзор печатных статей и сайтов по малопролетным купольным покрытиям / Б.В. Миряев, А.Б. Миряева // Безопасность и эффективность строительных конструкций: сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГУАС, 2015. – С. 96–98.
2. Караулова, Т.С. Жизнь под куполом / Т.С. Караулова // Новый дом. – 2012. – №1. – С. 102–107.
3. Миряев, Б.В. Экспериментальное исследование модели полусферического сетчатого купола / Б.В. Миряев, С.А. Толушов, Д.С. Сюзюмов // Изв. вузов. Строительство. – 2016. – №9. – С. 103–111.

### References

1. Miryaev, B.V. Review of published articles and web sites on the topic of minor-span domical surfaces / B.V. Miryaev, A.B. Miryaeva // Safety and efficiency of building constructions: digest of articles of the international scientific-technical conference. – Penza: PGUAS, 2015. – P. 96–98.
2. Karaulova, T.S. Life under the dome / T.S. Karaulova // New house. – 2012. – №1. – P. 102–107.
3. Miryaev, B.V. Experimental research of model of hemispherical mesh dome / B.V. Miryaev, S.A. Tolyshov, D.S. Syuzuymov // News of Higher Educational Institutions. Construction. – 2016. – №9. – P. 103–111.

# 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

**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

**Аверкин Александр Григорьевич,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: algraw@mail.ru

**Родионов Юрий Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор,  
директор автомобильно-дорожного  
института  
E-mail: rodionov@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

**Eremkin Alexander Ivanovich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Heat and  
ventilation»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

**Filchakina Irina Nikolaevna,**  
Candidate of Sciences,  
Associate Professor of the department «Heat  
and Ventilation»  
E-mail: filchakina80@mail.ru

**Averkin Aleksander Grigorievich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Heat and Ventilation»  
E-mail: algraw@mail.ru

**Rodionov Yurii Vladimirovich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Director of Automobile Engineering Institute  
E-mail: rodionov@pguas.ru

## МЕТОДИКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ С ОППОЗИТНЫМИ ЩЕЛЕВИДНЫМИ НАСАДКАМИ

А.И. Ерёмкин, И.Н. Фильчакина, А.Г. Аверкин, Ю.В. Родионов

Предложена инженерная методика аэродинамического расчета для новой конструкции воздухораспределителя равномерной подачи приточного воздуха с оппозитными щелевидными насадками. Достигнуты требуемая степень затухания и равномерная скорость приточной струи по всей длине конструкции на выходе в обслуживаемую зону помещения.

*Ключевые слова: методика аэродинамического расчета, воздухораспределитель, гашение приточной струи воздуха, кондиционирование предприятий текстильной промышленности*

## METHOD OF AERODYNAMIC CALCULATIONS OF AIR DISTRIBUTOR WITH OPPOSITE SANDWICH VESSELS

A.I. Eremkin, I.N. Filchakina, A.G. Averkin, Y.V. Rodionov

An engineering method of for aerodynamic calculation for a new design of an air distributor for uniform supply of fresh air with opposing slit-shaped nozzles is proposed. The design solves the problem of obtaining the high degree of attenuation and uniform velocity of the supply jet over its entire length at the outlet to the served area of the room.

*Keywords: method of aerodynamic calculation, air distributor, damping of air stream supply, textile industry enterprises conditioning*

### Введение

Разработкой воздухораспределителей для предприятий текстильной промышленности занимались многие исследователи в области технологического кондиционирования воздуха. Проведен анализ [1] существующих конструкций воздухораспределительных устройств, который позволил выявить ряд присущих им недостатков, а именно: значительные габариты; недостаточная степень затухания скорости приточной струи на выходе; невозможность поддержания равномерности требуемых параметров микроклимата ( $t$ ,  $v$ ,  $\varphi$ ) в обслуживаемой зоне помещения; невозможность подачи больших объемов приточного воздуха с малыми скоростями в технологическое оборудование и рабочую зону и др.

Существующие недостатки конструкций воздухораспределителей свидетельствуют об их низкой эффективности, что является предпосылкой разработки новой конструкции воздухораспределителя для предприятий текстильной промышленности.

Одним из путей решения проблемы повышения эффективности систем технологического кондиционирования воздуха текстильных предприятий является создание устройства для подачи приточного воздуха струями с быстрозатухающими скоростями в нижнюю зону помещения, непосредственно в технологическое оборудование (в зону переработки текстильных волокон) [1]. С этой целью разработан воздухораспределитель с использованием эффекта соударения встречных струй [2].

### Теоретический анализ

Конструктивные размеры воздухораспределителя зависят от места его установки в технологическом оборудовании, объема подаваемого воздуха, скорости приточных струй. Для создания требуемых параметров искусственного микроклимата (температуры  $t$ , °С; подвижности  $v$ , м/с; относительной влажности воздуха  $\varphi$ , %) в технологической и рабочей зонах воздухораспределитель должен обеспечивать равномерную раздачу приточного воздуха по всей его длине. Это достигается известными техническими приемами, а именно применением постоянного поперечного сечения с переменной по длине воздухораспределителя шириной щели в стенке или переменного сечения с одинаковой по длине щелью для выхода воздуха [2].

Применительно к решению задачи распределения приточного воздуха, поступающего в технологическое оборудование при помощи разработанной конструкции воздухораспределителя [2], предлагается использовать воздухораспределитель постоянного статического давления с равномерной раздачей воздуха переменного поперечного сечения и с постоянными по длине размерами щелей  $l_0$ ,  $b_0$ ,  $a_2$  [1] (рис. 1).

Расположение воздуховыпускных щелевидных устройств может осуществляться в зависимости от области применения воздухораспределителя в одной или нескольких его стенках.

Учитывая однотипность размеров и конструктивных решений щелевидных устройств, а также характер истечения потока воздуха из них, в дальнейшем будем рассматривать щель для выхода воздуха в одной из стенок.

Распределение давлений  $P_{ст}$ ,  $P_{д}$ ,  $P_{п}$  и направлений скоростей  $v_{ст}$ ,  $v_{д}$ ,  $v_{п}$  в разработанном воздухораспределителе представлено также на рис. 1.

При обосновании математической модели авторы использовали классическую теорию расчета воздухораспределителей с постоянным по длине статическим давлением (К.К. Баулина, Н.С. Сорокина, В.Н. Талиева и др.).

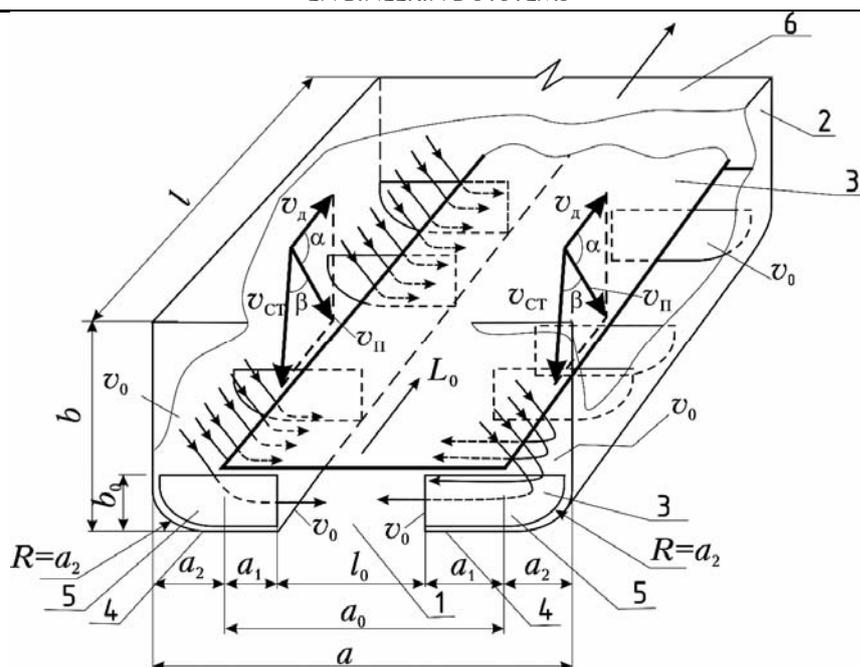


Рис. 1. Схема воздухораспределителя постоянного статического давления с переменным поперечным сечением и постоянными по длине размерами щелей  $l_0$ ,  $b_0$ ,  $a_2$  для выхода воздуха и разделителями потока:

1 – результирующая щель; 2 – боковая стенка; 3 – плоский экран; 4 – оппозитный щелевидный насадок; 5 – разделительная пластинка; 6 – воздухораспределитель;  $a$ ,  $b$ ,  $l$  – соответственно ширина, высота и длина воздухораспределителя;  $b_0$  – высота щелевидного насадка постоянного размера;  $l_0$  – ширина щели постоянного сечения в стенке воздухораспределителя;  $a_2$  – ширина щели постоянного сечения внутри воздухораспределителей (вход в щелевидный насадок);  $a_0$  – ширина плоского экрана;  $a_1$  – длина щелевидного насадка;  $v_0$  – скорость воздуха на входе и выходе из щелевидного насадка;  $v_d$  – скорость воздуха внутри воздуховода по направлению потока;  $v_{ст}$  – скорость воздуха в перпендикулярном направлении к плоскости на входе в щелевидный насадок;  $v_n$  – действительное направление скорости воздуха на входе в насадок;  $L_0$  – расход воздуха в начале воздухораспределителя

При разработке методики расчета воздухораспределителя равномерной раздачи воздуха принимается допущение, что коэффициенты местного сопротивления выхода воздуха из щелевидных отверстий  $a_2$ ,  $b_0$  постоянны по всей длине воздухораспределителя, при этом потери давления происходят только за счет сопротивления движению воздуха, создаваемого трением. Кроме того, количества воздуха, выходящего через щелевидные отверстия  $a_2$  и  $b_0$ , равны и определяются значением статического давления, постоянного по всей длине  $l$  воздухораспределителя.

В методике основной величиной является площадь поперечного сечения  $a \times b$  воздухораспределителя.

На основе исследований результирующей струи [1], полученной при соударении приточных плоских встречных потоков, установлено соотношение определяющих размеров  $l_0/b_0 = 15$ , что позволяет после расчета одного из параметров ( $l_0$  или  $b_0$ ) принимать другой, при этом сохраняя указанное соотношение и условие, что  $b_0 = a_1 = a_2$ .

Статическое давление внутри воздухораспределителя, действующее перпендикулярно плоскости щелей  $a_2$ , преобразуется в скоростное давление, которое вызывает движение воздуха через щелевидные отверстия  $a_2$  и щелевидный насадок  $a_1$ .

Действительная скорость воздуха  $v_n$ , направленная в стороны щелевидных отверстий  $a_2$  под углом  $\alpha$  к оси воздухораспределителя, определится в виде

$$v_n = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{ст}^2 + P_d^2)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{ст}}{\rho}} \quad (1)$$

Расход воздуха  $L_0$ , м<sup>3</sup>/с,

$$L_0 = \mu_p \cdot f_{\text{щ}(2)} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_{\text{ст}}}{\rho}}. \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует, что общая площадь  $f_{\text{щ}(2)}$ , м<sup>2</sup>, двух щелевидных отверстий составит:

$$f_{\text{щ}(2)} = \frac{L_0}{\mu_p \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_{\text{ст}}}{\rho}}} = \frac{L_0}{\mu_p \cdot v_{\text{ст}}}. \quad (3)$$

Отсюда

$$\frac{L_0}{f_{\text{щ}(2)}} = \mu_p \cdot v_{\text{ст}}, \text{ откуда } v_{\text{щ}(2)} = \mu_p \cdot v_{\text{ст}}. \quad (4)$$

Учитывая коэффициент местного сопротивления  $\xi = \frac{1}{\mu_p^2}$ , получаем:

$$f_{\text{щ}(2)} = \frac{L_0 \cdot \sqrt{\xi}}{\sqrt{\frac{2 \cdot P_{\text{ст}}}{\rho}}}. \quad (5)$$

По мере продвижения воздуха по воздухоораспределителю приточная струя на выходе ближе к его концу будет иметь более широкий угол раскрытия  $\alpha$ , а скорость истечения потока  $v_n$  через щель, наоборот, будет уменьшаться по длине воздухоораспределителя, что связано с падением динамического давления. В самом конце воздухоораспределителя, когда расход воздуха в направлении оси отсутствует, величина  $P_d$  будет равна или близка нулю, угол  $\alpha = 90^\circ$ , и тогда  $v_n \approx v_{\text{ст}}$ .

### Инженерная методика

Основываясь на изложенных теоретических исследованиях, для составления инженерной методики расчета рассмотрим схему предлагаемого воздухоораспределителя постоянного статического давления с односторонней раздачей через две продольные щели  $a_2$  (рис. 2). При этом все щелевидные отверстия  $a_2$ ,  $b_0$ ,  $l_0$  для выхода воздуха имеют постоянное сечение одного размера. Статическое давление  $P_{\text{ст}}$  по длине воздухоораспределителя поддерживается постоянным за счет компенсации потерь давления на любом участке соответствующим снижением динамического давления  $P_d$ .

Дальнейшие рассуждения будут относиться к определению ширины двух продольных щелей  $a_2$ , остальные размеры принимаются из условия  $a_2 = a_1 = b_0$ .

Задавшись средней скоростью истечения потока воздуха  $v_{\text{щ}(2)}$  через две щели шириной  $2 \cdot a_2 = a_{\text{щ}(2)}$  и длиной  $l$ , определяем их площадь  $f_{\text{щ}(2)} = f_1 + f_2$ , ширину  $a_{\text{щ}(2)}$ , начальный эквивалентный диаметр  $d_n$  и высоту воздухоораспределителя  $b$ .

Тогда общая площадь двух щелей составит:

$$f_{\text{щ}(2)} = \frac{L_0}{v_{\text{щ}(2)}}. \quad (6)$$

Поскольку воздухоораспределитель постоянного статического давления, общая ширина обеих щелей будет одинаковой по всей его длине  $l$  и составит:

$$a_{\text{щ}(2)} = \frac{L_0}{v_{\text{щ}(2)} \cdot l}, \quad (7)$$

где  $L_0$  – секундный расход воздуха, м<sup>3</sup>/с.

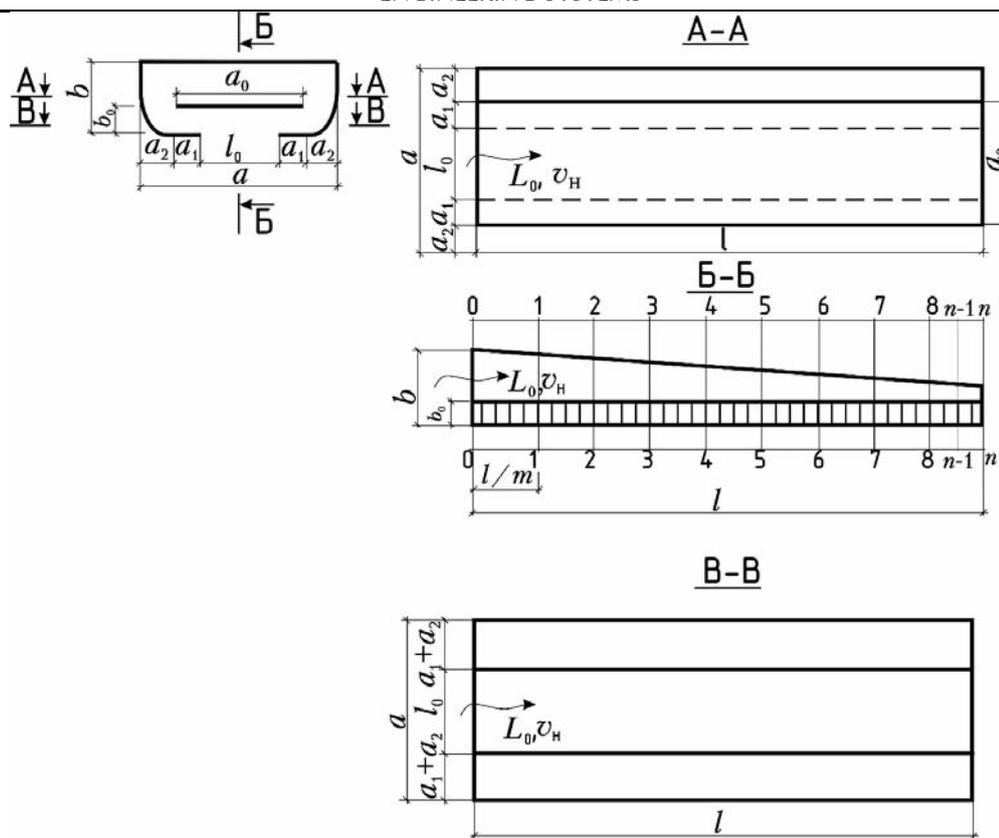


Рис. 2. Схема воздухораспределителя постоянного статического давления с продольными щелями и переменным сечением ( $a_2, b_0, l_0 = \text{const}$ )

Далее определяем ширину каждой щели  $a_2 = a_{\text{щ}(2)}/2$ , после чего приступаем к конструированию ширины  $a$  воздухораспределителя [1], учитывая, что  $a_1 = b_0 = a_2$ .

Размер ширины продольной щели  $l_0$  в стенке воздухораспределителя рассчитываем из соотношения  $l_n = l_0/b_0 = 15$ . Исходя из изложенного, находим начальную ширину воздухораспределителя:

$$a = 2a_1 + 2a_2 + l_0. \quad (8)$$

Далее расчет сводится к определению высоты воздухораспределителя в начале каждого участка по его длине при условии, что его некоторые размеры ( $a, a_0, a_1, a_2, b_0, l_0$ ) остаются постоянными ( $a_0 = l_0 + 2a_1$ ).

Начальный эквивалентный размер воздухораспределителя равен:

$$b_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{4 \cdot L_0}{v_n \cdot \pi}}, \quad (9)$$

где  $v_n$  – скорость воздуха в начале воздухораспределителя, м/с.

Соответственно начальная высота  $b_n$  воздухораспределителя, м,

$$b_n = \frac{\pi d_n^2}{4a}. \quad (10)$$

Требуемое статическое давление  $P_{\text{ст}}$ , Па,

$$P_{\text{ст}} = \left( \frac{L_0}{\mu f_{\text{щ}(2)} \sqrt{\frac{\rho}{2}}} \right)^2 = \left( \frac{v_{\text{щ}(2)}^2}{\mu \sqrt{\frac{\rho}{2}}} \right). \quad (11)$$

Динамическое давление  $P_{двн}$  для сечения  $n$ - $n$  воздухоораспределителя

$$P_{д(n)} = P_{двн} - \sum_0^n R_{уд(n)} L_{уч(n)}, \quad (12)$$

где  $P_{двн} = \frac{\rho v_n^2}{2}$ , Па.

Статическое давление  $P_{ст(n)}$  для сечения  $n$ - $n$  воздухоораспределителя

$$P_{ст(n)} = P_{двн} - \left( P_{д(n)} + \sum_0^n R_{уд(n)} l_{уч(n)} \right). \quad (13)$$

Полное давление  $P_n$  для сечения  $n$ - $n$  воздухоораспределителя

$$P_{п(n)} = P_{двн} - \sum_0^n R_{уд(n)} l_{уч(n)}. \quad (14)$$

Необходимое полное давление в воздухоораспределителе составит:

$$P_n = P_{ст} + P_{д}. \quad (15)$$

При делении воздухоораспределителя на  $n$  равных участков, каждый из которых длиной  $l_{уч(n)} = l/m$ , конечные сечения участков заранее неизвестны, поэтому скорость  $v_{уч(n)}$ , динамическое давление  $P_{дв(уч)}$  и потери давления  $R_{уд(n)} l_{уч(n)}$  предлагается определять не по средним, а по начальным сечениям участков, при этом погрешность не скажется на полученных результатах.

Удельные потери давления на трение для каждого участка воздухоораспределителя  $R_{уд}$  определяются из выражения

$$R_{уд(n)} = \frac{\lambda_n \rho v_{уч(n-1)}^2}{2d_{уч(n-1)}}, \quad (16)$$

где  $\lambda_n$  – коэффициент сопротивления трения, рассчитывается по формуле Альтшуля

$$\lambda_n = 0,11 \left( \frac{k_s}{d_{n-1}} + \frac{68}{Re_{n-1}} \right). \quad (17)$$

Скорость воздуха на каждом участке  $n$ , м/с, воздухоораспределителя

$$v_{уч(n)} = \sqrt{\frac{2P_{д(n)}}{\rho}} = \left( \frac{m-n}{m} \right) v_n, \quad (18)$$

где  $m$  – количество делений воздухоораспределителя на участки;  $n$  – порядковый номер участка.

Расход воздуха в конце каждого участка  $n$ , м<sup>3</sup>/с, воздухоораспределителя составит:

$$L_{уч(n)} = \left( \frac{m-n}{m} \right) L_0, \quad (19)$$

где  $L_0$  – расход воздуха в начале воздухоораспределителя, м<sup>3</sup>/с.

Размер воздухоораспределителя в конце каждого участка  $d_{уч(n)}$ , м,

$$d_{уч(n)} = \sqrt{\frac{4 \cdot L_{уч(n)}}{v_{уч(n)} \cdot \pi}}. \quad (20)$$

Высота воздухоораспределителя в конце каждого участка  $b_{yч(n)}$ , м,

$$b_{yч(n)} = \frac{\pi d_{yч(n)}^2}{4a}. \quad (21)$$

При изменении сечения воздухоораспределителя по двум и более стенкам с целью сохранения постоянной по его длине ширины щели  $a_2$  рекомендуется изменять сечение плоского экрана по ходу движения воздуха. Сечение экрана принимает клинообразную форму, как и сам воздухоораспределитель.

На основании изложенной выше инженерной методики расчета предложенного воздухоораспределителя разработана компьютерная программа расчета [1].

Результаты, полученные с использованием данной инженерной методики расчета воздухоораспределителя применительно к локальной системе технологического кондиционирования воздуха вытесняющего типа [1, 3], показаны на рис. 3.

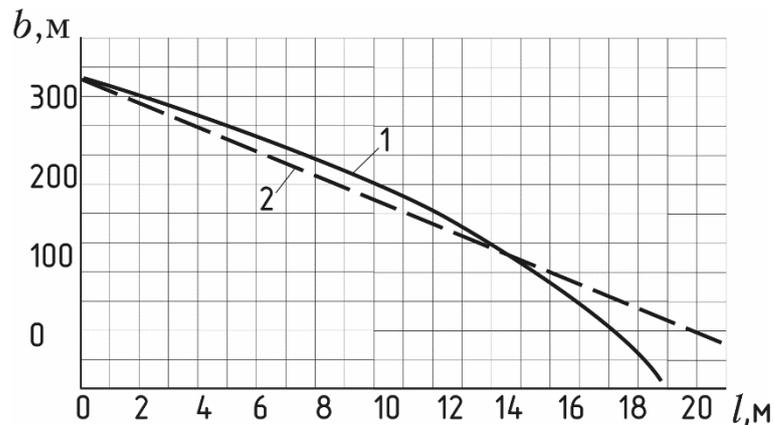


Рис. 3. Изменение сечения воздухоораспределителя по длине:  
 $l$  – длина воздухоораспределителя, м;  $b$  – высота воздухоораспределителя, м;  
 1 – теоретическая линия изменения сечения воздухоораспределителя;  
 2 – линия аппроксимации сечения воздухоораспределителя

Как видим, теоретически полученная линия изменения сечения воздухоораспределителя имеет квадратичную зависимость. Возможно упрощение заготовительных и монтажных работ допущением некоторой неравномерности истечения воздуха по длине воздухоораспределителя, если поперечное сечение изменить по длине линейно (см. рис. 3). С этой целью проводится линия аппроксимации и конечные размеры воздухоораспределителя определяются по этой линии из выражения

$$b = 308,7 - 13,492 \cdot l. \quad (22)$$

### Заключение

Согласно предложенной методике расчета разработано новое воздухоораспределительное устройство с оппозитными щелевидными насадками при соотношении  $l_0 / b_0 = 15$  с тремя максимумами и с большим углом бокового расширения струи  $\alpha$  (от 10 до 12°). В таком случае результирующая струя омывает в технологической зоне текстильные материалы и с малыми скоростями, до 0,5 м/с, вытекает в рабочую зону.

Конструкция воздухоораспределителя позволяет обеспечить требуемые параметры искусственного микроклимата ( $t$ ,  $v$ ,  $\phi$ ) как в технологической, так и рабочей зоне производственных помещений текстильных предприятий [4].

### Список литературы

1. Еремкин, А.И. Локальное кондиционирование вытесняющего типа текстильных предприятий / А.И. Еремкин. – Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2006. – 390 с.

2. Патент РФ № 2128253. Устройство локальной раздачи воздуха / А.И. Ерёмкин, О.А. Базорова; заявитель и патентообладатель Пензенский архит.-строит. ин-т 96123359//2; заявл. 10.12.96; Опубл 20.08.2002. Бюл. №9.

3. Фильчакина, И.Н. Технологическое кондиционирование воздуха локальным способом по типу вытесняющей вентиляции текстильных предприятий / И.Н. Фильчакина, А. И. Еремкин. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 203 с.

4. Еремкин, А.И. Оценка эффективности локальной системы технологического кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции / А.И. Еремкин [и др.] // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №1.

#### References

1. Eremkin, A.I. Local conditioning of the displacing type of textile enterprises / A.I. Eremkin. – Saratov: Saratov State Technical University, 2006. – 390 p.

2. Patent of the Russian Federation No. 2128253. Air distributor / A.I. Eremkin, O.A. Bazorova; Published on 20.08.2002. Newsletter №9.

3. Filchakina, I.N. Technological conditioning of air by a local method as a type of displacement ventilation of textile enterprises / I. N. Filchakina, A. I. Eremkin. – Penza: PGUAS, 2012. – 203 p.

4. Eremkin, A.I. Evaluation of the effectiveness of the local system of technological air conditioning by the type of displacement ventilation / A.I. Eremkin [etc.] // Regional architecture and engineering. – 2018. – No.1.

УДК 697.9:677:531.422

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

**Аверкин Александр Григорьевич,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: algraw@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

**Eremkin Alexander Ivanovich,**  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Heat and ventilation»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

**Averkin Aleksander Grigorievich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Heat and Ventilation»  
E-mail: algraw@mail.ru

## ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С КОНДИЦИОНИРОВАННЫМ ВОЗДУХОМ

А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин

Приведено математическое описание массообмена для смеси, состоящей из различных по природе текстильных волокон (шерсть, вискоза, капрон и др.), с кондиционированным воздухом.

Определен введенный авторами гидродинамический параметр  $D$ , который позволяет выбирать режимы гигротермического воздействия на текстильные волокна в зависимости от направленности и цикличности процессов массообмена (увлажнение – сушка).

*Ключевые слова:* текстильные волокна, кондиционированный воздух, влажность волокон, движущая сила, математическое описание гидродинамики влагообмена, параметры искусственного микроклимата

## STUDY OF THE PROCESS OF INTERACTION OF MULTICOMPONENT TEXTILE MATERIALS WITH CONDITIONED AIR

A.I. Eremkin, A.G. Averkin

The mathematical description of the mass transfer for a mixture consisting of various textile fabrics (wool, viscose, ka-prone, etc.) and air-conditioned air is given. The hydrodynamic parameter  $D$  is determined, which allows to select the modes of hygrothermal action on textile fibers, depending on the direction and cyclicity of the processes of mass transfer (humidification-drying).

*Keywords:* textile fibers, conditioned air, moisture of fibers, driving force, mathematical description of moisture hydrodynamics, parameters of artificial microclimate

### Введение

Из анализа литературных данных [1–4] известно, что параметры искусственного микроклимата (температура  $t$ , °С и относительная влажность воздуха  $\varphi$ , %) в технологической зоне текстильного оборудования (чесальный аппарат, прядильная машина, ткацкий станок и др.) должны определяться влажностным состоянием перерабатываемых текстильных волокон  $W$ , %. При этом данные параметры  $t$ ,  $\varphi$  призваны либо

обеспечить изменение влажности волокон в полуфабрикатах пряжи и в самой пряже в сторону увеличения (сорбция), начиная с чесальных отделов аппаратного и гребенного производства и кончая прядением, соответственно с 10 до 15 % и с 15 до 18 %, либо поддерживать её постоянной и равной верхним пределам  $W$ , т.е. 15 % и 18 %.

По производственным испытаниям, значения параметров  $t$  и  $\varphi$  в рабочей зоне не способствуют данным изменениям и поддержанию требуемой  $W$ . В связи с этим на многих текстильных предприятиях наблюдается резкое снижение  $W$  на всех технологических переходах аппаратного и гребенного производства, что наглядно показано на рис. 1.

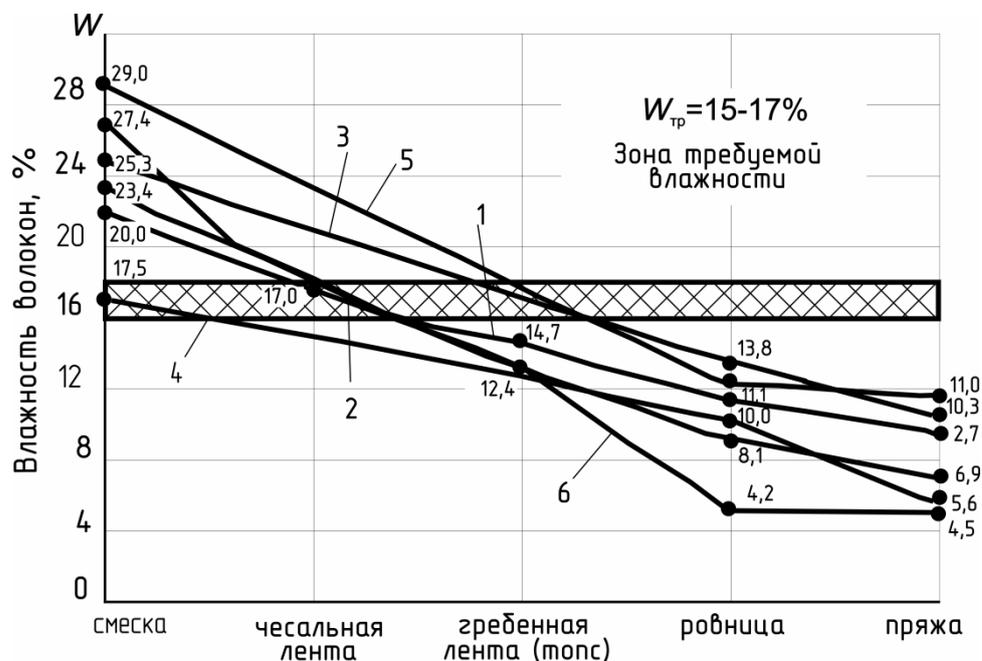


Рис. 1. Фактическое и требуемое влажностное состояние волокон в полуфабрикатах и в пряже при аппаратном и гребенном способах шерстопрядения: 1 – комбинат им. Э.Тельмана, г. Санкт-Петербург; 2 – ОАО «Сурская мануфактура» им. Асеева; 3 – ООО «Пензенский текстиль», р/п Золотаревка, Пензенская область; 4 – фабрика им. П. Алексеева, г. Москва; 5 – фабрика «Освобожденный труд», г. Москва; 6 – Калининский камвольный комбинат, г. Калинин

Как выявлено, вместо повышения происходит резкое снижение  $W$  полуфабрикатов пряжи на каждом технологическом переходе, что является одной из главных причин массовой обрывности нитей и полуфабрикатов пряжи [3] на основных технологических переходах.

Обрывность обуславливает низкую эффективность применяемых систем технологического кондиционирования воздуха (СТКВ) и качество выпускаемой продукции. Следовательно, для создания технологически благоприятных параметров искусственного микроклимата  $t$ ,  $\varphi$  возникает необходимость на каждом технологическом переходе в зоне переработки текстильных волокон поддерживать такие режимы гигротермического воздействия, т.е. значения  $t$  и  $\varphi$ , которые могут восполнить потерянную влагу и обеспечить повышение  $W$ , согласно требованиям технологии производства пряжи и ткани.

#### Материалы и методы

Примем условие, что обеспечение процесса увлажнения текстильных материалов возможно за счет величины движущей силы  $\Delta\mu$ , характеризуемой как разность между химическими потенциалами массопереноса водяных паров на поверхности материала  $\mu_v$  и в окружающем воздухе  $\mu$ , при котором полуфабрикаты и пряжа за возможное время контакта  $\tau$  смогут приобрести необходимую величину  $W$ . В общем виде химический потенциал массопереноса равен  $\mu = RT \ln \varphi$  (здесь  $R$  – универсальная газовая

постоянная, Дж/(кмоль·К),  $T$  – температура, К). Далее в статье значения  $W$ ,  $\varphi$ ,  $t$  предлагается выражать через  $\mu$ .

Известно, что время  $\tau$  контакта перерабатываемых текстильных материалов с кондиционированным воздухом, согласно техническим возможностям текстильного оборудования, является величиной постоянной; поэтому при известном начальном влажностном состоянии материала  $\mu_B^H$  можно считать, что требуемая влажность волокон  $\mu_B^{TP}$  будет определяться величиной  $\mu^K$ , характеризующей конечное состояние относительной влажности воздуха в технологической зоне. Таким образом, установлен параметр  $\mu$ , с помощью которого можно эффективно регулировать  $W$  и который можно выразить посредством  $\varphi$  и  $t$ . Согласно потенциальной теории [1], следует отметить, что чем больше разница между  $\mu_B^H$  и  $\mu^K$ , тем быстрее волокна могут достичь  $\mu_B^{TP}$ , которая является текущей  $\mu_B^T$  и промежуточной величиной в пределах данного градиента  $\Delta\mu$ . При этом массоперенос осуществляется от большего потенциала к меньшему. Следовательно, для условия сорбции влаги должно выполняться условие  $\mu^K > \mu_B^H$ , при десорбции, наоборот,  $\mu^K < \mu_B^H$ .

Принято считать, что в пределах  $\Delta\mu$  время достижения  $\mu_B^{TP}$ , т.е. скорость влагообмена, будет зависеть от начальной влажности волокон  $\mu_B^H$ , формы связи влаги с материалом, направленности и цикличности процесса влагообмена, состава смеси, характеризуемой удельным влагосодержанием текстильных волокон в области мономолекулярной адсорбции  $U_m$  (кг влаги/кг сухого вещества), удельной поверхностью пор  $F_{пор}$  (м<sup>2</sup>/кг), удельным изотермическим коэффициентом массоемкости  $C_\mu$  (кмоль/Дж), удельным коэффициентом массообмена  $\beta_\mu$  (кг·кмоль/м<sup>2</sup>·мин·Дж), а также от величины движущей силы,  $\Delta\mu$ . Установление закономерности изменения  $W$  во времени с учётом перечисленных факторов, с целью выбора рационального режима гигротермического воздействия, является задачей исследования гигродинамики процессов влагообмена.

Для математического описания данных процессов влагообмена представим физическую модель явления, при этом учитывая, что в условиях производства с кондиционированным воздухом взаимодействуют не отдельное волокно, а смеси, состоящие из различных по природе волокон (шерсть, вискоза, капрон и др.). Тогда смеси будем рассматривать как единое капиллярно-пористое коллоидное тело (КПКТ) и представим, что внутри данного тела не происходит массообмена между отдельными составляющими и все компоненты находятся между собой в гигро- и термодинамическом равновесии. При этом также представим, что каждое составляющее смеси индивидуально взаимодействует с кондиционированным воздухом. Воспользуемся данными [1], и введём ещё одно допущение, согласно которому при исследовании гигродинамики будем характеризовать многокомпонентные текстильные материалы (лента, топс, ровница и пряжа) как «условно тонкие» КПКТ, у которых увеличение толщины слоёв до определённых пределов не оказывает влияния на скорость массообмена в процессе сорбции и десорбции. В таких телах можно принять, что процесс взаимодействия волокон с кондиционированным воздухом осуществляется за счёт массообмена с окружающей средой.

Для математического описания явления массообмена между «условно тонкими» КПКТ и кондиционированным воздухом, с учётом принятых допущений, воспользуемся термодинамической аналогией между процессами тепло- и массообмена, которые основаны на общности механизма переноса энергии и массы [4].

Можно представить, что при возникшем градиенте  $\Delta\mu$  количество влаги, воспринимаемое или отдаваемое «условно тонкими» КПКТ массой  $G_c$  через средневзвешенную поверхность микропор  $F_{пор}$  за единицу времени  $dt$ , расходуется на повышение или понижение влажности самого тела, выраженной через  $\mu_B$ , на величину  $d\mu_B$ . Таким образом, явление нестационарного массообмена между «условно тонкими» КПКТ и

окружающей средой математически можно выразить дифференциальным балансовым уравнением массы вида:

$$F_{\text{пор}} \beta_{\mu} (\mu^{\text{к}} - \mu_{\text{в}}^{\text{т}}) d\tau = G_{\text{с}} C_{\mu} d\mu_{\text{в}}^{\text{т}}. \quad (1)$$

В левой части уравнения (1) показаны внешние и внутренние факторы, влияющие на изменение влажности материала во времени, характеризующееся правой частью данного уравнения.

В левой части уравнения (1) коэффициент пропорциональности  $\beta_{\mu}$ , называемый коэффициентом массообмена, численно равен количеству адсорбированного или десорбированного вещества с единицы поверхности в  $1 \text{ м}^2$  в единицу времени  $1 \text{ мин}$  при градиенте химического потенциала, равном единице, и имеет размерность  $\text{кг} \cdot \text{моль} / (\text{м}^2 \cdot \text{мин} \cdot \text{Дж})$ .

Можно считать, что при нестационарных условиях влагообмена величина массообменного параметра  $\beta_{\mu}$ , как и  $C_{\mu}$ , является переменной и с увеличением  $W$  по аналогии с  $C_{\mu}$  она возрастает и зависит от энергии связи влаги с материалом, то есть  $\beta_{\mu} = f(\mu_{\text{в}})$ .

При определении  $\beta_{\mu} = f(\mu_{\text{в}})$  воспользуемся термодинамической аналогией и примем за основу теоретические положения, разработанные Г.М.Кондратьевым в теории теплового регулярного режима (Афанасьев В.К. Справочник по шерстепрядению. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 488 с). Для нашего случая можно считать, что по аналогии с темпом нагрева и охлаждения правомерно характеризовать величиной  $m$  темп сорбции (увлажнение) и десорбции (сушка). Для определения  $\beta_{\mu}$ , отнесённого к разности химических потенциалов  $\Delta\mu$ , требуется установить численное значение  $m$ , которое можно определить аналитическим путём, воспользовавшись для этого также теорией теплового регулярного режима. Исходя из этой теории, предположим, что в пределах одной формы связи влаги с материалом (мономолекулярная и полимолекулярная адсорбция, капиллярная конденсация) через некоторый малый промежуток времени изменения  $\mu_{\text{в}}$  наступает регулярный режим массообмена, тогда можно принять значения  $C_{\mu} = \text{const}$  и  $\beta_{\mu} = \text{const}$ , которые не зависят от  $\mu_{\text{в}}$ . Воспользуемся этим условием для определения  $m$  и проинтегрируем дифференциальное уравнение (1) относительно текущего значения химического потенциала тела  $\mu_{\text{в}}^{\text{т}}$ :

$$\mu_{\text{в}}^{\text{т}} = \mu^{\text{к}} - (\mu^{\text{к}} - \mu_{\text{в}}^{\text{т}}) \exp\left(-\frac{F_{\text{пор}} \cdot \beta_{\mu}}{G_{\text{с}} \cdot C_{\mu}} \tau\right) \quad (2)$$

По аналогии с темпом нагрева и охлаждения величина  $m$  для отдельных волокон определяется из уравнения (2) показателем степени в выражении

$$m = \frac{F_{\text{пор}} \cdot \beta_{\mu}}{G_{\text{с}} \cdot C_{\mu}}. \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что величина  $m$  прямо пропорциональна коэффициенту массообмена и адсорбционной поверхности микро- и макропор и обратно пропорциональна полной массоемкости тела ( $G_{\text{с}} \cdot C_{\mu}$ ). Следовательно, численное значение  $m$  определяется коэффициентами  $\beta_{\mu}$  и  $C_{\mu}$ . Величина  $m$  является положительным числом и имеет размерность  $\text{мин}^{-1}$ . Если правую и левую части уравнения (3) умножить на время  $\tau$  в минутах, можно получить безразмерную величину  $m$ .

Таким образом, из выражения (3) при известных значениях  $m$ ,  $F_{\text{пор}}$ ,  $G_{\text{с}}$  и  $C_{\mu}$ , полученных при сорбции (увлажнение) и десорбции (сушка), можно вычислить для отдельных видов волокон, при различных формах связи влаги с материалом, величину  $\beta_{\mu}$ :

$$\beta_{\mu} = \frac{G_{\text{с}} \cdot G_{\mu}^{\text{х}} \cdot m^{\text{с}}}{F_{\text{пор}}^{\text{с}}}. \quad (4)$$

При оценке процессов массообмена смесок из различных волокон с кондиционированным воздухом без учёта обратного  $\beta_{\mu}$  определится как средневзвешенная величина

из выражения (5), согласно выявленным из уравнения (4) значениям  $\beta_{\mu}$  отдельных компонентов смеси:

$$\bar{\beta}_{\mu}^c = P_1\beta_{\mu(1)}^c + P_2\beta_{\mu(2)}^c + \dots + P_n\beta_{\mu(n)}^c = \sum_1^n P_i\beta_{\mu}^c, \quad (5)$$

где  $P_i$  – весовая доля  $i$ -го компонента в смеси.

Как известно, в шерстопрядильном производстве часто в смесь добавляют обраты, в этом случае величину  $\beta_{\mu}$  следует определить из уравнения:

$$\bar{\beta}_{\mu(0)}^c = \bar{\mu}_{\mu}^c (P + 1). \quad (6)$$

В выражении (4) все величины известны, кроме  $m$ . Определить её можем по аналогии с известным положением из теории регулярного теплового режима, согласно которому величину  $m$  для отдельных волокон при сорбции и десорбции можно найти, например, для шерсти из графиков зависимости  $\ln(\Delta\mu) = f(\tau)$  на их прямолинейном участке [6] как  $\text{tg}\alpha$  – тангенс угла наклона прямой к оси  $OX$ , то есть из выражения

$$-\text{tg}\alpha = \frac{d \ln \Delta\mu^c}{d\tau^c} = m = \text{const}. \quad (7)$$

Из графика зависимости  $\ln(\Delta\mu) = f(\tau)$  для двух моментов времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  выражение (7) примет вид:

$$m^c = \frac{\ln \Delta\mu_1^c - \ln \Delta\mu_2^c}{\tau_1^c - \tau_2^c}. \quad (8)$$

Следовательно, для определения величины  $m$  необходимо иметь экспериментальную кривую  $\ln(\Delta\mu) = f(\tau)$ , которая обычно получается отдельно для каждого материала, в зависимости от направленности процесса (сорбция или десорбция), экспериментальным путём [1].

Данный метод определения  $\beta_{\mu}$  основывается на том, что процесс сорбции и десорбции во времени в пределах одной формы связи влаги с материалом на небольшом интервале изменения  $\mu_{\text{в}}$  протекает по экспоненциальному закону, зависимость  $\ln(\Delta\mu) = f(\tau)$  является прямолинейной, угловой коэффициент  $m = \text{const}$  и коэффициент массообмена  $\beta_{\mu} = \text{const}$ . Функциональная зависимость  $\beta_{\mu} = f(\mu_{\text{в}})$  определяется степенью заполняемости микропор влагой текстильного материала, т.е. скоростью перемещения молекул внутри микро- и макропор, их размерами, а также действием движущих сил, обусловленных различными формами связи влаги с материалом.

В то же время можно предположить, что количественное изменение значений  $\beta_{\mu}$  при различной направленности процесса влагообмена (сорбция-десорбция) будет одинаковым, то есть  $\beta_{\mu}^c = -\beta_{\mu}^d$ , где знак минус показывает, что процесс протекает в противоположном направлении. Это позволит определить зависимость  $\beta_{\mu} = f(\mu_{\text{в}})$  для процесса сорбции, которая будет справедлива и для противоположного процесса – десорбции.

При изучении гигродинамики процессов взаимодействия «условно тонких» КПКТ с кондиционированным воздухом будет достаточно установить аналитическую зависимость  $\beta_{\mu} = f(\mu_{\text{в}})$  в явном виде при условии сорбции. При выводе этой закономерности воспользуемся данными [1] и предположим, что по мере увеличения  $\mu_{\text{в}}$  возрастает число молекул, задерживающихся на поверхности микропор, что приводит к увеличению количества адсорбированных молекул водяных паров и вызывает изменение избыточной энергии поверхностных молекул тела при полимолекулярной адсорбции на величину  $\sqrt{\mu_{\text{в}}}$ .

Можно предположить, что величина  $\sqrt{\mu_b}$  будет определять скорость перемещения молекул водяного пара внутри микропор, выраженную через  $\beta_\mu$ , тогда можно установить зависимость  $\beta_\mu$  от  $\sqrt{\mu_b}$  в виде:

$$\beta_\mu^c = \beta_m^c \sqrt{\frac{\mu_m}{\mu_b}}. \quad (9)$$

Данное уравнение справедливо при определении  $\beta_\mu$  для различных волокон и смесок только в области полимолекулярной адсорбции и с некоторым допущением – в области преобладания капиллярной конденсации, то есть в интересующем нас интервале  $\varphi$  от 10 до 80 %. В выражении (9) единственной опытной константой является  $\beta_m$ , которая выражает величину коэффициента массообмена в момент завершения мономолекулярной адсорбции и определяется при  $\varphi = 10\%$  из выражения (4) и для смесок – из уравнений (5) и (6).

Для установления рассматриваемой зависимости  $\beta_\mu = f(\mu_b)$  в данной статье предлагается и другой метод определения  $\beta_\mu$ , при котором эта величина относится не к начальному, а к среднему значению  $\mu_b$  за рассматриваемый период времени отдельно для каждой формы связи влаги с материалом. Для этого можно воспользоваться опытно-аналитическим методом расчёта, т.е. при условиях сорбции и действующей разности потенциала массопереноса  $\Delta\mu_p$  определить  $\beta_\mu$  за короткий промежуток времени по известному приросту адсорбированной влаги  $G_{вл}$  в кг на поверхности микропор из выражения

$$\mu_\mu^c = \frac{G_{вл}^c}{F_{пор}^c \cdot \Delta\mu_p \cdot \Delta\tau}. \quad (10)$$

Таким образом, сравнительный анализ значений, полученных на основе опытных данных из выражения (10) и из теоретического выражения (9), позволит судить о справедливости принятых рассуждений при определении аналитической зависимости  $\beta_\mu = f(\mu_b)$ .

Полученные данные необходимы для определения оптимальных значений  $\varphi$  и  $t$ , которые нужно поддерживать с помощью СТКВ в технологической зоне текстильного оборудования.

### Результаты и обсуждения

Гидродинамика процесса массообмена, согласно представленной физической модели и принятым допущениям, определяется временем, затрачиваемым на перемещение молекул водяных паров внутри микро- и макропор «условно тонкого» КПКТ, и описывается дифференциальным уравнением (1). Из практических соображений наибольший интерес представляет изучение данных процессов при переменных коэффициентах массоёмкости  $C_\mu$  и массообмена  $\beta_\mu$ .

С учётом полученных теоретических зависимостей [6]  $C_\mu = f(\mu_b)$  и  $\beta_\mu = f(\mu_b)$ , уравнение (1) примет вид:

$$F_{пор} \cdot \beta_m \cdot \mu_m^{\frac{1}{2}} \cdot (\mu_b^T)^{\frac{1}{2}} (\mu^k - \mu_b^T) d\tau = G_c \cdot \frac{1}{2} U_m \cdot \mu_m^{\frac{1}{2}} (\mu_b^T)^{\frac{3}{2}} \cdot d\mu_b^T. \quad (11)$$

После несложных преобразований выражение (11) запишется в виде:

$$D(\mu^k - \mu_b^T) d\tau = \frac{d\mu_b^T}{\mu_b^T}, \quad (12)$$

где  $D$  – гидродинамический параметр «условно тонкого» КПКТ,

$$D = \frac{2F_{пор}\beta_m}{U_m G_c}. \quad (13)$$

Имеем:

$$D\tau = \frac{1}{\mu^k} \ln \frac{\mu_B^T}{\mu^k - \mu_B^T} + \ln C. \quad (14)$$

Постоянная интегрирования  $C$  определяется условием: при  $\tau = 0$ ,  $\mu_B^T = \mu_B^H$ :

$$C = \left( \frac{\mu^k - \mu_B^H}{\mu_B^H} \right)^{\frac{1}{\mu^k}}. \quad (15)$$

Окончательно получим:

$$\mu_B^T = \frac{\exp \frac{2F_{\text{пор}}\beta_{\mu}}{U_M G_c} \mu^k \tau}{\mu^k - \mu_B^H (1 - \exp \frac{2F_{\text{пор}}\beta_M}{U_M G_c} \mu^k \tau)} \mu^k \mu_B^H. \quad (16)$$

Выведенное уравнение (16) может быть использовано для анализа гигродинамики процессов увлажнения и сушки многокомпонентных текстильных материалов при взаимодействии с кондиционированным воздухом в условиях нестационарного влагообмена с учётом факторов, влияющих на данный процесс.

Анализ результатов исследований в области гигродинамики позволил провести оценку практического применения уравнения (16) для расчёта оптимальных режимов гигротермического воздействия с помощью СТКВ. Анализ показал, что это уравнение гигродинамики является универсальным и может быть использовано для выбора режимов гигротермического воздействия, т.е.  $\varphi$  и  $t$ , при обработке любых текстильных волокон и смесок, используемых на текстильных предприятиях. Для этого требуется знать численные значения величин, входящих в гигродинамический параметр тела  $D$ , – это в первую очередь  $U_M$ ,  $F_{\text{пор}}$ ,  $\beta_M$ , которые учитывают структуру и адсорбционные свойства обрабатываемого материала и могут быть определены для каждого отдельного материала по методике, предложенной в данной статье. При этом для смесок из различных волокон применимость данной методики в первом приближении может быть обоснована использованием характеристик  $\bar{F}_{\text{пор}}$ ,  $\bar{F}_{\text{пор}(0)}$ ,  $\bar{U}_M$ ,  $\bar{U}_{M(0)}$ ,  $\bar{\beta}_M$ ,  $\bar{\beta}_{M(0)}$ , которые позволяют учесть свойства многокомпонентных материалов.

Гигродинамический параметр  $D$  позволяет выбирать режимы гигротермического воздействия на текстильные волокна в зависимости от направленности и цикличности процессов массообмена (увлажнение-сушка). При этом для практического пользования уравнением (16) требуется вычислить значения величин  $U_M$  и  $\bar{F}_{\text{пор}}$ , входящих в  $D$ , с учётом направленности процесса влагообмена: при сорбции  $U_M^c$ ,  $F_{\text{пор}}^c$ , при десорбции  $U_M^d$ ,  $F_{\text{пор}}^d$ .

Из уравнения (16) следует, что влагообмен между поверхностью тела  $F_{\text{пор}}$  и окружающей средой происходит под действием разности  $\Delta\mu = \mu^k - \mu_B^H$ . Тогда можно заключить, что с помощью значений  $\mu^k$  и  $\mu_B^H$  можно задаваться любой величиной движущей силы  $\Delta\mu$  и тем самым выбирать такие значения  $\mu^k$ , которые позволят при  $\mu_B^H$  и времени  $\tau$  придать материалу необходимое влажностное состояние  $\mu_B^{\text{TP}}$  или, что одно и то же,  $\mu_B^T$ . Следовательно, из анализа уравнения (16) можно предположить, что при аналитических расчётах гигротермического режима ( $t$ ,  $\varphi$ ) учитываются начальное влажностное состояние перерабатываемого материала  $\mu_B^H$  и время его контакта с кондиционированным воздухом  $\tau$ , которое определяется продолжительностью обработки текстильного материала на технологическом оборудовании.

При выполнении расчётов гигротермических режимов следует учитывать, что область применения уравнения (16) определена принятыми пределами при обосновании коэффициентов  $\beta_\mu$  и  $C_\mu$ . Это позволяет считать, что с практической точностью можно производить аналитические расчёты рассматриваемых режимов ( $\varphi$ ,  $t$ ) в пределах  $\varphi = 10...80$  % при сорбции и  $\varphi = 80...10$  % при десорбции и  $t = 22...24$  °С, которые являются достаточными для решения поставленной в работе задачи, поддержания  $W$  текстильных волокон на требуемом уровне.

#### Вывод

Для выбора режимов гигротермического воздействия на текстильные материалы посредством параметров  $t$  и  $\varphi$ , поддерживаемых системами СТКВ, дана новая методика.

#### Список литературы

1. Еремкин, А.И. Локальное кондиционирование вытесняющего типа текстильных предприятий: монография / А.И. Еремкин. – Саратов: Саратов. гос. тех. ун-т, 2006. – 389 с.
2. Аверкин, А.Г. Совершенствование устройств тепловлажностной обработки воздуха и методов расчета климатехники: монография / А.Г.Аверкин, А.И. Еремкин. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 204 с.
3. Еремкин, А.И. Оценка эффективности локальной системы технологического кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции / А.И.Еремкин, А.Г.Аверкин, С.В.Баканова // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №1. – С. 157–161.
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. Eremkin, A.I. Local conditioning of the displacing type of textile enterprises: monograph. / A.I. Eremkin. – Saratov: Sarat. State. Tech. University, 2006. – 389 p.
2. Averkin, A.G. Perfection of devices for heat and moisture treatment of air and methods of calculation of climatotechnics: monograph. / AGAverkin, A.I. Eremkin. – Penza: PGUAS, 2015. – 204 p.
3. Eremkin, A.I. Evaluation of the efficiency of the local system of technological air conditioning by the type of displacement ventilation. / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, S.V. Bakanova // Regional architecture and construction. – 2018. – №1. – P. 157–161.
4. Samarsky, A.A. Numerical methods for solving convection-diffusion problems / A.A. Samarskiy, P.N. Vabishchevich. – M : Book House «LIBROKOM», 2015. – 248 p.

УДК 628.92.:535.625.2:658.5

*Национальный исследовательский  
Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарева», институт электроники  
и светотехники*

430005, Россия, Республика Мордовия,  
г. Саранск, ул. Б. Хмельницкого, д.39,  
тел.: 8(8342)29-07-73

**Левцев Алексей Павлович,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой  
«Теплоэнергетические системы»

**Лапин Евгений Сергеевич,**  
старший преподаватель кафедры  
«Теплоэнергетические системы»

*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

**Бикунова Марина Викторовна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Водоснабжение, водоотведение  
и гидротехника»

E-mail: mar-bikunova@yandex.ru

*Пензенский государственный университет*  
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д.40,  
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

**Салмин Владимир Васильевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Транспортные машины»

*Federal State Budgetary Educational  
Institution of Higher Education National  
Research Mordovia State University*

Russia, 430005, Saransk, 39,  
B. Khmel'nitsky St.,  
tel.: 8(8342) 29-07-73

**Levtsev Alexey Pavlovich,**  
Doctor of Science, Professor, Head of the  
department « Heat power systems»

**Lapin Evgeny Sergeevich,**  
Senior lecturer of the department «Heat  
power systems»

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Bikunova Marina Viktorovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Water supply, sewerage and  
hydraulic engineering»

E-mail: mar-bikunova@yandex.ru

*Penza State University*  
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya, St.,  
tel.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

**Salmin Vladimir Vasilyevich**  
Doctor of Science, Professor, Head of the  
department «Transport machines»

## КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ОЦЕНКА РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

А.П. Левцев, Е.С. Лапин, М.В. Бикунова, В.В. Салмин

Предложена схема индивидуального теплового пункта с насосно-смесительным устройством на базе энергоэффективного двухпоточного мембранного насоса, работающего в пульсирующем режиме от располагаемого напора теплотрассы. Представлена временная диаграмма работы клапанов импульсного распределения потока и ударных клапанов при работе опытного образца насоса. Приведены графики изменения давления в рабочих камерах насоса с импульсным распределителем потока теплоносителя. Введение мембранного насоса в схему теплового пункта позволяет более равномерно распределить температуру по поверхности отопительных приборов за счет организации пульсирующего режима движения теплоносителя.

*Ключевые слова: система отопления здания, насосно-смесительное устройство, двухпоточный энергоэффективный мембранный насос, располагаемый напор, индивидуальный тепловой пункт, импульсный распределитель потока, гидравлическая характеристика, распределение температур теплоносителя.*

## DESIGN FEATURES AND EVALUATION OF EQUIPMENT FOR PULSED COOLANT

A.P. Levitsev, E.S. Lapin, M.V. Bikunova, V.V. Salmin

The scheme of an individual heat unit with a pump-mixing device based on an energy-efficient two-flow membrane pump operating in pulsating mode from the available head of the heating network is proposed. The time diagram of pulse flow distribution valves and shock valves work during operation of the pump prototype is presented. The graphs of pressure changes in the working chambers of the pump with a pulse flow distributor of the coolant are presented. The introduction of the diaphragm pump into the scheme of heat point allows more evenly distribute temperature across the surface heating devices due to the pulsating regime of flow.

*Keywords: heating system of building, pump and mixing device, energy efficient double diaphragm pump, available pressure, individual heat unit, pulsed flow divider, hydraulic characteristics, coolant temperature distribution*

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день большая часть зданий в городских поселениях присоединена к тепловым сетям по зависимой схеме. Смешение теплоносителя в таких схемах, главным образом, осуществляется через насосно-смесительные устройства на базе водоструйных элеваторов. Водоструйные элеваторы используют располагаемый напор тепловой сети и не требуют дополнительного привода, они достаточно надежны и просты в эксплуатации, однако они сильно зависимы от располагаемого напора тепло-сети. Величина напора, необходимая для нормальной работы водоструйного элеватора, составляет 20-30 м [1]. При несоблюдении данного условия работа теплового пункта на базе водоструйного элеватора нарушается частично или полностью [2]. Особенно массово это стало наблюдаться с расширением эффективного радиуса действия тепловых сетей, который для ряда городов России превышает 9 километров. Обеспечить гидравлический режим в этих условиях очень сложно, поэтому здания новой застройки присоединяют к тепловым сетям по независимой схеме через теплообменник. Для зданий старой застройки перейти на независимую схему подключения систем отопления и вентиляции зданий в большинстве случаев не представляется возможным из-за нескольких вводов и старых схем разводок трубопроводов в подвальных помещениях. Энергетические обследования, проведенные в 2012 году в бюджетной сфере, выявили недостатки традиционных схем зависимого подключения зданий к тепловым сетям, основным из которых является перегрев «обратной» сетевой воды при колебаниях располагаемого напора в тепловой сети, что приводит к снижению эффективности отопления. Было предложено множество технических решений, суть которых сводилась к установке дополнительных моноблочных насосов типа Wilo, Grundfos и т.п. на линии подмеса. В отдельных случаях, там, где был выявлен потенциал энергосбережения в зданиях, в схемы индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) устанавливались погодные регуляторы подачи теплоносителя в здания. Однако работа последних оказывает существенное влияние на гидравлику соседних зданий. Энергетические обследования, проведенные в ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарева», показали, что при установке погодных регуляторов в соседних зданиях с учебными корпусами №4 и №5, относящихся к одной распределительной сети, расход теплоносителя на вводах в эти корпуса увеличивается в ночное время и праздничные дни почти в два раза [3]. Среди специалистов существует мнение, что массовое внедрение регуляторов погодного регулирования может нарушить полностью гидравлический режим теплосети [4]. С другой стороны, использование в ИТП дополнительных подмешивающих насосов и погодного регулирования особенно в осенне-весенний период снижает эффективность отопительных приборов. Введение такого мембранного насоса в схему ИТП обеспечивает качественное смешение теплоносителей, что позволяет более равномерно распределять температуру по поверхности отопительных приборов за счет организации пульсирующего режима движения теплоносителя [5, 6]. В связи с этим весьма актуальным и практически значимым является поиск конструктивных решений указанных вопросов с минимальными энергозатратами.

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

В данной статье рассматривается схема индивидуального теплового пункта с энергоэффективным насосно-смесительным устройством на базе специального двухпоточного мембранного насоса, работающего от располагаемого напора теплосети. Введение такого мембранного насоса в схему ИТП обеспечивает качественное смешение теплоносителей, что позволяет более равномерно распределять температуру по поверхности отопительных приборов за счет пульсации теплоносителя [7].

На рис. 1 представлена схема индивидуального теплового пункта с мембранным насосом, которая содержит: подающий 1 и обратный 2 трубопроводы; левую 3 и правую 4 секции мембранного насоса; импульсный распределитель потока 5 с правым 6 и левым 7 клапанами; правый 8 и левый 9 штоки импульсного распределителя потока; кулачок импульсного распределителя потока 10, соединенный с электроприводом 11; левую 12 и правую 13 рабочие камеры мембранного насоса; левый 14 и правый 15 патрубки мембранного насоса; шток 16; механический механизм переключения ударных клапанов 17; левый 18 и правый 19 ударные клапаны; отопительный прибор правой 20 и левой 21 секций; насосные камеры 22 и 24; нагнетательный обратный клапан правой 23 и левой 25 секций; нагнетательные обратные клапаны рециркуляции 26, 27; всасывающие обратные клапаны 28, 29.

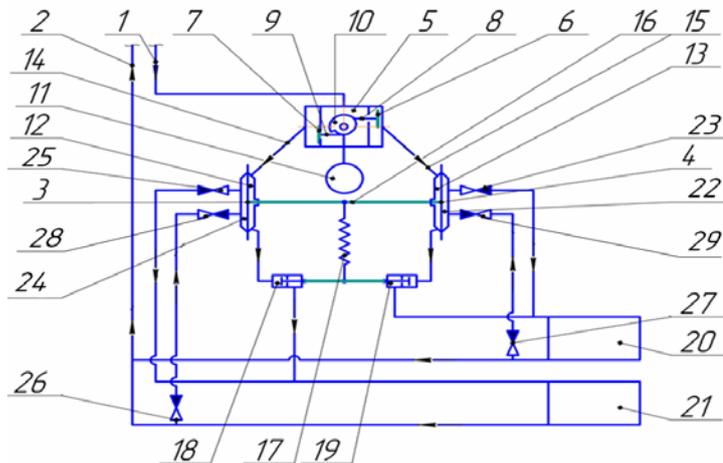


Рис. 1. Схема индивидуального теплового пункта с мембранным насосом

Индивидуальный тепловой пункт с мембранным насосом работает следующим образом. Предположим, левый ударный клапан 18 закрыт, а правый ударный клапан 19 открыт, кулачок импульсного распределителя потока 10 занимает положение I (рис. 2), при котором правый клапан импульсного распределителя потока 6 открыт, а левый клапан импульсного распределителя потока 7 закрыт. При подаче теплоносителя в подающий трубопровод 1 он начнет двигаться по цепи: подающий трубопровод 1, импульсный распределитель потока 5, подающий патрубок правой секции мембранного насоса 15, правая рабочая камера 13 правой секции 4 мембранного насоса, правый ударный клапан 19, отопительный прибор правой секции 20 и далее в обратный трубопровод 2. При достижении установившейся скорости теплоносителя включается электропривод 11, который начинает поворачивать кулачок 10, и левый шток импульсного распределителя потока 9 соскакивает в прорезь кулачка 10, что приведет к последующему резкому закрытию левого клапана 7, а правый шток 8 будет набегать на кулачок и плавно открывать правый клапан 6. При дальнейшем повороте кулачка на 180 градусов левый клапан 7 будет закрытым, а правый клапан 6 некоторое время будет открываться, а затем будет открытым до положения кулачка II. В момент полного открытия правого клапана 6 шток 16 займет левое крайнее положение, сработает механический механизм переключения ударных клапанов 17, что приведет к резкому переключению ударных клапанов: правый ударный клапан 19 закроется, а левый ударный клапан 18 откроется. При резком закрытии правого ударного клапана 19 произойдет гидроудар в линии, обратная волна которого создаст импульс давления,

воспринимаемый правой рабочей камерой 13 правой секции 4, что придаст ускорение в начале перемещения штока 16. Дальнейшее движение штока будет происходить под действием разности давлений прямого и обратного 2 трубопроводов. Диафрагма правой секции 4 мембранного насоса будет смещаться слева направо, увлекая за собой шток 16, а теплоноситель из насосной камеры 22 через нагнетательный обратный клапан правой секции 23 поступит в отопительный прибор правой секции 20 и далее в обратный трубопровод 2. При прохождении теплоносителя через отопительный прибор правой секции 20 передается вторичное тепло теплоносителя и аккумулированное первичное тепло теплоносителя окружающему воздуху. В это время теплоноситель из левой рабочей камеры 12 левой секции 3 мембранного насоса через нагнетательный обратный клапан рециркуляции левой секции 26 и всасывающий обратный клапан левой секции 28 будет перетекать через открытый ударный клапан 18 и отопительный прибор левой секции 21 в левую насосную камеру 24 под действием разности давлений в них. При прохождении теплоносителя через отопительный прибор левой секции 21 будет накапливаться и передаваться тепловая энергия.

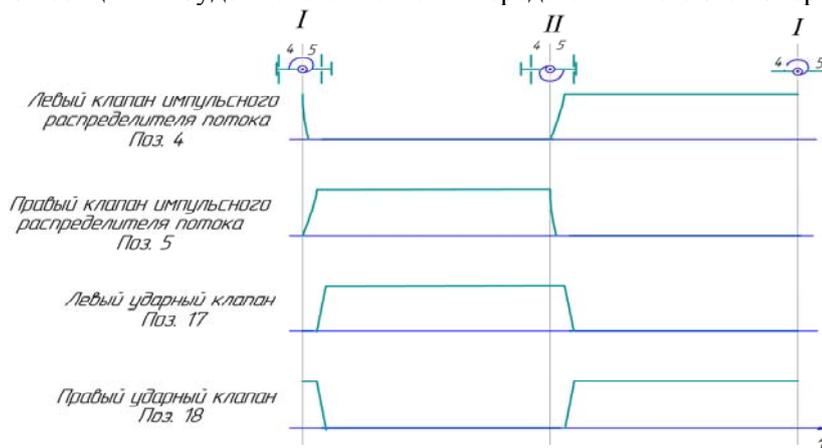


Рис.2. Временная диаграмма работы клапанов

Перевод кулачка импульсного распределителя потока 10 в положение II приведет к переключению клапанов импульсного распределителя потока, и произойдет процесс в правой секции, аналогичный процессу в левой.

Надежная работа устройства обеспечивается при частоте прерывания потока теплоносителя от 0,4 до 0,8 Гц. Причем с увеличением частоты прерывания потока расход теплоносителя снижается до 30 %. Коэффициент смешения первичного и вторичного теплоносителя равен 2.

Схема реализована на кафедре теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарева» в виде опытного образца ИТП с расходом 3 т/ч. Опытный образец ИТП включает импульсный распределитель потока теплоносителя с электроприводом (рис.3) и двухпоточный мембранный насос (рис. 4).



Рис.3. Импульсный распределитель потока теплоносителя с электроприводом

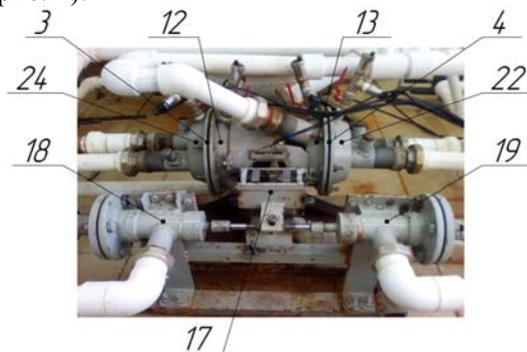


Рис.4. Общий вид индивидуального теплового пункта с энергонезависимым мембранным насосом

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основной задачей при испытании ИТП с двухпоточным мембранным насосом является получение зависимостей: давления в рабочих и насосных камерах от частоты прерывания потока; расхода от частоты прерывания потока; распределения температур по поверхности отопительных приборов. Графики зависимости давления в камерах на двух частотах – 0,4 и 0,8 Гц – показаны на рис.5 и 6.

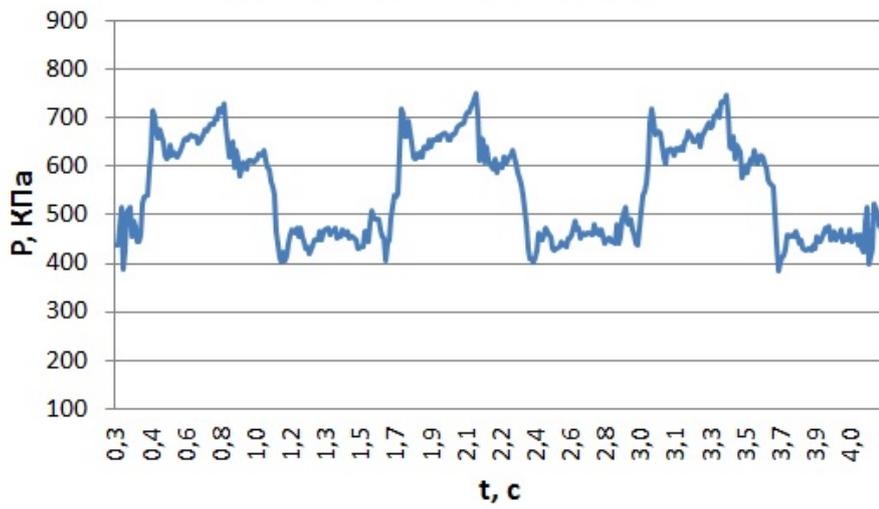
Как видно из приведенных графиков, при изменении частоты прерывания потока с 0,4 до 0,8 Гц амплитуда давления в рабочих и насосных камерах практически не меняется.

Гидравлическая характеристика опытного образца ИТП зависит от частоты импульсного распределителя потока теплоносителя (рис.7). Как видно из данного рисунка, значительное изменение расхода теплоносителя наблюдается в полосе частот от 0,5 до 0,6 Гц. При частотах до 0,5 Гц и более 0,6 Гц расход теплоносителя меняется незначительно, это обусловлено особенностями конструкции схемы обвязки насоса.



Рис. 5. Зависимость давления при частоте 0,4 Гц

### Правая рабочая камера



### Правая насосная камера

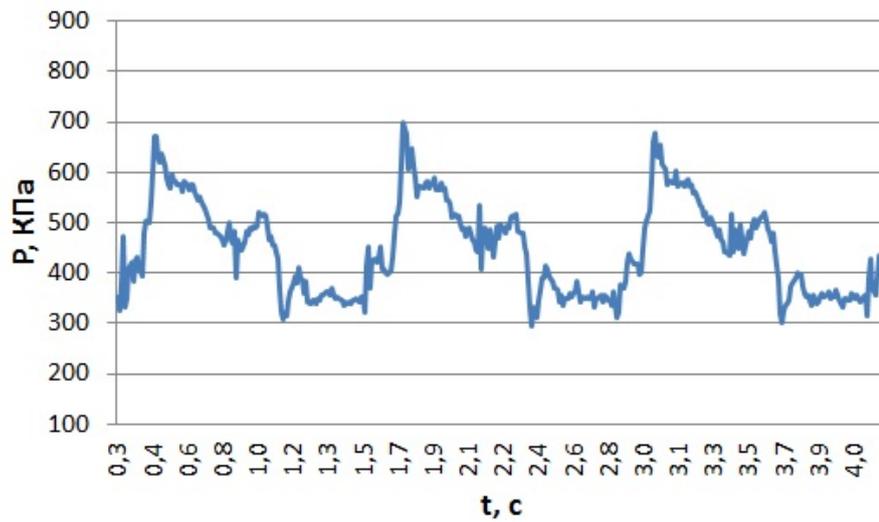


Рис. 6. Зависимость давления при частоте 0,8 Гц

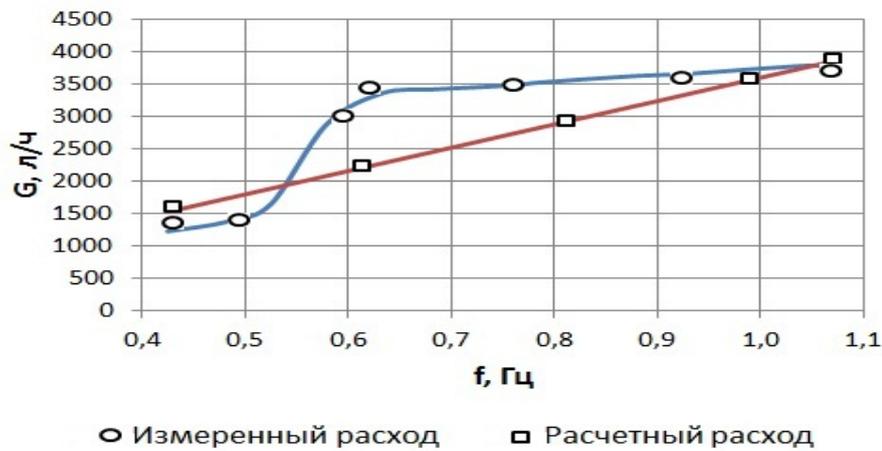


Рис. 7. Зависимость расхода теплоносителя в мембранном насосе от частоты

Нагрузка опытного образца ИТП осуществлялась на биметаллические радиаторы типа БМ РБС-500. Распределение температур по поверхности одного из отопительных приборов в статическом режиме и в пульсирующем режиме на частоте прерывания потока 0,45 Гц приведено на рис. 8. Как видно из данного рисунка, пульсирующий поток теплоносителя позволяет почти на 30 % увеличить теплоотдачу на участках поверхности радиатора с низкими температурами.

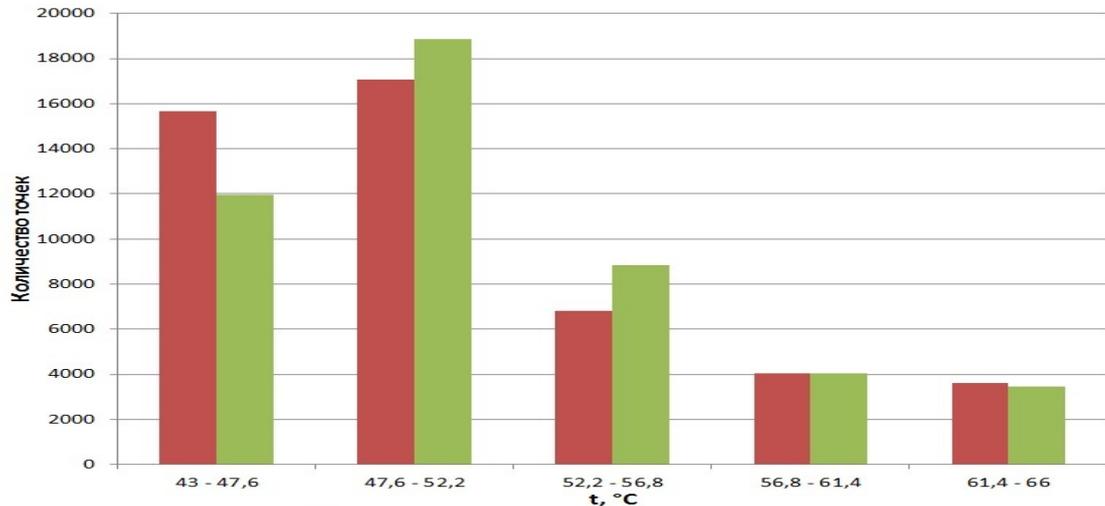


Рис.8. Диаграммы распределения температуры в рабочих точках участков секционного биметаллического радиатора:

 – подача теплоносителя в пульсирующем режиме;  – подача теплоносителя в статическом режиме

### ВЫВОДЫ

1. Использование в ИТП дополнительных подмешивающих насосов и погодного регулирования особенно в осенне-весенний период снижает эффективность отопительных приборов. Введение мембранного насоса, работающего от располагаемого напора теплосети, в схему ИТП обеспечивает качественное смешение теплоносителей, что позволяет более равномерно распределить температуру по поверхности отопительных приборов за счет организации пульсирующего режима движения теплоносителя.

2. В результате испытания схемы ИТП с энергонезависимым насосно-смесительным устройством установлено, что при изменении частоты прерывания потока с 0,4 до 0,8 Гц амплитуда давления в рабочих и насосных камерах практически не меняется, при этом значительное изменение расхода наблюдается в полосе частот от 0,5 до 0,6 Гц. При частотах до 0,5 Гц и более 0,6 Гц расход теплоносителя меняется незначительно, это обусловлено особенностями конструкции схемы обвязки насоса.

3. Изменение температур в рабочих точках поверхности опытного отопительного прибора типа БМ РБС-500 в статическом режиме и в пульсирующем режиме на частоте прерывания потока 0,45 Гц показало, что пульсирующий поток теплоносителя позволяет почти на 30 % увеличить теплоотдачу на участках с низкими температурами.

### Список литературы

1. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети / Е.Я. Соколов. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
2. Энергоаудит и нормирование расходов энергоресурсов / под ред. С.К. Сергеева. – Н. Новгород: НГТУ, 1998. – 132 с.
3. Левцев, А.П. Оценка перегрева «обратки» в учебных корпусах и общежитиях ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарева» / А.П. Левцев, А.В. Ениватов, И.Н. Артемов //

Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвуз. сб. науч. тр. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2016. – С. 177–181.

4. Лапин, Е.С. Оценка «перетоков» в системах коммунального теплоснабжения / Е.С. Лапин, А.П. Левцев, С.Ф. Кудашев // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти д.т.н., профессора Ф.Х. Бурумкулова / редкол. П.В. Сенин [и др.]. – Саранск, 2016. – С. 522–526.

5. Миладзе, В. Энергоэффективность стальных панельных радиаторов в низкотемпературных системах отопления / В. Миладзе // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2015. – № 9 (165). – С. 44–45.

6. Попов, И.А. Перспективные методы интенсификации теплообмена для теплоэнергетического оборудования / И.А. Попов, А.Б. Яковлев, А.В. Щелков [и др.] // Энергетика Татарстана. – 2011. – № 1.

7. Валуева, Е.П. Гидродинамика и теплообмен при пульсирующем турбулентном течении в трубе жидкости с переменными свойствами / Е. П. Валуева // ТВТ. – 2006. – Т. 44, № 10. – С. 118–126.

### References

1. Sokolov, E.Ya. Heating and heating networks / E.Ya. Sokolov. – M.: Publ. House MEI, 2001. – 472 p.

2. Energy audit and rationing of energy costs / ed. S. K. Sergeeva. – N. Novgorod: NSTU, 1998. – 132 p.

3. Levitsev, A.P. Assessment of overheating «return» in campus and dormitories of FGBOU VPO «MGU named after N.P. Ogareva» / A.P. Levitsev, A.V. Enivatov, I.N. Artemov // Energy-saving technologies and systems: Intercollege. col.sci.tr. – Saransk: Publishing house of MSU, 2016. – P. 177–181.

4. Lapin, E.S. Evaluation of «extra-heat-supply» in municipal systems / E.S. Lapin, A.P. Levitsev, S.F. Kudashev. // Energy-efficient and resource-saving technologies and systems: col.sci.tr. International. scientific.-pract. conf. to the memory of Professor F.H. Burumkulov.: ed. P.V. Senin [et al.]. – Saransk: 2016. – P. 522–526.

5. Miladze, V. Energy efficiency of steel panel radiators in low-temperature heating systems / V. Miladze // Plumbing, heating, air conditioning. – 2015. – № 9 (165). – P. 44–45.

6. Popov, I.A. Advanced methods of intensification of heat exchange for heat energy equipment / I.A. Popov, A. B. Yakovlev, V.A. Shchelkov [etc.] // Tatarstan Energetics. – 2011. – No. 1. – P. 44–48.

7. Valueva, E.P. Hydrodynamics and heat transfer in pulsating turbulent flow in a fluid pipe with variable properties / E.P. Valueva // TVT. – 2006. – Vol. 44. – № 10. – P. 118–126.

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  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Князев Александр Анатольевич,**  
старший преподаватель кафедры  
«Инженерная экология»

*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

*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  
of the department «Building structures»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Knyazev Alexander Anatolyevich,**  
Senior Lecturer of the department of  
«Engineering Ecology»  
*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 Scientific  
Officer of the Scientific Research department  
E-mail: yah@sura.ru

## АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИИ ФЕРРАТА НАТРИЯ В РАСТВОРЕ ГИДРОКСИДА НАТРИЯ ПОСЛЕ АКТИВАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ В ЭЛЕКТРОЛИЗЕРЕ

С.Ю. Андреев, Н.Н. Ласьков, М.И. Яхкин, А.А. Князев

Приведены результаты газометрического и фотометрического анализа концентрации феррата натрия в растворе гидроксида натрия, прошедшего активационную обработку в электролизере железными электродами. Показано, что при использовании газометрического метода определения концентрации феррата натрия в активированном растворе гидроксида натрия значение массы феррата натрия, необходимого для выделения одного миллилитра кислорода при стандартных условиях, рекомендуется принимать  $A_{O_2} = 9,869$  г/л, а при применении фотометрического метода следует принимать значение величины коэффициента светопоглощения  $\epsilon = 2,119$  л/(г·см). Использование предложенных методик анализа концентраций феррата натрия позволит контролировать процесс активационной обработки раствора гидроксида натрия в электролизере с железными электродами.

*Ключевые слова: гидроксид натрия, электролиз, феррат натрия, газометрический метод, фотометрический метод, оптическая плотность, коэффициент светопоглощения*

## ANALYSIS OF CONCENTRATION OF SODIUM FERRATE IN SOLUTION OF SODIUM HYDROXIDE AFTER ACTIVATION TREATMENT IN ELECTROLYSER

S.Yu. Andreev, N.N. Laskov, M.I. Yakhkind, A.A. Knyazev

The results of a gasometric and photometric analysis of the concentration of sodium ferrate in a sodium hydroxide solution that has undergone activation treatment in an electrolyzer with iron electrodes are presented. It is shown that when performing a chemical analysis of the concentration of sodium ferrate in an activated sodium hydroxide solution by a gas metric method, it is recommended to take the values of the mass of sodium ferrate required to separate one milliliter of oxygen under standard conditions  $A_{O_2} = 9.869 \text{ g / l}$ , and when using the photometric method, light absorption  $\epsilon = 2,119 \text{ l / (g} \cdot \text{cm)}$ . The use of the proposed methods for analyzing the concentrations of sodium ferrate makes it possible to control the process of activation treatment of sodium hydroxide solution in an electrolyser with iron electrodes.

*Keywords: sodium hydroxide, electrolysis, sodium ferrate, gasometric method, photometric method, optical density, light absorption coefficient*

Специалистами Пензенского государственного университета архитектуры и строительства была разработана новая технология получения феррата натрия в процессе электроактивационной обработки крепкого раствора гидроксида натрия (30–40 %) в мембранном электролизере с железными электродами.

В результате проведения электролиза крепкого раствора щелочи в мембранном электролизере с железным анодом протекают следующие реакции:

анодный процесс



катодный процесс



суммарное уравнение

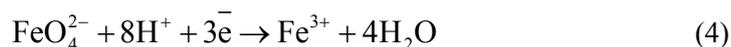


Будучи сильным окислителем, феррат натрия легко окисляет органические соединения, что должно способствовать повышению эффективности процесса реагентной очистки сточных вод. При этом феррат натрия, в отличие от хлора, не образует токсичных продуктов реакции.

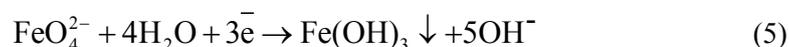
Продуктом ферратной обработки является гидроксид железа(III), обладающий ярко выраженными коагулирующими и флокулирующими свойствами. Ферратная обработка сточных вод позволит увеличить крупность образующихся хлопьев осадка и существенно интенсифицировать работу очистных сооружений.

Окислительно-восстановительный потенциал феррат-ионов зависит от уровня pH среды.

В кислой среде уровень окислительно-восстановительного потенциала феррат-ионов достигает величины  $E^0 = +2,2 \text{ В}$



В нейтральной и щелочной среде значение окислительно-восстановительного потенциала феррат ионов  $E^0 = +0,72 \text{ В}$



В процессе окисления одна молекула феррата натрия образует 5 ионов  $\text{OH}^-$ , что обуславливает повышенный уровень щелочности обработанных сточных вод.

Для контроля за эффективностью процессов электроактивационной обработки раствора гидроксида натрия возникла необходимость в разработке простого и надежного метода определения концентрации феррата натрия.

В настоящее время для определения концентрации веществ в растворе, имеющих свойство вступать в химическую реакцию друг с другом с выделением газов, широкое распространение получил газометрический метод анализа. Сущность газометрического метода анализа заключается в измерении объема газа, выделяющегося в процессе протекания химической реакции при постоянных температуре и давлении. Газометрический метод анализа прост по технике исполнения, не требует сложного, дорогостоящего аппаратного оформления и отличается точностью полученных результатов.

В основе газометрического метода анализа состава раствора гидроксида натрия, прошедшего электрохимическую активационную обработку, лежит реакция химического взаимодействия образовавшегося феррата натрия с 5 % раствором серной кислоты [1]:



В соответствии с реакцией химического взаимодействия феррата натрия с серной кислотой из двух молей феррата натрия образуется полтора моля газообразного кислорода.

Молекулярная масса одного моля феррата натрия

$$M_{\text{Na}_2\text{FeO}_4} = 2 \cdot 22,989 + 55,847 + 4 \cdot 15,999 = 165,821 \approx 165,8 \text{ г} \quad (7)$$

Один моль кислорода  $M_{\text{O}_2}$ , как и другого газа, при нормальных условиях ( $t=0^\circ\text{C}$  и  $P=760$  мм рт.ст.) занимает объем 22,4 л. Таким образом, в процессе химической реакции при нормальных условиях из 1 г феррата натрия выделится 0,10133 л кислорода:

$$\frac{1,5}{2} \frac{M_{\text{O}_2}}{M_{\text{Na}_2\text{FeO}_4}} = \frac{1,5}{2} \frac{22,4}{165,8} = 0,10133 \text{ л}. \quad (8)$$

С другой стороны, для образования 1 л (мл) кислорода в реакцию с серной кислотой должно вступить  $A_{\text{O}_2} = \frac{1}{0,10133 \text{ л}} = 9,869$  г (мг) феррата натрия.

Концентрация феррата натрия в активированном растворе гидроксида натрия может быть определена по формуле

$$C_{\text{Ф}} = A_{\text{O}_2} \frac{V_0}{V_{\text{п}}} \quad (\text{мг/л}), \quad (9)$$

где  $V_0$  и  $V_{\text{п}}$  – соответственно объем выделившегося при нормальных условиях кислорода (мл) и объем исследуемой пробы (мл).

При вычислении концентрации феррата натрия в активированном растворе гидроксида натрия по объему выделившегося кислорода при условиях, отличных от нормальных, необходимо определить  $V_0$  по уравнению

$$V_0 = V \frac{P_0 - P_{\text{H}_2\text{O}}}{P} \cdot \frac{T_0}{273 + t} \quad (\text{мл}), \quad (10)$$

где  $P_0 = 760$  мм рт.ст. и  $T_0 = 273$  К – соответственно давление и температура выделившегося газа (кислорода) при нормальных условиях;  $P$  (мм рт.ст.);  $t$  ( $^\circ\text{C}$ ) – соответственно давление и температура выделившегося газа (кислорода) при условиях проведения измерения;  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  – парциальное давление паров воды при температуре  $t$  ( $^\circ\text{C}$ ).

Фотометрический метод, будучи адсорбционным, основан на измерении величины поглощения света в ультрафиолетовой и видимой областях спектра при его пропускании через слой окрашенного раствора исследуемого вещества. Щелочной раствор феррата натрия имеет характерную красно-фиолетовую окраску [2-4].

В основе методики фотометрических измерений лежит основной закон светопоглощения (закон Бугера – Ламберта – Бера)

$$\lg \frac{I_0}{I} = \varepsilon l c, \quad (11)$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего света;  $I$  – интенсивность проходящего света;  $\varepsilon$  – коэффициент светопоглощения;  $l$  – длина оптического пути (толщина слоя кюветы);  $c$  – концентрация поглощающего вещества.

Величину  $\frac{I}{I_0}$  называют светопропусканием и обозначают символом  $T$  ( $0 \leq T \leq 1$ ).

Величину  $D$  – оптической плотностью (значение  $T=1$  соответствует  $D=0$ , а  $T=0$  соответствует  $D=+\infty$ )

$$D = \lg \frac{I_0}{I} = -\lg T. \quad (12)$$

Поскольку связь между концентрацией исследуемого вещества в растворе  $c$  и величиной оптической плотности раствора  $D$  прямо пропорциональна, то из всех возможных параметров, характеризующих светопоглощение, именно значение оптической плотности используют при фотометрии в качестве аналитического сигнала.

Согласно формуле (11)

$$D = \varepsilon l c. \quad (13)$$

Коэффициент светопоглощения  $\varepsilon$  может иметь размерность  $\frac{\text{Л}}{(\text{г} \cdot \text{см})}$  или  $\frac{\text{Л}}{(\text{моль} \cdot \text{см})}$ .

Если  $\varepsilon$  имеет размерность  $\frac{\text{Л}}{(\text{моль} \cdot \text{см})}$ , его принято называть молярным коэффициентом светопоглощения.

Определение концентрации феррата натрия в активированном растворе гидроксида натрия газометрическим методом производили на лабораторной установке, схема которой приведена на рис. 1.

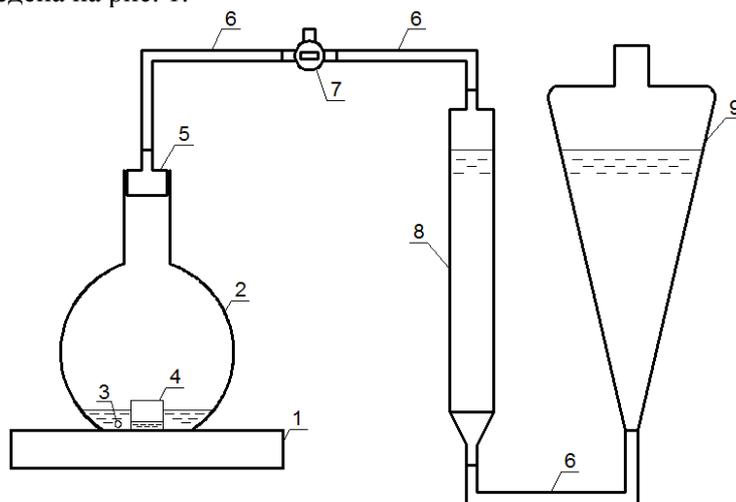


Рис. 1. Схема лабораторной установки для определения концентрации феррата натрия в активированном растворе гидроксида натрия:

1 – магнитная мешалка; 2 – колба (реакционный сосуд); 3 – якорь; 4 – стакан с исследуемым образцом; 5 – пробка с газоотводом; 6 – гибкий соединительный шланг; 7 – трехходовой кран; 8 – измерительная бюретка; 9 – компенсационная емкость

Общий вид лабораторной установки для определения концентрации феррата натрия в активированном растворе гидроксида натрия газометрическим методом приведен на рис. 2.



Рис.2. Общий вид лабораторной установки для определения концентрации феррата натрия в активированном растворе гидроксида натрия

Лабораторная установка включает в себя магнитную мешалку 1, на которой установлен реакционный сосуд (колба) 2. В колбу 2 заливается 5 % раствор серной кислоты и устанавливается стакан 4 с исследуемым образцом активированного раствора каустической соды. Также в колбе 2 размещается якорь магнитной мешалки 3. Горловина колбы 2 плотно закрывается смазанной вазелином пробкой 5. Газоотвод пробки 3 соединяется с трехходовым краном 7 гибким шлангом 6. Трехходовой кран 7 предназначается для стравливания сжатого воздуха, образующегося в колбе 2 при установке пробки 5. Трехходовой кран 7 соединяется гибким шлангом 6 с измерительной бюреткой 8. Измерительная бюретка 8 соединяется гибким шлангом 6 с компенсационной емкостью 9, предназначенной для установки уровня жидкости на отметке нуль в измерительной бюретке 8.

Определение концентрации феррата натрия в растворе гидроксида натрия газометрическим методом производили по следующей методике.

Из образца активированного раствора гидроксида натрия мерной пипеткой жидкость переливали в стакан 4 (см. рис.1). В колбу 2 заливали 100 мл 5 % раствора серной кислоты и аккуратно с помощью пинцета помещали в нее стакан 4 с анализируемой пробой активированного раствора гидроксида натрия. В колбу 2 помещали якорь магнитной мешалки 3. Закрывали колбу пробкой с газоотводом 5. Трехходовым краном 7 стравливали в атмосферу сжатый воздух, образовавшийся в колбе 2 в процессе закрытия пробки 5. Регулируя высоту уровня жидкости в компенсационной емкости 9, устанавливали высоту уровня жидкости в измерительной бюретке 8 на отметке нуль. Закрывали трехходовой кран 7. Взбалтывая содержимое колбы (реакционного сосуда) 2, опрокидывали стакан 4 таким образом, чтобы находящаяся в нем анализируемая проба активированного раствора гидроксида натрия перемешалась с серной кислотой. Устанавливали колбу 2 на магнитную мешалку 1 и приводили во вращение якорь 3. После прекращения образования кислорода измеряли высоту уровня жидкости (объем выделившегося кислорода) в измерительной бюретке 8. Измеряли величину атмосферного давления в лаборатории  $P$  (мм рт.ст.) и температуру жидкости в колбе  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).

По величине объема выделившегося при нормальных условиях кислорода  $V_0$  (мл), который определяли по формуле (10) с учетом объема исследуемой пробы  $V_p$  (мл),

вычисляли значение концентрации феррата натрия в активированном растворе гидроксида натрия  $C_{\phi}$  по формуле (9).

Произведенный расчет показал, что концентрация феррата натрия в анализируемом активированном растворе гидроксида натрия составляет  $C_{\phi}=10,3$  мг/мл.

Определение концентрации феррата натрия в активированном растворе гидроксида натрия фотометрическим методом осуществляли с использованием фотоэлектрического калориметра КФК-2МП по следующей методике.

В мерные колбы объемом  $50 \text{ см}^3$  мерной пипеткой добавляли 8,33 мл; 4,17 мл; 2,08 мл; 1,25 мл активированного раствора гидроксида натрия, содержащего феррат натрия в концентрации  $C_{\phi}=4,9$  г/л. Затем в них добавляли 40 % водный раствор гидроксида натрия до объема  $50 \text{ см}^3$  и перемешивали. Получаются растворы с кратностью разбавления исследуемого образца:  $N_1 = 6$  раз;  $N_2 = 12$  раз;  $N_3 = 24$  раза;  $N_4 = 40$  раз.

Полученный раствор заливали в кювету с толщиной слоя  $l=1$  см и определяли оптическую плотность на фотоэлектрическом колориметре КФК-2МП при длине волны  $\lambda = 540$  нм. В качестве раствора сравнения используется 40 % водный раствор гидроксида натрия.

Полученные значения оптической плотности исследуемых растворов приведены в таблице.

#### Результаты измерения концентрации феррата натрия фотометрическим методом

Кратность разбавления $N_i$ , раз	6	12	24	40
Оптическая плотность $D_{Ni}$	1,749	0,838	0,441	0,260
Коэффициент светопоглощения при длине волны $\lambda = 540$ нм $\varepsilon_{540,i}$ , $\frac{\text{л}}{(\text{г} \cdot \text{см})}$	2,142	2,052	2,160	2,123
Концентрация феррата натрия в разбавленном растворе $C_{\phi,P_i}$ , г/л	0,8167	0,4083	0,2042	0,1225

Также в таблице приведены значения концентрации феррата натрия в разбавленных растворах  $C_{\phi,P_i}$ , определенные по формуле (14), и значения коэффициента светопоглощения  $\varepsilon_{540,i}$  при длине волны  $\lambda = 540$  нм, полученные по формуле (15):

$$C_{\phi,P_i} = \frac{C_{\phi}}{N_p} (\text{г/л}), \quad (14)$$

$$\varepsilon_{540,i} = \frac{D_{Ni}}{C_{\phi,P_i} \cdot l} (\text{л}/(\text{г} \cdot \text{см})). \quad (15)$$

Среднеарифметическое значение коэффициента светопоглощения при длине волны  $\lambda = 540$  нм по результатам проведенных исследований составило:

$$\varepsilon_{540,i} = \frac{\sum_{i=1}^4 \varepsilon_{540,i}}{4} = \frac{2,142 + 2,052 + 2,160 + 2,123}{4} = 2,119 \text{ л}/(\text{г} \cdot \text{см}).$$

Полученные в ходе лабораторных исследований газометрического и фотометрического методов данные по концентрации феррата натрия в активированном растворе гидроксида натрия позволяют сделать следующие выводы:

- при проведении химического анализа концентрации феррата натрия в активированном растворе гидроксида натрия газометрическим методом значение массы феррата натрия, необходимой для выделения 1 мл газообразного кислорода при стандартных условиях, составляет  $A_{O_2}=9,869$  г/л;
- при проведении химического анализа концентрации феррата натрия в активированном растворе гидроксида натрия фотометрическим методом рекомендуется принимать значение коэффициента светопоглощения  $\varepsilon = 2,119$  л/(г·см);

- величина относительной ошибки при определении концентрации феррата натрия в активированных растворах гидроксида натрия газометрическим и фотометрическим методами составляет  $\Delta=2-4,5\%$ .

## Список литературы

1. Valtr, Z. K chémii železanov (I). Príspevok k analýze železanov / Z. Valtr, J. Toušek, A. Toušková // Chem. Zvesti. – 1957. – №11. – P.30-34.
2. Bielski, B. H. J. Studies of hypervalent iron in aqueous solutions. 1. Radiation-induced reduction of iron(VI) to iron(V) by  $\text{CO}_2^-$  / B. H. J. Bielski, M. J. Thomas // J. Amer. Chem. Soc. – 1987. – №109. – P. 7761–7764.
3. Rush, J. D. Kinetics of ferrate(V) decay in aqueous solution. A pulse-radiolysis study / J. D. Rush, B. H. J. Bielski // Inorg. Chem. – 1989. – № 28. – P. 3947–3951.
4. Rush, J. D. Reaction of ferrate (VI)/ferrate (V) with hydrogen peroxide and superoxide anion – a stopped-flow and premix pulse radiolysis study. / J. D. Rush, Z. Zhao, B. H. J. Bielski // Free Radical Res.– 1996. – №.24. – P. 187–198.

## References

1. Valtr, Z. K chémii železanov (I). Príspevok k analýze železanov / Z. Valtr, J. Toušek, A. Toušková // Chem. Zvesti. – 1957. – №11. – P.30-34.
2. Bielski, B. H. J. Studies of hypervalent iron in aqueous solutions. 1. Radiation-induced reduction of iron(VI) to iron(V) by  $\text{CO}_2^-$  / B. H. J. Bielski, M. J. Thomas // J. Amer. Chem. Soc. – 1987. – №109. – P. 7761–7764.
3. Rush, J. D. Kinetics of ferrate(V) decay in aqueous solution. A pulse-radiolysis study / J. D. Rush, B. H. J. Bielski // Inorg. Chem. – 1989. – № 28. – P. 3947–3951.
4. Rush, J. D. Reaction of ferrate (VI)/ferrate (V) with hydrogen peroxide and superoxide anion – a stopped-flow and premix pulse radiolysis study. / J. D. Rush, Z. Zhao, B. H. J. Bielski // Free Radical Res.– 1996. – №.24. – P. 187–198.

УДК 6.62; 6.691

*Ассоциация изобретателей Израиля*

Израиль, г. Хайфа

**Фиговский Олег Львович,**

доктор технических наук, профессор,

Президент Ассоциации изобретателей

Израиля

E-mail: figovsky@gmail.com

*Пермский государственный национальный  
исследовательский ун-т*

Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

**Пенский Олег Геннадьевич,**

доктор технических наук, профессор

E-mail: ogpensky@mail.ru

*Association of Inventors of Israel*

Israel, Haifa

**Figovsky Oleg Lvovich,**

Doctor of Sciences, Professor, President of the

Association of Inventors of Israel

E-mail: figovsky@gmail.com

*Perm state national research University*

Russia, 614990, Perm, 15, Bukireva St.

**Pensky Oleg Gennadievich,**

Doctor of Sciences, Professor

E-mail: ogpensky@mail.ru

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МНОГОСТВОЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ Артиллерийских Орудий

О.Л. Фиговский, О.Г. Пенский

Приведены принципиальные схемы и математические модели многоствольных артиллерийских систем, предназначенных для застреливания и извлечения строительных элементов из грунта, описаны результаты численных экспериментов, выполненных на основе предложенных математических моделей и позволяющих изучать динамику многоствольных строительных артсистем во время выстрела. Описаны математические прогнозы по заглублению свай в грунт, максимальному давлению в каналах стволов, величины и скорости отката пушек для различных условий заряжания стволов и их технических характеристик. В качестве верификации предлагаемых математических моделей описаны результаты экспериментов для одноствольных артиллерийских орудий, являющихся частным случаем многоствольных пушек.

*Ключевые слова: артиллерийская система, математическая модель, строительство, строительные элементы, свая, извлечение свай*

## MATHEMATICAL MODELS OF MULTI-BARRELED CONSTRUCTION ARTILLERY SYSTEM

O.L. Figovsky, O.G. Pensky

The article presents the schematic diagrams and mathematical models of multi-barreled artillery systems designed for shooting and retrieving building elements from the ground. It describes the results of numerical experiments performed on the basis of the proposed mathematical models and allows to study the dynamics of multi-barrelled construction artillery systems during the shot. Mathematical predictions are described for penetrating the piles into the ground, maximum pressure in the barrel channels, the size and speed of rollback of guns for various conditions of loading of trunks and their technical characteristics. As a verification of the proposed mathematical models, the results of experiments for single-barreled artillery systems, which are a special case of multi-barreled cannons, are described.

*Keywords: artillery system, mathematical model, construction, building elements, pile, piles extraction*

### Введение

В настоящее время в РФ проводятся исследования по созданию многоствольных артиллерийских систем, предназначенных для решения задач строительства. Выбор артиллерийских орудий для решения этих задач обусловлен тем, что в качестве

орудий можно выбрать пушки, снятые с вооружения и идущие на переплавку в металлолом, а в качестве порохов можно использовать устаревшие пороха, подлежащие утилизации. Эти факторы в числе прочих позволяют получить большую экономическую эффективность при создании и работе мирных пушек.

В современных строительных технологиях в настоящее время всё возрастающее значение приобретает математическое моделирование [1]. Приведем математические модели многоствольных строительных артиллерийских систем.

### Математические модели застреливания свай в грунт из многоствольных артиллерийских систем

На рис. 1 приведена принципиальная схема многоствольной артиллерийской установки.

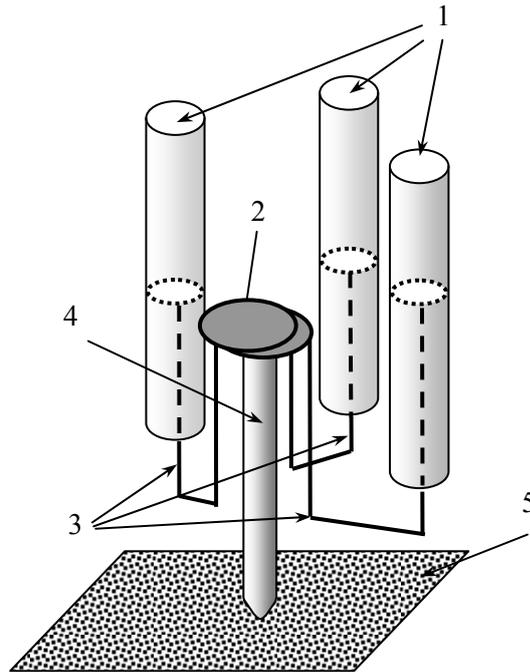


Рис. 1. Принципиальная схема многоствольной строительной артиллерийской установки

Работает установка следующим образом. В стволы 1 вставляется фигурный поршень 3 с платформой 2, которая опирается на строительный элемент 4, упирающийся в поверхность грунта 5. Во время выстрела платформа 2 давит на свая 4, в результате чего свая 4 проникает в грунт 5.

Для описания динамики импульсного вдавливания адаптирована термодинамическая теория выстрела для боевых орудий [2].

Пусть  $n$  – количество стволов в артсистеме,  $i$  – порядковый номер ствола,  $i = \overline{1, n}$ .

Предварительный период выстрела для каждого из стволов описывается известной формулой внутренней баллистики [2]:

$$\Psi_{0,i} = \frac{\frac{1}{\Delta_i} - \frac{1}{\delta_i}}{\frac{f_i}{p_{0,i}} + \alpha_i - \frac{1}{\delta_i}}, \quad (1)$$

где  $\Delta_i = \frac{\omega_i}{W_{0,i}}$ ,  $\omega_i$ ,  $W_{0,i}$ ,  $\delta_i$ ,  $f_i$ ,  $p_{0,i}$ ,  $\alpha_i$  – плотность заряжания, масса заряда, объем каморы, плотность пороха, сила пороха, давление форсирования, коэффциент пороховых газов в стволе  $i$ .

Пусть  $L_a$  – абсолютные скорость и путь сваи (строительного элемента) в грунте,  $m$  – масса строительного элемента,  $Q_i$  – вес откатных частей пушки с номером  $i$ ,  $L_{p,i}$  – путь отката откатных частей пушки с номером  $i$ ,  $M_i$  – масса откатных частей пушки с порядковым номером  $i$  в многоствольной системе,  $q$  – вес строительного элемента,  $t$  – время,  $V_i$  – скорость отката ствола  $i$ ,  $p_i$  и  $S_i$  – давление в канале и площадь поперечного сечения  $i$ -го ствола соответственно,  $\theta_i$  – показатель адиабаты пороховых газов без единицы,  $\Psi_i$  – относительная часть сгоревшего заряда в стволе  $i$ ,  $W_{\Psi_i}$  – свободный объем камеры к моменту сгорания в ней части заряда  $\Psi_i$ ,  $j$  – порядковый номер импульсного вдавливания,  $X_j$  – суммарное заглубление строительного элемента в грунт в результате  $j$  вдавливаний, где  $X_1 = 0$ ,  $F(v_a, L_a + X_j)$  – сила сопротивления грунта движению в нем строительного элемента,  $G(V_i, L_{p,i})$  – сила сопротивления откату  $i$ -го ствола.

Во время первого периода выстрела давления в стволах описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{dp_i}{dt} = & \frac{f_i \omega_i \frac{d\Psi_i}{dt} + p_i \left[ -\omega_i \left( \alpha_i - \frac{1}{\delta_i} \right) \frac{d\Psi_i}{dt} + S_i V_i + S_i v_a \right]}{S_i (L_{\Psi_i} + L_{p,i} + L_a)} + \\ & + \frac{-\theta_i F(v_a, L_a + X_j) v_a - \theta_i m v_a \frac{dv_a}{dt} - \theta_i M_i g V_i - \theta_i M_i V_i \frac{dV_i}{dt}}{S_i (L_{\Psi_i} + L_{p,i} + L_a)} + \\ & + \frac{-\theta_i G(V_i, L_{p,i}) V_i + \theta_i m g v_a + \theta_i v_a \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n S_j p_j}{S_i (L_{\Psi_i} + L_{p,i} + L_a)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $L_{\Psi_i} = \frac{W_{0,i}}{S_i} \left( 1 - \frac{\Delta_i}{\delta_i} - \Delta_i \left( \alpha_i - \frac{1}{\delta_i} \right) \Psi_i \right)$ .

$$m \frac{dv_a}{dt} = \sum_{i=1}^n S_i p_i + mg - F(v_a, L_a + X_j); \quad (3)$$

$$M_i \frac{dV_i}{dt} = p_i S_i - M_i g - G(V_i, L_{p,i}), \quad (4)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести.

$$\frac{dL_a}{dt} = v_a; \quad (5)$$

$$\frac{dL_{p,i}}{dt} = V_i. \quad (6)$$

Согласно работе [2] для вычисления относительной части сгоревшего трубчатого зерненного пороха можно воспользоваться равенством

$$\frac{d\Psi_i}{dt} = \frac{1}{I_{p,i}} p_i = \Gamma_i p_i, \quad (7)$$

где  $\Gamma_i = \frac{1}{I_{p,i}}$  – удельная интенсивность газообразования;  $I_{p,i}$  – импульс пороха в  $i$ -м стволе.

Таким образом, полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений (2)–(7) описывает первый период выстрела в стволе  $i$ .

Начальные условия для решения этой системы уравнений имеют вид:

$$\begin{cases} p_i(0) = p_{i,0}, & v_a(0) = 0, & V_i(0) = 0, \\ L_a(0) = 0, & L_{p,i}(0) = 0, & \Psi_i(0) = \Psi_{0,i}. \end{cases} \quad (8)$$

Так как второй период выстрела соответствует адиабатическому расширению пороховых газов, то уравнения моделирования для давления  $p_i$  примут вид

$$p_i = p_{i,k} \left( \frac{L_{\Psi_i=1,k} + L_{p,i,k} + L_{a,i,k}}{L_{\Psi_i=1,i} + L_{p,i} + L_a} \right)^{1+\theta_i}, \quad (9)$$

где  $L_{\Psi_i=1,i} = \frac{W_{0,i}}{S_i} (1 - \Delta_i \alpha_i)$ ;  $L_{a,i,k}$  – абсолютный путь поршня в конце первого периода выстрела для  $i$ -го ствола;  $L_{p,i,k}$  – величина отката  $i$ -го ствола в конце первого периода выстрела;  $p_{i,k}$  – давление в  $i$ -м стволе в конце первого периода выстрела.

Очевидно, что второй период выстрела для ствола  $i$  описывается системой уравнений (3)–(6), (9).

Начальные условия для этой системы уравнений имеют вид:

$$\begin{cases} v_a(0) = v_{a,k}, & V_i(0) = V_{i,k}, \\ L_a(0) = L_{a,k}, & L_{p,i}(0) = L_{p,i,k}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $v_{a,k}$  – абсолютная скорость строительного элемента в конце первого периода в стволе  $i$ ;  $V_{i,k}$  – скорость отката  $i$ -го ствола в конце первого периода выстрела.

Во время выстрела многоствольной строительной артиллерийской системы первый и второй периоды выстрела могут заканчиваться и начинаться в разные моменты времени соответственно. Поэтому расчеты с помощью приведенных уравнений внутренней баллистики нужно выполнять согласно правилу: если для орудия  $i$  выполняется условие  $\Psi_i(t) < 1$ , то для описания внутрибаллистических процессов решается задача Коши (2) – (8). Если  $\Psi_i(t) = 1$  и  $L_{p,i} + L_a \leq L_{d,i}$ , то решается задача Коши (3) – (6), (9), (10), где  $L_{d,i}$  – длина канала ствола  $i$ . Если  $L_{p,i} + L_a > L_{d,i}$ , то давление  $p_i(t) \equiv 0$ .

Очевидно, что после выхода поршня из всех каналов стволов движение свай в грунте описывается задачей Коши:

$$\begin{cases} m \frac{dv_a}{dt} = -F(v_a, L_a + X_j) + mg, \\ \frac{dL_a}{dt} = v_a, \\ v_a(0) = v_{a,d}, \\ L_a(0) = L_{a,d}, \end{cases}$$

где  $v_{a,d}$  – абсолютная скорость строительного элемента в момент выхода поршня из канала ствола, в котором дольше всего двигался поршень;  $L_{a,d}$  – абсолютный путь поршня по каналу ствола, в котором дольше всего перемещался поршень в суммарное время первого и второго периодов выстрела.

Очевидно, что величина проникания строительного элемента в грунт в результате одного импульса соответствует значению  $L_a$ , при котором выполняется равенство  $v_a = 0$  и  $X_{j+1} = X_j + L_a$ .

В работе [3] предложены математические модели импульсного вдавливания строительных элементов в грунт из многоствольных орудий с одинаковыми техническими характеристиками и условиями заряжания. Отличительной особенностью уравнений (1)–(10) является то, что они описывают импульсное вдавливание, осуществляемое за счет использования многоствольных артсистем с разными техническими характеристиками и условиями заряжания каждого из орудий, входящих артсистему. Технические решения для устранения поворотных моментов для таких орудий приведены, например, в работе [4].

Расчеты будем проводить для глинистого грунта с консистенцией 0,5. Для этого грунта сила сопротивления  $F$  движению сваи удовлетворяет соотношению [3]:

$$F = S_c (av_a^2 + c) + rzL_a(t),$$

где  $S_c$  – площадь миделевого сечения,  $v_a$  – скорость движения строительного элемента в грунте;  $r$  – удельная сила трения боковой поверхности строительного элемента о грунт;  $z$  – периметр миделевого сечения;  $L_a(t)$  – погружение строительного элемента в грунт;  $t$  – время, коэффициенты сопротивления глинистого грунта –  $a = 3422 \text{ н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$ ,  $c = 2000000 \text{ Па}$ ,  $r = 35000 \text{ Па}$ .

Численные эксперименты, основанные на предложенных математических моделях, показывают возможность застреливания свай в глинистый грунт с консистенцией 0,5 на глубину более 30 м при технических параметрах свай, орудий и условиях заряжания, приведенных в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Технические характеристики артсистемы и сваи

Количество стволов	4
Калибр каждого ствола, м	0,170
Масса откатных частей каждого ствола, кг	3600
Длина каждого ствола, м	2,345
Масса сваи, кг	600
Диаметр сваи, м	0,168
Допустимая скорость свободного отката, м/с	6,5
Допустимое максимальное давление в каждом стволе, кПа	250

Расчетные характеристики каждого из импульсных вдавливаний приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Расчетные характеристики импульсных вдавливаний

Порядковый номер импульсного вдавливания	Масса заряда, кг	Импульс пороха, кПа с	Объем камеры, м <sup>3</sup>	Заглубление, м
1	1,000	800	0,0020	8,3
2	0,875		0,0016	13,3
3	0,850		0,0020	17,3
4	0,800		0,0020	20,7
5	0,725		0,0014	23,7
6	0,675		0,0011	26,4
7	0,650		0,0010	28,2
9	0,450		0,0006	30,8

Анализ данных табл. 2 позволяет выдвинуть гипотезу о возможности применения многоимпульсного вдавливания при решении задач, связанных с необходимостью забивки свай на большую глубину в грунты средней плотности.

На основании классической термодинамической теории выстрела боевых орудий для вычисления коэффициента полезного действия многоствольных артиллерийских систем предлагается следующая модифицированная формула [3]:

$$\text{КПД}_j = \frac{\frac{mv_{\text{ад}}^2}{2} + \int_0^{L_{\text{ад}}} F(v_a, L_a + X_j) dL_a}{f \sum_{i=1}^n \varpi_i},$$

где  $v_{\text{ад}}$  – дульная скорость сваи;  $L_{\text{ад}}$  – абсолютный наибольший дульный путь сваи.

Вычисления, проведенные для первого импульсного вдавливания для одноствольного орудия типа УЗАС-2 [3], показали, что коэффициент полезного действия равен 45 %.

### Математические модели извлечения свай из грунта с помощью многоствольных артиллерийских систем

При градостроительстве зачастую возникают задачи ликвидации так называемых долгостроев. Одним из видов работ, выполняемых для этого, является извлечение свай из грунта. Многие из существующих методов, решающих эту задачу, трудно применимы при точечной застройке зданий.

На рис. 2 и 3 описана принципиальная схема многоствольной откатной артиллерийской системы, позволяющей извлекать сваи из грунта за счет энергии отката стволов при одновременном выстреле из стволов [5, 6].

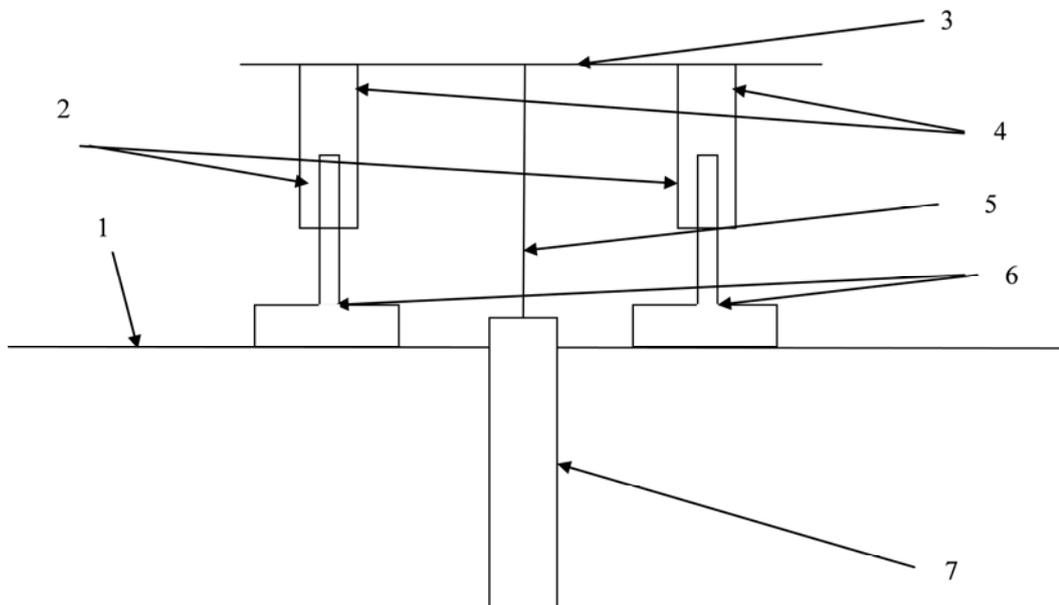


Рис. 2. Принципиальная схема извлечения свай из грунта с помощью многоствольных откатных артиллерийских орудий (вид сбоку)

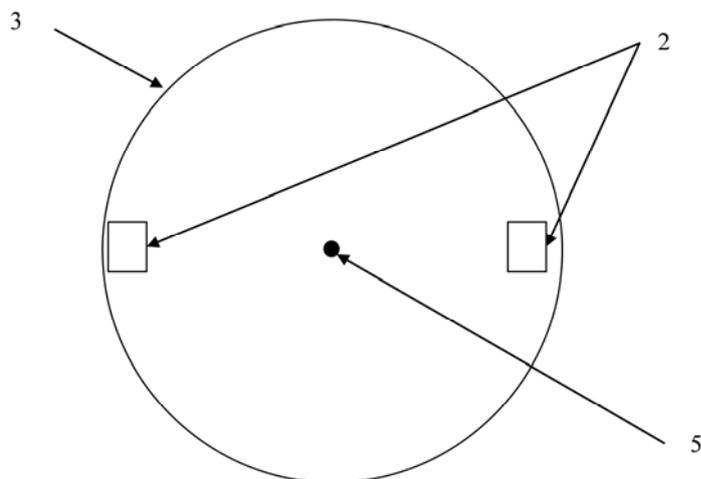


Рис. 3. Принципиальная схема извлечения свай из грунта с помощью многоствольных откатных артиллерийских орудий (вид сверху)

Способ извлечения строительных элементов из грунта с помощью многоствольных артиллерийских орудий включает следующую последовательность операций:

- штампы 6 вставляют в стволы артиллерийских орудий 2;
- на казенные части артиллерийских орудий 4 устанавливают платформу в виде круга 3 с точками соприкосновения на концах диаметра круга, причем каждая пара откатных частей артиллерийских орудий устанавливается на противоположных концах диаметров платформы 3;
- центр круга платформы 3 прикрепляется к голове извлекаемого строительного элемента 7 с помощью натянутого троса 5;
- производят синхронизированный выстрел из всех орудий;
- платформа 3, поднимаясь вверх за счет отката при выстреле, извлекает из грунта 1 строительный элемент 7.

Опишем математическую модель извлечения свай из грунта откатными частями многоствольных орудий с одинаковыми техническими характеристиками и условиями заряжания каждого из стволов, входящих в артсистему.

Для разработки математической модели будем основываться на термодинамической теории выстрела в рамках допущений этой теории [2, 7] при использовании трубчатого зернового пороха.

Предварительный период выстрела для каждого из стволов описывается известной формулой:

$$\Psi_0 = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta}}{\frac{f}{p_0} + \alpha - \frac{1}{\delta}}, \quad (11)$$

где  $\Delta$  – плотность заряжания;  $\delta$  – плотность пороха;  $f$  – сила пороха;  $p_0$  – давление форсирования штампа;  $\alpha$  – коэфф. порохом газов.

Будем предполагать, что перед выстрелом штампы упрутся в грунт.

При анализе процесса выстрела во время застреливания штампов в грунт необходимо учитывать не только часть энергии пороховых газов, которая превращается в кинетическую энергию поступательного движения строительного элемента, но и энергию, затрачиваемую на совершение другого вида работ. Это позволит установить полный баланс энергии при выстреле [2, 7].

Пусть  $n$  – количество стволов в многоствольной системе.

Определим работу по преодолению силы сопротивления грунта движению в нем штампов, выполненную за счет энергии пороховых газов.

Пусть  $v_a$  – абсолютная скорость одного штампа,  $l_a$  – абсолютный путь штампа по каналу ствола. В этих обозначениях силу сопротивления грунта  $F$  можно записать в виде соотношения

$$F = F(v_a, L_a).$$

Тогда энергию, необходимую для вдавливания штампов, количество которых равно  $n$ , на глубину  $L_a$ , можно записать в виде

$$Z_1 = n \int_0^{L_a} F(v_a, x) dx,$$

где  $\frac{dx}{dt} = v_a$ .

Таким образом, величина  $Z_1$  примет вид

$$Z_1 = n \int_0^{L_a} F(v_a, x) dx, \text{ где } \frac{dx}{dt} = v_a.$$

Очевидно, что кинетическая энергия, которую будут иметь штампы массой  $m$  в момент времени  $t$ , удовлетворяет соотношению

$$Z_2 = n \frac{mv_a^2}{2}.$$

Напомним, что стволы артиллерийской системы расположены вертикально и таким образом, что штампы во время выстрела движутся вниз. Т.е. очевидно, что энергия пороховых газов идет на перемещение стволов и свай вверх. Таким образом, совершается работа, которую можно выразить соотношением

$$Z_3 = (nQ + q_c)L_p,$$

где  $Q$  – вес откатных частей-стволов каждого артиллерийского орудия, входящего в многоствольную артсистему;  $q_c$  – вес извлекаемой сваи;  $L_p$  – перемещение откатных частей.

Кроме того, энергия пороховых газов сообщает откатным частям артиллерийского орудия и извлекаемой сваи скорость  $V$ . Следовательно, кинетическая энергия откатных частей удовлетворяет равенству

$$Z_4 = \frac{(nM + m_c)V^2}{2},$$

где  $M$  – масса откатных частей отдельной пушки,  $m_c$  – масса сваи.

Энергия, расходуемая на преодоление силы сопротивления отката, имеет вид

$$Z_5 = \int_0^{L_p} [nG(V, l_p) + F_{tr}] dl_p,$$

где  $L_p$  – путь отката,  $G(V, l_p)$  – сила сопротивления отката,  $F_{tr}$  – сила трения боковой поверхности извлекаемой сваи о грунт.

Так как штампы движутся вертикально вниз, то сила тяжести сама выполняет работу

$$Z_6 = nqL_a,$$

которая не входит в сумму работ, совершаемых за счет энергии пороховых газов.

Пусть  $E$  – энергия пороховых газов, за счет которой совершаются работы  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5$ . Тогда очевидно соотношение

$$E = \sum_{i=1}^5 Z_i - Z_6. \quad (12)$$

Величину  $E$  можно аппроксимировать в следующем виде [2, 3]:

$$E = n \left[ \frac{f}{\theta} \omega \Psi - \frac{p(W_{\Psi} + sL)}{\theta} \right], \quad (13)$$

где  $\theta$  – коэффициент адиабаты пороховых газов без единицы;  $\omega$  – масса заряда в каждом стволе;  $\Psi$  – относительная часть сгоревшего заряда в каждом стволе;  $P$  – давление в каналах стволов;  $W_{\Psi}$  – свободный объем камеры в каждом стволе к моменту сгорания в ней части заряда  $\Psi$ ;  $s$  – площадь поперечного сечения канала каждого ствола;  $L$  – путь штампа по каналу каждого ствола.

Заменяя в соотношении (12) значения  $Z_i$  их алгебраическими выражениями и учитывая формулу (13), получим равенство

$$\begin{aligned} & n \left[ \frac{f}{\theta} \omega \Psi - \frac{p(W_{\Psi} + sL)}{\theta} \right] = \\ & = n \int_0^{L_a} F(v_a, x) dx + n \frac{mv_a^2}{2} + (nQ + q_c)L_p + \frac{(nM + m_c)V^2}{2} - nqL_a + \int_0^{L_p} [nG(V, l_p) + F_{tr}] dl_p. \end{aligned} \quad (14)$$

Из уравнения (14) получаем, дифференцируя параметр давления в канале ствола  $p$  по времени  $t$ , соотношение

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} = & \frac{n \frac{f}{\theta} \omega \frac{d\Psi}{dt} - nv_a F(v_a, L_a) - nmv_a \frac{dv_a}{dt} - nQ \frac{dL_p}{dt} - q_c \frac{dL_p}{dt}}{n \frac{W_{\Psi} + sL}{\theta}} - \\ & \frac{(nM + m_c)V \frac{dV}{dt} + V[nG(V, L_p) + F_{tr}] + \frac{np(\frac{dW_{\Psi}}{dt} + sv_a + sV)}{\theta}}{n \frac{W_{\Psi} + sL}{\theta}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Очевидны следующие уравнения, описывающие поступательное движение штампа, откатных частей пушки и извлекаемой сваи:

$$m \frac{dv_a}{dt} = ps - F(v_a, L_a) + q, \quad (16)$$

$$\frac{dL_a}{dt} = v_a, \quad (17)$$

$$(nM + m_c) \frac{dV}{dt} = nps - nG(V, L_p) - F_{tr} - Q - q_c, \quad (18)$$

$$\frac{dL_p}{dt} = V. \quad (19)$$

Согласно закону горения трубчатого зернового пороха [2] справедливы соотношения

$$\frac{d\Psi}{dt} = \Gamma p, \quad \frac{dL_{\Psi}}{dt} = -a_1 \Gamma p, \quad (20)$$

$$a_1 = \frac{W_0}{s} \left( \alpha - \frac{1}{\delta} \right), \quad \Gamma = \frac{1}{I_p},$$

где  $I_p$  – полный импульс давления пороховых газов за время сгорания пороха.

Начальные условия для решения системы дифференциальных уравнений (15) – (20) запишутся в виде

$$p_{/t=0} = p_0, v_{a/t=0} = 0, V_{/t=0} = 0, \Psi_{/t=0} = \Psi_0, L_{a/t=0} = 0, L_{p/t=0} = 0.$$

Согласно термодинамической теории выстрела задача Коши [8] описывает первый период выстрела [2].

Уравнения (15) – (19) второго периода выстрела [3] эквиваленты уравнениям первого периода выстрела при условии  $\Psi \equiv 1$ . Уравнение

$$\frac{d\Psi}{dt} = \Gamma p$$

в систему уравнений не войдет. Начальные условия для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений для второго периода выстрела равны конечным значениям искомых функций задачи Коши, описывающей первый период выстрела.

На рис. 4 приведена одноствольная артиллерийская установка ( $n = 1$ ) для застреливания анкеров и свай в грунт и извлечения свай из грунта УЗАС-2 [3, 9], которая создана в г. Перми. При извлечении свай из грунта возможно использование установки следующим образом. В ствол помещается штамп с большой площадью миделевого сечения основания. К откатным частям пушки жестко прикрепляется голова извлекаемой из грунта сваи. Во время выстрела штамп на небольшую глубину проникает в грунт, а откатные части пушки поднимаются вверх, извлекая сваю из грунта. Проведем расчеты моделирования динамики извлечения сваи из грунта с помощью УЗАС-2.



Рис. 4. Установка УЗАС-2 с застреливаемым в грунт штампом

Рассмотрим глинистый грунт с консистенцией 0,5.

Сила сопротивления этого грунта ( $H$ ) прониканию штампа определяется соотношением [3]:

$$F = F(v_a, L_a) = 3422v_a^2 s_s + 2000000s_s + 35000\pi d_s L_a,$$

где  $s_s$ ,  $d_s$  – площадь миделевого сечения и диаметр каждого штампа, м.

Силы  $G(V, L_p)$  и  $F_{tr}$  удовлетворяет равенствам (Н)

$$G(V, L_p) = 0, F_{tr} = 35000\pi d_c(H_c - L_p),$$

где  $H_c$  – первоначальное заглубление извлекаемой сваи.

Для численного решения задачи динамики выстрела примем следующие характеристики орудия, условия заряжания, параметры штампа и извлекаемой сваи [9]: длина канала ствола – 1,8 м, вес заряда – 3 н, калибр ствола – 0,170 м, объем камеры – 0,001026 м<sup>3</sup>, сила пороха – 950000 дж/кг, плотность пороха – 1600 кг/м<sup>3</sup>, показатель адиабаты пороховых газов – 1,2, коволюм пороховых газов – 0,98 10<sup>-3</sup> м<sup>3</sup>/кг, полный импульс давления газов во время сгорания пороха (импульс пороха) – 376500 Па с, вес откатных частей орудия – 36000 н, диаметр головной части штампа – 0,5 м, масса штампа – 800 кг, диаметр извлекаемой сваи – 0,168 м, масса сваи – 240 кг, первоначальное проникание сваи – 4 м.

Для расчета динамики орудия была разработана специальная программа [10]. Для решения задач Коши использовался метод Рунге – Кутты 2-го порядка с шагом интегрирования 10<sup>-6</sup> с [2, 3].

Вычисления позволили получить следующие динамические показатели к концу выстрела: максимальное давление в канале ствола – 654 МПа, дульное давление пороховых газов – 4,2 МПа, величина проникания штампа в грунт – 1,13 м, величина извлечения сваи из грунта – 3,46 м. Относительная погрешность результатов вычислений от экспериментальных данных не превышает 6 %.

### Заключение

Таким образом, численные эксперименты, основанные на описанных в статье математических моделях, теоретически показали эффективность применения многоствольных артиллерийских систем для застреливания свай в грунт и извлечения свай из грунта. Эксперименты, проведенные на одноствольных системах, являющихся частным случаем многоствольных пушек, подтвердили теоретические выводы.

### Список литературы

1. Фиговский, О. Инновационные системы: достижения и проблемы: монография / О. Фиговский, В. Гумаров. – LAMBERT, 2018. – 657 с.
2. Русяк, И.Г. Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах: монография / И.Г. Русяк, В.М. Ушаков. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2001. – 259 с.
3. Маланин, В.В. Принципиальные схемы и математические модели строительных артиллерийских орудий: монография / В.В. Маланин, Е.Н. Остапенко, О.Г. Пенский, А.В. Черников. – Пермь: Изд-во ПермГУ, 2016. – 495 с.
4. Маланин В.В., Остапенко Е.Н., Пенский О.Г. Способ размещения артиллерийских орудий в многоствольной строительной артиллерийской системе. Патент РФ на изобретение RU 2 551 042 С1. 20.05.2015, бюл. №14.
5. Пенский О.Г., Мазеина Н.Н., Шестаков Е.С. Способ извлечения строительных элементов из грунта с помощью многоствольных артиллерийских орудий. Патент РФ на изобретение RU 2 653 198 С1, опубл. 07.05.2018, бюл. № 13.
6. Pensky, O. Mathematical models for extracting pile from the soil with the help of multibarreled artillery systems / O., Pensky A. Kuznetsov // Journal of computational and engineering mathematics. – 2018. – Vol 5, №1. – P. 14–22.
7. Хоменко, Ю.П. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах: монография / Ю.П. Хоменко, А.Н. Ищенко, В.З. Касимов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 255 с.
8. Тихонов, А.Н. Дифференциальные уравнения / А.Н. Тихонов, А.Б. Васильева, А.Г. Свешников. – М.: Наука, 1980. – 231 с.
9. Бартоломей, А.А. Основы импульсной технологии устройства фундаментов / А.А. Бартоломей, В.Н. Григорьев, И.М. Омельчак, О.Г. Пенский. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2002. – 189 с.

10. Пенский, О.Г. Программа расчета динамики извлечения свай из грунта с помощью многоствольных артиллерийских систем. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017660043, дата выдачи 13.09.2017.

#### References

1. Figovsky, O. Innovative systems: achievements and problems: monograph / O. Figovsky, V. Gumarov. – LAMBERT, 2018. – 657 p.
2. Rusyak, I.G. Intracamerall heterogeneous processes in barrel systems: monograph / I.G. Rusyak, V.M. Ushakov. – Ekaterinburg: Izd. UB RAS, 2001. – 259p.
3. Malanin, V.V. Schematic diagrams and mathematical models of construction artillery systems: monograph / V.V. Malanin, E.N. Ostapenko, O.G. Pensky, A.V. Chernikov. – Perm: Izd. Perm State University, 2016. – 495 p.
4. Malanin V.V., Ostapenko E.N., Pensky O.G. The method of placing artillery guns in a multi-barrelled construction artillery system. The patent of the Russian Federation for the invention RU 2 551 042 C1. 05/20/2015, bul. №14.
5. Pensky O.G, Masineina N.N, Shestakov Ye.S. The method of extracting building elements from the ground with the help of multi-barrelled artillery systems. Patent of the Russian Federation for invention RU 2 653 198 C1, publ. 05/07/2018, BUL. No. 13.
6. Pensky, O. Mathematical models for extracting pile from the soil with the help of multibarreled artillery systems / O., Pensky A. Kuznetsov // Journal of computational and engineering mathematics. – 2018. – Vol 5, №1. – P. 14–22.
7. Khomenko, Yu.P. Mathematical modeling of intraballistic processes in barrelled systems: monograph / Yu.P. Khomenko, A.N. Ishchenko, V.Z. Kasimov. – Novosibirsk: Izd. SB RAS, 1999. – 255 p.
8. Tikhonov, A.N. Differential equations / A.N. Tikhonov, A.B. Vasilyeva, A.G. Sveshnikov. – M.: Nauka, 1980. – 231 p.
9. Bartolomey, A.A. Fundamentals of the impulse technology of foundation construction / A.A. Bartolomey, V.N. Grigoriev, I.M. Omelchak, O.G. Pensky. – Perm: PSTU Publishing House, 2002. – 189 p.
10. Pensky, O.G. The program for calculating the dynamics of extraction of piles from the ground with the help of multi-barrelled artillery systems. Certificate of state registration of the computer program No. 2017660043 issued on 13.09.2017.

УДК 697.1:69.036

Нижегородский государственный  
архитектурно-строительный университет  
Россия, 603950, г. Н. Новгород,  
ул. Ильинская, д. 65,  
тел.: (831) 430-54-85.

**Бодров Валерий Иосифович,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Отопление и вентиляция»  
E-mail: bodrov\_v\_i@inbox.ru

**Бодров Михаил Валерьевич,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Отопление и вентиляция»  
E-mail: tes84@inbox.ru

**Кузин Виктор Юрьевич,**  
кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры  
«Отопление и вентиляция»  
E-mail: kuzin04@ya.ru

**Морозов Максим Сергеевич,**  
ассистент кафедры «Отопление  
и вентиляция»  
E-mail: maximoroz@yandex.ru

Nizhny Novgorod State University of  
Architecture and Civil Engineering  
Russia, 603950, Nizhny Novgorod,  
65, Iljinskaya St.,  
tel.: +7 (831) 430-54-85.

**Bodrov Valery Iosifovich,**  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Heating and ventilation»  
E-mail: bodrov\_v\_i@inbox.ru

**Bodrov Mikhail Valerievich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Heating and ventilation»  
E-mail: tes84@inbox.ru

**Kuzin Viktor Yurievich,**  
Candidate of Sciences, Senior lecturer of the  
department «Heating and ventilation»  
E-mail: kuzin04@ya.ru

**Morozov Maxim Sergeevich,**  
Assistant of the department «Heating and  
ventilation»  
E-mail: maximoroz@yandex.ru

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ БАЗОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ ЖИЛОГО ФОНДА

В.И. Бодров, М.В. Бодров, В.Ю. Кузин, М.С. Морозов

Приведены результаты расчета удельных потерь теплоты через линейные тепло-технические неоднородности узлов сопряжений наружных однослойных керамзитобетонных панелей серийного многоквартирного жилого дома после повышения тепловой защиты, полученные в результате построения температурных полей. Представлены базовые показатели энергетической эффективности систем отопления и вентиляции жилого дома при утеплении его фасадов эффективной тепловой изоляцией.

*Ключевые слова:* капитальный ремонт, многоквартирные жилые дома, строительная теплофизика, тепловая защита зданий, энергосбережение

## DETERMINATION OF BASIC INDICATORS OF ENERGY EFFICIENCY OF MICROCLIMATE SETTING SYSTEMS FOR OVERHAUL OF HOUSING STOCK

V.I. Bodrov, M.V. Bodrov, V.Y. Kuzin, M.S. Morozov

The results of calculating the specific losses of heat through linear thermo-technical inhomogeneities of the interface nodes of external single-layer expanded-clay concrete panels of a standard apartment building after increasing the thermal protection obtained as a result of the construction of temperature fields are given. The basic indicators of the energy efficiency of heating and ventilation systems of a residential house are presented when the facades are insulated with effective thermal insulation.

*Keywords:* overhaul, apartment building, construction thermal physics, buildings thermal protection, energy saving

Федеральное законодательство в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности устанавливает особые требования к лицам, ответственным за содержание существующего жилого фонда (управляющим компаниям), согласно которым последние обязаны согласовывать с собственниками жилья и впоследствии реализовывать энергосберегающие мероприятия. Одним из актуальных реализуемых мероприятий является повышение тепловой защиты наружных ограждающих конструкций многоквартирных жилых домов. Наиболее рациональным с экономической точки зрения является проведение данных мероприятий в ходе планового капитального ремонта.

Повышение энергетической эффективности теплового контура существующих многоквартирных жилых домов, возведенных по типовым сериям, является актуальной задачей, решению которой посвящены исследования в России, странах СНГ и Восточной Европы [1...4].

Наиболее распространенным решением по термомодернизации наружных фасадов зданий является устройство систем тепловой изоляции с наружным штукатурным слоем. Существующие исследования показывают, что отсутствие учета дополнительных потерь тепловой энергии через места сопряжения наружных ограждений («мостики холода») может привести к более чем двухкратному завышению расчетного положительного экономического эффекта от данного мероприятия при новом строительстве [5].

Для оценки эффективности утепления наружных ограждающих конструкций при капитальном ремонте необходимо знать величины дополнительных потерь теплоты через точечные  $\chi_k$ , Вт/(шт.·°C), и линейные  $\Psi_j$ , Вт/(м·°C), теплотехнические неоднородности, определяемые по формулам [6]

$$\chi_k = \Delta Q_k / (t_b - t_n); \quad (1)$$

$$\Psi_j = \Delta Q_j / (t_b - t_n), \quad (2)$$

где  $\Delta Q_k$ ,  $\Delta Q_j$  – дополнительные потери теплоты через точечные и линейные теплотехнические неоднородности  $k$ -го и  $j$ -го вида, приходящиеся на 1 шт. или 1 метр неоднородности, соответственно, Вт/м, Вт/шт.;  $t_b$ ,  $t_n$  – расчетные температуры внутреннего и наружного воздуха, °C.

Значения  $\Delta Q_k$  и  $\Delta Q_j$  определяются в соответствии с методикой, приведенной в [6, 7], по результатам расчета температурных полей.

Для оценки базовых показателей эффективности термомодернизации наружного фасада жилого здания в условиях г. Нижний Новгород был выбран 9-этажный двухсекционный крупнопанельный многоквартирный жилой дом широтной ориентации (серия 1-464Д/1), наружные ограждающие конструкции которого выполнены из керамзитобетонных плит толщиной 350 мм.

Авторами были просчитаны три варианта утепления наружного фасада здания эффективной тепловой изоляцией с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{\text{ут}} = 0,043$  Вт/(м·°C): при толщине утеплителя  $\delta_{\text{ут}} = 50, 100$  и  $150$  мм.

Величина  $\chi_k$  крепления тепловой изоляции тарельчатыми анкерами была принята из справочных данных [6] и равна  $\chi_k = 0,004$  Вт/(шт.·°C). Расчетное число анкеров  $n_k$ , шт./м<sup>2</sup>, составило  $n_k = 8$  шт./м<sup>2</sup>.

Значения  $\Psi_j$  получены путем обработки результатов построения температурных полей в программном комплексе Agros2D v.3.2. Схемы и рассчитанные значения  $\Psi_j$  узлов сведены в таблицу.

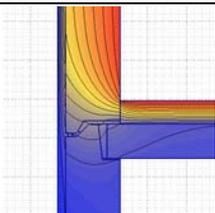
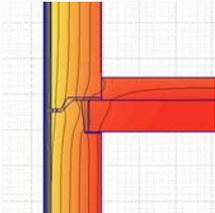
Узлы 1, 2, 4...8 имеют в конструкции термовкладыши из пенополистирола толщиной от 30 до 50 мм. В качестве светопрозрачных заполнений оконных проемов приняты имеющие широкое распространение в рассматриваемом регионе двухкамерные стеклопакеты из обычного стекла.

Наибольшие значения дополнительных потерь теплоты через линейные теплотехнические неоднородности приходится на сопряжения балконных плит и цоколя с наружными стенами ( $\Psi_j = 0,287...0,402$  Вт/(м·°C)). Примыкания оконных блоков к

стене имеют нахлест тепловой изоляции на раму высотой 60 мм, над перекрытием располагается теплый чердак с температурой воздуха в нем порядка 14 °С, что обуславливает малые значения добавочных теплотерь  $\Psi_j = 0,0017 \dots 0,091$  Вт/(м·°С) узлов 3 и 6. Внутренний угол и сопряжение внутренней и наружной стен имеют отрицательные значения  $\Psi_j$ , узлы 1 и 4 не являются мостиками холода, а напротив, вносят положительный вклад в приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен  $R_{пр}$ , м<sup>2</sup>·°С/Вт.

Характеристики узлов линейных теплотехнических неоднородностей

№, наименование	Схема	$\Psi_j$ , Вт/(м·°С), при толщине тепловой изоляции $\delta_{вт}$ , мм		
		50	100	150
1	2	3	4	5
1. Внутренний угол		-0,303	-0,222	-0,183
2. Наружный угол		0,132	0,121	0,042
3. Сопряжение оконного блока со стеной		0,040	0,072	0,091
4. Сопряжение внутренней и наружной стен		-0,015	-0,006	-0,004
5. Сопряжение балконной плиты со стеной		0,287	0,338	0,350
6. Сопряжение плиты перекрытия со стеной		0,0017	0,0015	0,0009

1	2	3	4	5
7. Примыкание к цоколю		0,335	0,378	0,402
8. Сопряжение чердачной плиты со стеной над теплым чердаком		0,010	0,012	0,013

Полученные результаты позволяют определить приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен  $R_{пр}$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , по зависимости

$$R_{пр} = R_{усл} r = \frac{1}{\frac{1}{R_{усл}} + \sum \Psi_j l_j + \sum \chi_k n_k}, \quad (3)$$

где  $l_j$  – протяженность  $j$ -й линейной теплотехнической неоднородности, приведенная к одному кв. метру наружной стены,  $\text{м}/\text{м}^2$ ;  $r$  – коэффициент теплотехнической однородности.

Для исследуемого здания коэффициент  $r$ , характеризующий эффективность проведения теплоизоляционных мероприятий, составил  $r = 0,78$  при  $\delta_{ут} = 50$  мм,  $r = 0,64$  при  $\delta_{ут} = 100$  мм и  $r = 0,54$  при  $\delta_{ут} = 150$  мм. Таким образом, положительный энергетический эффект от трехкратного увеличения толщины теплоизоляционного слоя компенсировался двукратным снижением теплотехнической однородности фасада. Учитываемое в расчете потерь теплоты через ограждения увеличение приведенного сопротивления теплопередаче при изменении  $\delta_{ут}$  с 50 до 150 мм составило всего  $0,73 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$  вместо потенциальных  $2,33 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$  (рис. 1).

Кроме того, были определены доли потерь теплоты от наружных стен, приходящиеся на однородную часть, узлы точечных и линейных теплотехнических неоднородностей  $\Lambda$ , %, соответственно по формулам

$$\Lambda = \frac{100}{1 + R_{усл} (\sum \Psi_j l_j + \sum \chi_k n_k)}; \quad (4)$$

$$\Lambda = \frac{100 \Psi_j l_j}{\frac{1}{R_{усл}} + \sum \Psi_j l_j + \sum \chi_k n_k}; \quad (5)$$

$$\Lambda = \frac{100 \chi_k n_k}{\frac{1}{R_{усл}} + \sum \Psi_j l_j + \sum \chi_k n_k}. \quad (6)$$

Зависимость значений  $\Lambda$  для узлов теплотехнических неоднородностей от толщины тепловой изоляции стен за исключением потерь теплоты через их однородную часть представлены на рис. 2.

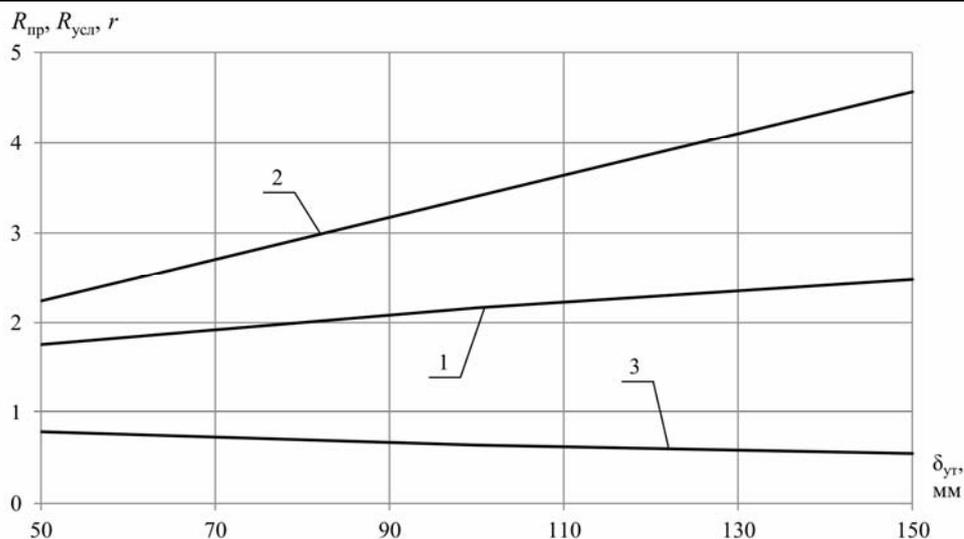


Рис. 1. Зависимость показателей тепловой защиты наружных стен от толщины тепловой изоляции:

1 –  $R_{пр}$ ,  $M^2 \cdot ^\circ C / Bт$ ; 2 –  $R_{усл}$ ,  $M^2 \cdot ^\circ C / Bт$ ; 3 –  $r$

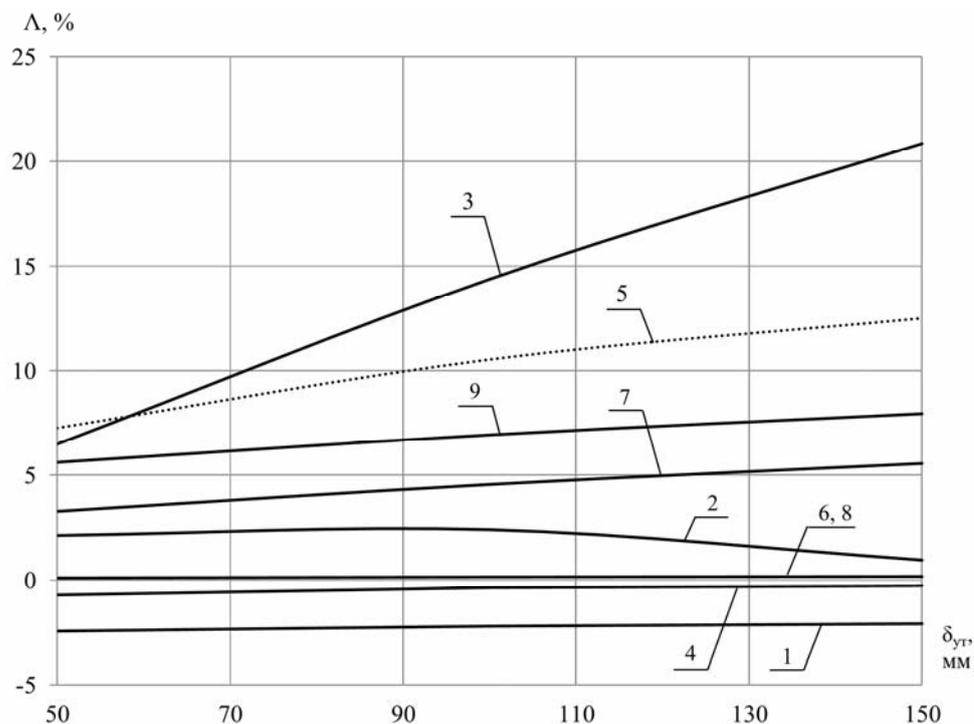


Рис. 2. Зависимость доли потерь теплоты наружных стен, приходящихся на узлы теплотехнических неоднородностей:

1...8 – соответственно узлы 1...8 таблицы; 9 – тарельчатые анкеры

Доля потерь теплоты через однородную часть составила:  $\Lambda = 78,2\%$  при  $\delta_{ут} = 50$  мм,  $\Lambda = 63,5\%$  при  $\delta_{ут} = 10$  мм и  $\Lambda = 54,3\%$  при  $\delta_{ут} = 150$  мм. От одной трети до половины всех потерь теплоты через наружные стены приходится на теплотехнические неоднородности. При увеличении толщины тепловой изоляции доля  $\Lambda$  практически всех узлов изменяется незначительно.

Основные потери теплоты через неоднородности приходятся на сопряжение оконных блоков со стеной (поз. 3, рис. 2) –  $\Lambda = 6...20,8\%$  и балконные плиты (поз. 5, рис. 2) –  $\Lambda = 7,3...12,5\%$ . Совокупный вклад в потери теплоты остальных узлов не превышает 10%. Полученные результаты иллюстрируют необходимость тщательной проработки узлов сопряжения оконных блоков и балконных плит с наружными стенами при проведении их термомодернизации.

В результате проведенных расчетов в соответствии с действующей методикой СП [8] были определены базовые показатели энергетической эффективности исследуемого здания, Вт/(м<sup>3</sup>·°C): удельные характеристики потребления тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания без и с автоматизацией его системы отопления  $q_{от.1}$  и  $q_{от.2}$  соответственно; удельные характеристики потребления тепловой энергии на отопление и вентиляцию  $k_{об}$  и  $k_{вент.}$ ; сумма удельных характеристик бытовых тепловыделений и поступлений теплоты солнечной радиации  $k_{быт} + k_{рад.}$ . Результаты расчета показаны на рис. 3.

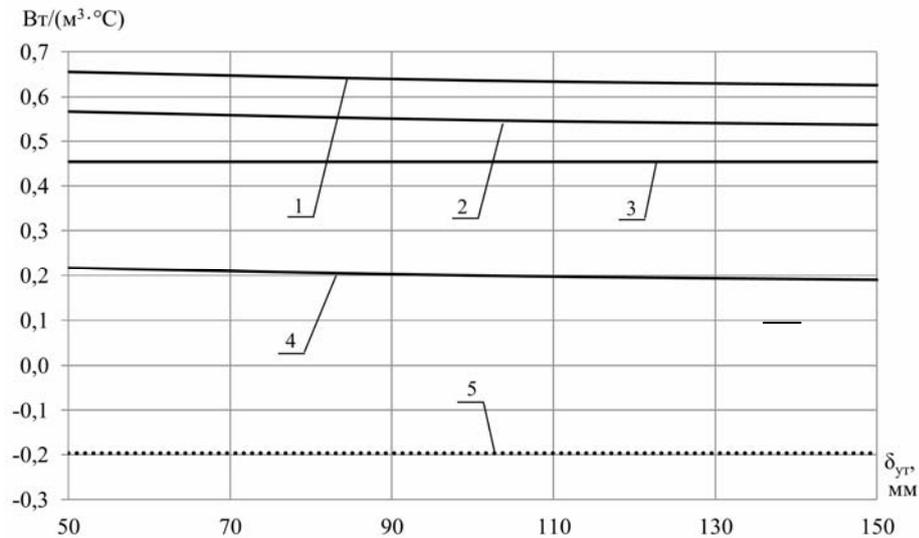


Рис. 3. Зависимость базовых показателей энергетической эффективности жилого дома:

1 –  $q_{от.1}$ ; 2 –  $q_{от.2}$ ; 3 –  $k_{вент.}$ ; 4 –  $k_{об}$ ; 5 –  $k_{быт} + k_{рад.}$

Суммарное снижение удельной теплозащитной характеристики здания составило всего лишь 0,027 Вт/(м<sup>3</sup>·°C) при увеличении  $\delta_{ут}$  с 50 до 150 мм.

В целом данное мероприятие позволяет снизить  $q_{от.1}$  и  $q_{от.2}$ , которые являются базовыми величинами для определения класса энергосбережения здания, всего на 4,3 и 5 % соответственно. В то же время расчетная доля потерь теплоты через стены от суммарных теплотерь через наружные ограждения  $N$ , %, составляет 33,9...42,1 % (рис. 4).

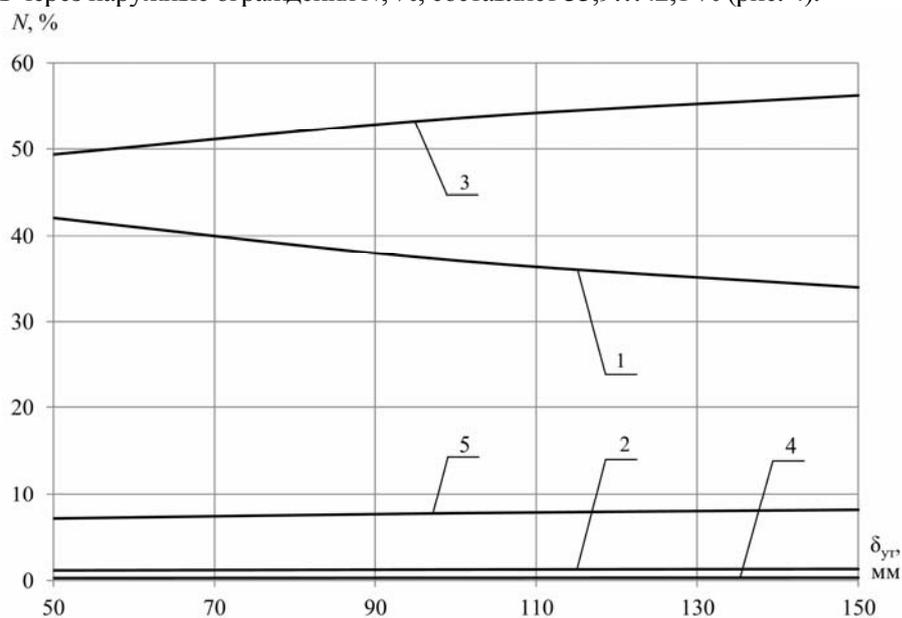


Рис. 4. Доли потерь теплоты через ограждающие конструкции жилого дома

в зависимости от толщины тепловой изоляции через:

1 – стены; 2 – чердачное покрытие; 3 – окна и балконные двери; 4 – входные двери; 5 – перекрытие над неотапливаемым цоколем

Представленные результаты свидетельствуют о том, что столь незначительный энергетический эффект от мероприятий по тепловой изоляции наружных фасадов рассматриваемого здания обусловлен в первую очередь низкой однородностью его ограждающих конструкций.

**Заключение.** Расчет температурных полей и определение теплотехнической однородности ограждающих конструкций должны быть обязательными при обосновании мероприятий по повышению тепловой защиты наружных стен серийных жилых домов при проведении их капитального ремонта.

Увеличение толщины эффективной тепловой изоляции наружных фасадов зданий выше 50 мм в условиях Нижегородской области требует дополнительного экономического расчета, что в первую очередь связано со значительным падением их теплотехнической однородности. Данное мероприятие можно рассматривать только как увеличивающее среднюю радиационную температуру в отапливаемых помещениях.

Повышение класса энергетической эффективности реконструируемых типовых серийных многоквартирных жилых домов требует комплексной, продуманной на уровне разработки проектной документации, термомодернизации их активных и пассивных систем обеспечения параметров микроклимата.

### Список литературы

1. Шилкин, Н.В. Повышение энергетической эффективности зданий в странах Прибалтики и Восточной Европы / Н.В. Шилкин // Энергосбережение. – 2011. – № 7. – С. 17–25.
2. Станкявичус, В.Ю. Расширение возможностей реконструкции зданий. Опыт Литвы / В.Ю. Станкявичус, Ю. Карбаускайте, А. Бурлингис [и др.] // Энергосбережение. – 2015. – № 7. – С. 28–35.
3. Гагарин, В.Г. Перспективы повышения энергетической эффективности жилых зданий в России / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов // Энергия: Экономика, Техника, Экология. – 2012. – № 5. – С. 25–32.
4. Одокиенко, Е.В. Проблемы капитального ремонта с позиций энергосбережения в эксплуатируемых жилых зданиях / Е.В. Одокиенко, Н.В. Маслова // Вестник НГИЭИ. – 2015. – № 2 (45). – С. 64–68.
5. Крышов, С.И. Опыт ГБУ «ЦЭИИС» по экспериментальной оценке эффективности энергосберегающих мероприятий в жилых и общественных зданиях / С.И. Крышов, И.С. Курилюк // Открытый семинар «Анализ и прогноз развития отраслей топливно-энергетического комплекса» – М.: Изд-во ИНП РАН, 2015. – С. 20–39.
6. СП 230.1325800.2015. Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей. – М.: ФАУ «ФЦС», 2015. – 67 с.
7. ГОСТ Р 54851-2011. Конструкции строительные ограждающие неоднородные. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче. – М.: Стандартинформ, 2012. – 23 с.
8. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – М.: ФАУ «ФЦС», 2012. – 95 с.

### References

1. Shilkin, N.V. Improving of energy efficiency of buildings in the Baltic countries and Eastern Europe / N.V. Shilkin // Energy saving. – 2011. – № 7. – P. 17–25.
2. Stankevičius, V.Yu. Expansion of the possibilities of building reconstruction. Experience of Lithuania / V.Yu. Stankevičius, J. Karbauskaite, A. Burlingis [etc.] // Energy saving. – 2015. – № 7. – P. 28–35.
3. Gagarin, V.G. Prospects for improving the energy efficiency of residential buildings in Russia / V.G. Gagarin, V.V. Kozlov // Energy: Economics, Engineering, Ecology. – 2012. – № 5. – P. 25–32.
4. Odokienko, E.V. Problems of overhaul from the standpoint of energy saving in exploited residential buildings / E.V. Odokienko, N.V. Maslova // Vestnik of the NNII. – 2015. – No. 2 (45). – P. 64–68.

5. Kryshov, S.I. Experience GBU «CEEIS» on the experimental evaluation of the effectiveness of energy-saving measures in residential and public buildings / S.I. Kryshov, I.S. Kurilyuk // Open seminar «Analysis and forecast of the development of the fuel and energy complex» – M.: Izdatelstvo INP RAS, 2015. – P. 20–39.
6. SP 230.1325800.2015. Constructions of enclosing buildings. Characteristics of heat engineering inhomogeneities. – M.: FAU «FTSS», 2015. – 67 p.
7. GOST R 54851-2011. Constructional building enclosing non-uniform. Calculation of reduced resistance to heat transfer. – M.: Standardinform, 2012. – 23 p.
8. SP 50.13330.2012 Thermal protection of buildings. Updated version of SNiP 23-02-2003. – M.: FAU «FTSS», 2012. – 95 p.

УДК 697.341

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

**Леонтьев Виктор Александрович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: leontievva@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

**Leontev Viktor Aleksandrovich**,  
Candidate of Science, Associate Professor  
of the department «Heat and Ventilation»  
E-mail: leontievva@rambler.ru

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ СТАНЦИИ, РАБОТАЮЩЕЙ НА БИОГАЗЕ

В.А. Леонтьев

Определено направление повышения потенциала энергетической эффективности и снижения эксплуатационных затрат городских очистных сооружений. Особое внимание уделено использованию когенерационной установки как альтернативы обычным тепловым сетям. Оценена эффективность когенерационной установки на основе использования биогаза, полученного путем утилизации илового осадка с городских очистных сооружений. Произведена оценка эффективности использования илового осадка в качестве возобновляемого источника энергии.

*Ключевые слова: малая энергетика, когенерационная установка, очистные сооружения, вторичные энергоресурсы, иловый осадок, биогаз, производство тепловой и электроэнергии, оценка эффективности*

## ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THE COGENERATION STATION WORKING ON BIOGAS

V.A. Leontev

The direction of increasing the potential of energy efficiency and reducing the operating costs of urban wastewater treatment facilities has been determined. Particular attention is paid to the use of cogeneration plant as an alternative to conventional heat networks. The efficiency of the cogeneration plant is estimated, based on the use of biogas obtained by disposing of sludge from urban wastewater treatment plants. The assessment of the efficiency of using sludge as a renewable energy source has been made.

*Keywords: small energy, cogeneration plant, wastewater treatment plants, secondary energy resources, sludge, biogas, heat and electricity production, efficiency evaluation*

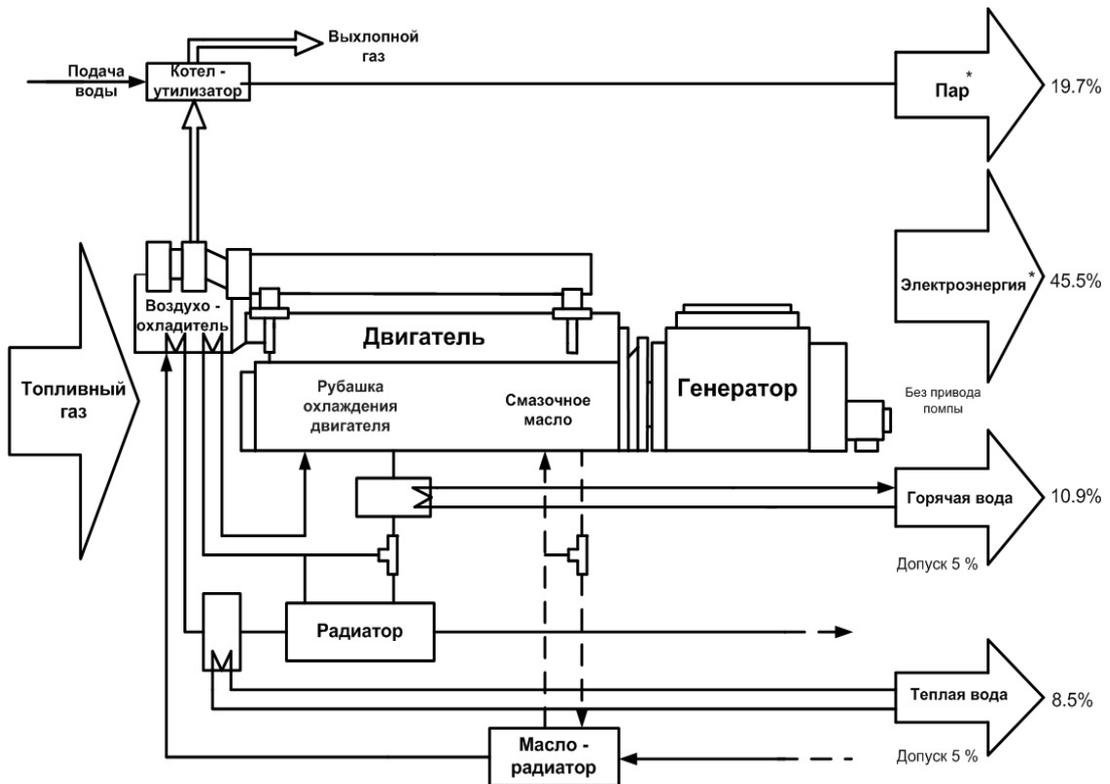
Актуальность вопросов энергосбережения требует поиска потенциала повышения энергоэффективности путем реализации как малозатратных мероприятий, так и крупных инвестиционных проектов, направленных на изменение технологии выработки тепловой и электрической энергии [1].

Одним из таких мероприятий является использование технологии получения биогаза и дальнейшего его сжигания в когенерационных установках. Когенераторная (когенерационная) установка предполагает использование первичного источника энергии – газа (биогаза) – для получения двух форм энергии – тепловой и электрической. Главное преимущество когенераторной установки перед обычными электростанциями состоит в том, что преобразование энергии здесь происходит с большей эффективностью. Иными словами, когенераторная установка позволяет использовать то тепло, которое обычно теряется.

Когенерационная установка состоит из газового двигателя, генератора, системы отбора тепла и системы управления. Тепло отбирается из системы выхлопа, масляного радиатора и системы охлаждения двигателя (см. рисунок).

Потенциальными объектами для применения когенерационных установок, работающих на биогазе, выступают промышленные производства, сельскохозяйственные предприятия, канализационные очистные сооружения, объекты ЖКХ.

В результате внедрения газопоршневых когенерационных электростанций возможно решение проблемы обеспечения потребителей теплом и электроэнергией без дополнительного строительства мощных линий электропередачи и теплотрасс. Приближенность источников к потребителям позволит значительно снизить потери передачи энергии и повысить надежность энергоснабжения.



Устройство когенерационной установки.

Особенный интерес представляет сооружение биоустановки по утилизации осадка очистных сооружений для производства биогаза. Биогаз используется в когенерационной установке как энергетическое топливо. Выработанная электроэнергия выдается в сеть, а выработанное тепло частично идет на собственные нужды.

Первичный и остаточный шламы, полученные в результате биологического процесса очищения, проходят «первичный загуститель» и блок механического обезвоживания остаточного шлама (БМООШ), после чего попадают в накопитель. Затем происходит процесс биологической переработки.

Путем подмешивания полимера достигается улучшение и стабилизация содержания сухого остатка в шламе. Появляющийся остаток сброженного материала направляется обратно на очистку.

Известно, по экологическим характеристикам биогаз на 75 % чище дизельного топлива и на 50 % – бензина. Продукты его сгорания практически не содержат канцерогенных веществ. Влияние отработавших газов двигателей, работающих на биогазе, на озоновый слой на 60–80 % ниже, чем у нефтяных видов топлива. При реконструкции городских канализационных очистных сооружений (КОС) применение энергосберегающих технологий обработки осадка сточных вод позволяет в 2 раза сократить потребление тепловой энергии, поскольку основной составляющей биогаза является метан (70–75 %), выделяемый микроорганизмами, для которых органические отходы являются питательной средой.

Преимущества мини-ТЭС на биогазе обоснованы следующими моментами:

- мини-ТЭС на возобновляемом источнике энергии – биогазе – являются экологически чистыми. Подобные проекты способствуют снижению выброса парниковых газов;
- в условиях сформировавшегося в последние годы дефицита энерго мощностей мини-ТЭС на биогазе позволят снижать нагрузку на энергосистему города и направить высвобождаемую мощность на обеспечение новых объектов градостроительства;
- такие мини-ТЭС являются наиболее современным решением проблемы ликвидации негативного воздействия сточных вод на окружающую среду;
- использование возобновляемого источника энергии – биогаза – способствует повышению энергетической и экологической эффективности работы городских очистных сооружений.

Мини-ТЭС поставляются в компактном блочно-модульном исполнении для стационарной установки или в транспортабельных контейнерах. Благодаря этому мини-ТЭС сочетают минимум занимаемого пространства в техническом помещении с минимальным объемом строительной подготовки и монтажных работ.

Кроме того, мини-ТЭС могут поставляться в специальных кожухах, с разной степенью шумоподавления. Для наращивания общей мощности автономной системы энергоблока могут работать параллельно. Все установки имеют высшую степень автоматизации и оснащаются дистанционным управлением, что позволяет на расстоянии проводить полный мониторинг и управление.

В качестве топлива для мини-ТЭС могут быть использованы как обычные газы с низкой теплотворной способностью, малым содержанием метана и низкой степенью детонации (древесный, коксовый, пиролизный газы), так и природные газы с большой теплотворной способностью (факельный, пропан, бутан). Применение газов мусорных свалок и сточных вод, имеющих значительный энергетический потенциал, защищает окружающую среду и сберегает природные ресурсы.

Для производства электро- и теплоэнергии используется инновационная технология – получение биогаза из органического остатка и дальнейшее сжигание биогаза в когенерационной установке.

При работе городских очистных сооружений канализации в результате очистки сточных вод образуются осадки в количестве 50–65 тонн сухого вещества ежедневно. Осадки способны выделять тепло при сжигании и имеют теплотворную способность ~ 3000 ккал/кг (12500 кДж/кг). Такие осадки являются основным сырьём для мини-ТЭС, запасы которого в большом количестве имеются на площадке очистных сооружений, при этом данный вид ресурса является возобновляемым.

Учитывая вышеуказанные положительные аспекты строительства когенерационной станции, работающей на биогазе, необходимо рассмотреть инвестиционную сторону проекта и финансовые показатели проекта.

Инвестиции в период строительства и эксплуатации и финансовые показатели проекта приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

На основании инвестиционных вложений рассчитывается производственный план работы мини-ТЭС.

В плане по прибыли выручка заложена с понижающим коэффициентом 0,8 по причине наличия дебиторской задолженности потребителей.

Из результатов расчётов, приведённых в табл. 2, видно, что чистая прибыль предприятия положительна на протяжении всего периода реализации проекта и составляет 21 705,38 млн руб. в год.

Необходимое условие реализуемости проекта соблюдается, т.к. показатели денежного потока для каждого интервала времени имеют положительное значение.

Показатели эффективности бизнес-плана как инвестиционного проекта представляют следующие дисконтированные критерии денежных потоков:

- чистая дисконтированная стоимость (NPV);
- внутренний коэффициент окупаемости (IRR);
- срок окупаемости;
- индекс прибыльности.

## Инвестиции в период строительства и эксплуатации

Статьи затрат	1-й год					2-й год					3-й год					4-й год	5-й год
	Всего	по кварталам				Всего	по кварталам				Всего	по кварталам					
		I	II	III	IV		I	II	III	IV		I	II	III	IV		
1. Капитальные вложения по утвержденному проекту, подлежащие выполнению, млн руб.	280	84	140	40	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2. Капитальные вложения в объекты сбыта, млн руб.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3. Приобретение оборотных средств, млн руб.	28	16	4	4	4	16	4	4	4	4	16	4	4	4	4	16	16
4. Другие инвестиции в период освоения и эксплуатации производственных мощностей, млн руб.	16	8	4	4	0	16	4	4	4	4	16	4	4	4	4	16	16
5. Итого объем инвестиций, млн руб.	324	92	148	48	20	32	8	8	8	8	32	8	8	8	8	32	32

Т а б л и ц а 2

Финансовые результаты производственной и сбытовой деятельности  
(на годовой объем), млн руб.

Показатели	1-й год					2-й год					3-й и последующие годы
	всего	по кварталам				всего	по кварталам				
		I	II	III	IV		I	II	III	IV	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Общая выручка от реализации продукции	57816,5	14454,2	14454,2	14454,2	14454,2	57816,5	14454,2	14454,2	14454,2	14454,2	57816,5
2. НДС, акцизы и аналогичные обязательные платежи от реализации выпускаемой продукции	8 819,47	2 204,88	2 204,88	2 204,88	2 204,88	8 819,47	2 204,88	2 204,88	2 204,88	2 204,88	8 819,47
3. Уплачиваемые экспортные пошлины	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4. Выручка от реализации продукции за минусом НДС, акцизов и аналогичных обязательных платежей	48997,0	12249,4	12249,4	12249,4	12249,4	48997,0	12249,4	12249,4	12249,4	12249,4	48997,0
5. Общие затраты на производство и сбыт продукции (услуг), в том числе	26 284,69	6 463,24	6 463,24	6 463,24	6 463,24	26 284,69	6 463,24	6 463,24	6 463,24	6 463,24	26 284,69

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
НДС, акцизы и аналогичные обязательные платежи, уплачиваемые из затрат на материалы, топливо, энергию	10488	2592	2712	2592	2592	10488	2592	2712	2592	2592	10488
6. Амортизационные отчисления	48150	12037,5	12037,5	12037,5	12037,5	48150	12037,5	12037,5	12037,5	12037,5	48150
7. Налоги, включаемые в себестоимость, всего, в том числе (указать каждый в отдельности)											
8. Финансовый результат (прибыль)	27 131,72	6 675,10	6 675,10	6 675,10	6 675,10	27 131,72	6 675,10	6 675,10	6 675,10	6 675,10	27 131,72
9. Налоги, относимые на финансовый результат (прибыль), всего, в том числе:											
налог на имущество	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
другие налоги (указать каждый в отдельности)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10. Погашение основного долга и выплата процентов за кредит	25200	6300	6300	6300	6300	25200	6300	6300	6300	6300	25200
11. Налогооблагаемая прибыль	1 931,72	375,10	375,10	375,10	375,10	1 931,72	375,10	375,10	375,10	375,10	1 931,72
12. Налог на прибыль	5 426,34	1 335,02	1 335,02	1 335,02	1 335,02	5 426,34	1 335,02	1 335,02	1 335,02	1 335,02	5 426,34
13. Чистая прибыль	21 705,38	5 340,08	5 340,08	5 340,08	5 340,08	21 705,38	5 340,08	5 340,08	5 340,08	5 340,08	21 705,38
14. Платежи в бюджет	14 245,81	3 539,90	3 539,90	3 539,90	3 539,90	14 245,81	3 539,90	3 539,90	3 539,90	3 539,90	14 245,81

Продисконтируем платежи и поступления и вычислим текущую дисконтированную стоимость (ТДС) и  $NPV$ .

$$ТДС = (P_T - Z_T) / (1 + E)^T, \quad (1)$$

где  $P_T$  и  $Z_T$  – результат (доход) и затраты (размер инвестиций) на  $t$ -м шаге расчетов;  $T$  – временной период, принимаемый по срокам реализации проекта (по условиям примера – 5 лет);  $E$  – ставка дисконта (барьерная), отражающая ежегодную относительную величину убывания стоимости денег (в примере 15 %). Эта ставка соот-

ветствует промежуточной величине между средней ставкой процента по валютным (долларовым) долгосрочным кредитам и средней процентной ставкой по валютным вкладам (депозитам).

Выражение  $1 / (1 + E)^T$  называется коэффициентом дисконтирования (КД). Он всегда меньше единицы, то есть сумма денег, находящаяся на руках сегодня, больше той же суммы в будущем.

$$NPV = \sum_{t=0}^T (P_T - Z_T) \times \text{КД}. \quad (2)$$

Если разность положительная, осуществлять инвестиции целесообразно: в будущем инвестор получит больше средств, чем было вложено.

Коэффициент дисконтирования  $d$  без учета риска проекта  $i$  определяется как отношение ставки рефинансирования  $r$ , установленной Центральным банком Российской Федерации, и объявленного Правительством Российской Федерации на текущий год темпа инфляции  $i$ :

$$1 + d_i = \frac{1 + \frac{r}{100}}{1 + \frac{i}{100}}. \quad (3)$$

На 20 сентября 2018 ставка рефинансирования равна 7,5 %, планируемый уровень инфляции в 2018 г., по прогнозам Министерства финансов РФ, – 6 %, тогда  $1 + d_i = 1,014$ .

Поправка на риск проекта определяется по данным табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Величина риска	Пример цели проекта	P, процент
Низкий	вложения при интенсификации производства на базе освоенной техники	3 – 5
Средний	увеличение объема продаж существующей продукции	8 – 10
Высокий	производство и продвижение на рынок нового продукта	13 – 15
Очень высокий	вложения в исследования и инновации	18 – 20

Коэффициент дисконтирования, учитывающий риски при реализации проектов, определяется по формуле

$$d = 0,19 + 5/100 = 0,69 \text{ или } 6,9 \%. \quad (4)$$

Результаты расчета  $NPV$  приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Расчёт чистого дисконтированного потока

Год	Инвестиции	ПР(P)+A <sub>0</sub>	Платежи и поступления	КДЕ =7 %	ТДС
0,00	-280000,00		-280000,00	1,00	-280000,00
1,00		69739,00	69739,00	0,93	65176,64
2,00		69739,00	69739,00	0,87	60912,74
3,00		69739,00	69739,00	0,82	56927,80
4,00		69739,00	69739,00	0,76	53203,55
5,00		69739,00	69739,00	0,71	49722,94
	-280000,00	348695,00	68695,00		5943,67

Проведенные расчеты доказали эффективность ( $NPV > 0$ ) применения когенерационной установки, использующей в качестве топлива биогаз, полученный путем утилизации илового осадка с городских очистных сооружений.

#### Список литературы

1. Леонтьев, В.А. Использование биогаза как инструмент повышения энергоэффективности / В.А. Леонтьев // Приднепровский научный вестник. – 2018. – № 3. – С.11.
2. Диксон, Дж. Проектирование систем: изобретательство, анализ, принятие решений / Дж. Диксон; пер, с англ. В.Г. Коваленко. – М.: Мир, 2009. – 440 с.

#### References

1. Leontev, V.A. Use of biogas as a method for increasing energy efficiency / V.A. Leontev // Pridneprovsky research journal. – 2018. – №3. – P.11.
2. Dixon, John R. Design Engineering: Inventiveness Analysis and Decision Making / John R. Dixon; translation V.G. Kovalenko. – M.: Mir, 2009. – 440 p.

УДК 519.64

*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

**Кошев Александр Николаевич**,  
доктор химических наук, профессор,  
советник РААСН, действительный член  
Нью-Йоркской академии наук и Академии  
информатизации образования, профессор  
кафедры «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: koshev@pguas.ru

**Кузина Валентина Владимировна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: kuzina@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

**Koshev Alexander Nikolaevich**,  
Doctor of Chemistry Science, Professor,  
Adviser of the Russian Academy of  
Architectural and Building Sciences Full  
Member of the New York Academy of  
Sciences and Academy of Information of  
education, Professor of the department  
«Information and computing systems»  
E-mail: koshev@pguas.ru

**Kuzina Valentina Vladimirovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Information and  
computing systems»  
E-mail: kuzina@pguas.ru

## ОПТИМАЛЬНАЯ РАССТАНОВКА УЗЛОВ РАЗБИЕНИЯ ИНТЕРВАЛА ИНТЕГРИРОВАНИЯ ПРИ ЧИСЛЕННОМ РЕШЕНИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ МЕТОДОМ БОГОЛЮБОВА – КРЫЛОВА

А.Н. Кошев, В.В. Кузина

Рассматривается возможность численного решения задач строительства, приводящих к уравнениям Фредгольма I и II рода, методом Боголюбова – Крылова при неравномерной сетке узлов разбиения интервала интегрирования. Приводится пример вычисления оптимальной расстановки узлов разбиения интервала интегрирования при решении тестовой задачи.

*Ключевые слова: интегральное уравнение Фредгольма, метод Боголюбова – Крылова, расстановка узлов разбиения интервала интегрирования, задачи строительства*

## NUMERICAL SOLUTION OF INTEGRAL EQUATIONS BY THE BOGOLYUBOV – KRYLOV METHOD WITH AN OPTIMAL ARRANGEMENT OF THE NODES PARTITION OF THE INTEGRATION INTERVAL

A.N. Koshev, V.V. Kuzina

The possibility of numerical solution of construction problems leading to the Fredholm equations of the I and II kind, the Bogolyubov – Krylov method with an uneven grid of nodes splitting the integration interval is considered. An example is given of the calculation of the optimal arrangement of the splitting nodes of the integration interval when solving a test problem.

*Keywords: an integrable equation of Fredholm, Bogolyubov – Krylov method, arrangement of nodes of partition of an interval of integration, construction task*

Задачи строительных наук, приводящие к интегральным уравнениям, возникают при решении различных вопросов теории упругости, теории колебаний и др. К интегральным уравнениям приводятся задачи, в которых значение искомой величины в той

или иной точке зависит от совокупности значений этой величины в других точках некоторой области. Эта зависимость, как правило, включает в себя совокупность некоторых определенных интегралов.

В различных расчетных задачах современного строительства широко применяются численные методы решения краевых задач расчета конструкций. Наиболее распространенным является метод граничных интегральных уравнений, который базируется на использовании функции Грина на расширенной области, включающей и область, занимаемую конструкцией. Другой возможный путь получения граничных интегральных уравнений заключается в применении формулы Сомильяны в сочетании с формулами Грина на неограниченной области [1]. Удобство метода состоит в том, что в качестве неизвестных в интегральные уравнения входят функции только на границе области, в то время как при решении краевой задачи разностными методами требуется нахождение функций во всей области. Основным отличием метода граничных интегральных уравнений от метода конечных элементов при аппроксимации является способ дискретизации (в случае интегральных уравнений она осуществляется не внутри области, а на границе) [2].

Метод обладает большей точностью по сравнению с другими численными методами за счет того, что решение задачи зависит только от значений напряжений и перемещений на границе и точно удовлетворяет уравнениям внутри области. Размерность задач здесь ниже на единицу, получаемая разрешающая система относительно граничных точек хорошо обусловлена, однако матрица коэффициентов при неизвестных, как правило, полностью заполнена и несимметрична. Применение метода также усложняется наличием интегралов от сингулярных функций.

Существенным недостатком метода граничных интегральных уравнений является его опора на существование простого аналитического выражения фундаментального решения системы дифференциальных уравнений. Вследствие этого он менее эффективен для расчета конструкций с переменными свойствами материала, непрерывно зависящими от координат.

Решение сложных пространственных задач теории упругости с помощью только аналитических либо только численных методов с достаточной для практики точностью расчётов часто оказывается весьма затруднительным. Поэтому в исследованиях предпочтение отдаётся численно-аналитическим методам, когда построенные аналитические решения пространственных задач теории упругости исследуются численно и анализируются на компьютере.

Так, например, в [3] показано применение метода нелинейных граничных интегральных уравнений для приближенного решения трёхмерной квазистатической контактной задачи о взаимодействии линейно-упругих тел при наличии кулонова трения между ними.

Оригинальным аналитическим решениям контактных задач и методам их численной реализации посвящены работы [4, 5].

В [6] приводится аналитическое решение осесимметричной задачи о действии распределенной нагрузки на полупространство при заданных смешанных условиях на его границе, полученное с помощью интегрального преобразования Ханкеля. При построении решений смешанных задач использованы отдельные положения теории интегральных уравнений Фредгольма второго рода, ряды Неймана, специальные функции Бесселя, Неймана, Струве, гамма-функции, эллиптические интегралы первого и второго рода. Численное решение интегральных уравнений осуществлено с помощью метода последовательных приближений.

Ahmadi S.F., Eskandari M. [7] исследовали вдавливание осесимметричного жесткого штампа в изотропное полупространство, покрытое упругой тонкой плёнкой. С помощью потенциальных функций перемещения и преобразования Ханкеля задача была сведена к интегральному уравнению Фредгольма второго рода.

Учет слоистости полупространства при решении контактных задач особенно важен в строительной механике. Современные подходы к решению контактных задач этого класса могут быть проиллюстрированы на примере работы [8], в которой осесим-

метричная контактная задача для трехслойного упругого полупространства сведена к интегральному уравнению Фредгольма второго рода, его приближенное решение получено методом коллокаций по узлам полинома Лежандра.

Рассмотрим далее интегральное уравнение Фредгольма II рода

$$\zeta\omega(x) = \int_a^b K(x, y)\omega(y)dy + C \quad (1)$$

при некотором дополнительном условии:

$$\int_a^b \omega(y)dy = 1. \quad (2)$$

Здесь  $\zeta$  – параметр,  $C$  – некоторая неизвестная константа,  $x, y \in [a, b]$  – переменные,  $\omega(x)$  – искомая функция,  $K(x, y)$  – ядро интегрального уравнения.

По квадратурным формулам система интегральных уравнений (1)–(2) может быть сведена к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), решение которой при  $\zeta$ , больших некоторого  $\zeta_{кр}$ , затруднений не вызывает. Однако при  $\zeta = 0$  задача некорректна (по Тихонову А.Н.), в силу чего решение ее при  $0 \leq \zeta \leq \zeta_{кр}$  обычными методами затруднительно.

Для решения некорректных задач, аналогичных задаче (1)–(2), при  $\zeta = 0$  существуют классические методы регуляризации. Однако численная реализация регуляризирующих алгоритмов осуществима не всегда просто. В связи с этим интересной является задача отыскания таких квадратурных формул, которые позволяли бы решать подобные задачи без применения регуляризации.

За основу метода решения задач типа (1)–(2) возьмем известную формулу Боголюбова – Крылова для вычисления определенного интеграла. После применения этой формулы задача (1)–(2) сводится к системе линейных алгебраических уравнений:

$$z_i = \zeta\omega_i - \sum_{j=1}^n a_{ij}\omega_j - C = 0, \quad (3)$$

$$z_{n+1} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \omega_j - 1 = 0, \quad (4)$$

где  $a_{ij} = \int_{x_j - \Delta x_j / 2}^{x_j + \Delta x_j / 2} K(x, y)dy$  – узлы разбиения интервала  $[a, b]$ ;  $\omega_i = \omega(x_i)$ ;  $\Delta x_j$  – шаг разбиения;  $n$  – количество узлов.

К достоинствам формулы Боголюбова – Крылова следует отнести тот факт, что при ее использовании появляется свобода в планировании расстановки узлов  $x_j$  в разбиении интервала  $[a, b]$  на основе априорной информации о решении. Например, количество узлов разбиения интервала интегрирования увеличивается там, где предполагаемое решение претерпевает наиболее быстрые изменения. Кроме того, при малых значениях  $\zeta$ , что обуславливает некорректность системы (1)–(2), появляется возможность за счет правильной расстановки узлов разбиения интервала интегрирования повысить обусловленность системы линейных уравнений, соответствующих разностному аналогу задачи (1)–(2), и тем самым препятствовать расходимости итерационного решения СЛАУ.

Продemonстрируем применимость обсуждаемого метода на решении задачи (1)–(2) с ядром интегрального уравнения  $K(x, y) = \ln|x^2 - y^2|$ .

При численных расчетах выбрано 10 узлов  $x_j$  разбиения интервала  $[0,1]$ , сначала равномерно расставленных на всем интервале. При дальнейших расчетах было использовано второе отмеченное достоинство формулы Боголюбова – Крылова, а именно возможность выбора  $x_j$  на основе априорной информации о ее решении.

В задаче (1) – (2) такой информацией является то, что при малых  $\zeta$  распределение должно резко возрастать к правому краю интервала  $[0,1]$  при  $x$ , близких к единице, что видно из известной формулы аналитического решения задачи при  $\zeta = 0$ :

$$\omega(x) = 2 / \left( \pi \sqrt{1 - x^2} \right). \quad (5)$$

Зависимость числа обусловленности (*cond*) СЛАУ, образующейся при дискретизации задачи, от плана расстановки узлов  $\{x_j\}$  на интервале  $[0,1]$  показана в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Зависимость числа обусловленности (*cond*) и точности решения (невязка) от расстановки узлов разбиения интервала интегрирования

Разбиение											<i>cond</i>	Невязка
0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	14,8	0,52
0,0	0,05	0,11	0,19	0,36	0,51	0,64	0,75	0,84	0,91	1,0	21,9	0,57
0,05	0,14	0,22	0,39	0,54	0,67	0,78	0,87	0,94	0,95	1,0	69,2	1,41
0,0	0,5	0,7	0,9	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,0	153,9	5,20

Из данных, приведенных в табл. 1, видна зависимость точности решения и числа обусловленности СЛАУ от распределения точек  $\{x_j\}$  на рассматриваемом интервале. Лучшее распределение, найденное нами из условия минимизации числа обусловленности, приведено в табл. 2 (*cond* = 8,35).

Т а б л и ц а 2

Оптимальное распределение узлов  $\{x_j\}$  на интервале  $[0,1]$

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
0,095	0,275	0,435	0,575	0,695	0,795	0,875	0,935	0,975	0,995

В табл. 3 приведены результаты численных экспериментов для различных последовательностей  $\{x_j\}$  и точное решение задачи по формуле (5).

Т а б л и ц а 3

Первая строка – точное решение, вторая и третья – численное решение

0,637	0,644	0,657	0,680	0,713	0,762	0,838	0,962	1,208	2,033
0,648	0,655	0,669	0,692	0,727	0,780	0,860	0,996	1,212	2,759
0,639	0,643	0,658	0,679	0,713	0,763	0,837	0,957	1,190	2,280

В первой строке содержатся результаты решения задачи (1)–(2) на основе формулы (5). Во второй – численное решение той же задачи, полученное после применения формулы Боголюбова – Крылова с равномерной расстановкой узлов разбиения интервала  $[0,1]$ , в третьей строке – с узлами неравномерного разбиения, приведенными выше. В этом случае решение проинтерполировано на середины отрезков равномерного разбиения.

Как видно, при одинаковом числе узлов разбиения интервала  $[0,1]$  точность решения значительно повышается от их планирования.

Таким образом показано, что некорректность задачи (1) при  $\zeta = 0$  влечет за собой плохую обусловленность матрицы коэффициентов линейной системы (3) – (4). Расстановка узлов  $x_j, j = \overline{1, n}$ , позволяет в ряде случаев повысить обусловленность системы,

что можно использовать при оптимальном выборе  $x_j$ , наряду с априорной информацией о решении.

Кроме того, возможность расстановки узлов интегрирования при решении интегральных уравнений позволяет использовать априорную информацию о решении, например информацию о скорости изменения функции.

### Список литературы

1. Кайтуков, Т.Б. Методы дискретных граничных уравнений для решения задач расчета сооружений: дис. ... к.т.н. / Т.Б. Кайтуков. – М., 2002.
2. Отчет о выполнении подраздела мероприятий по социальному обслуживанию населения в части предоставления образовательных услуг жителям города Москвы / И.А. Енговатов, науч. рук. Т.Б. Кайтуков. – М.: МГСУ, 2009. Материал с сайта: <http://www-old.mgsu.ru>.
3. Александров, А.И. Метод нелинейных граничных интегральных уравнений для контактных задач теории упругости / А.И. Александров, Ю.М. Стреляев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 3, № 7 (69). – С. 36–40.
4. Chen Shaohua. Non-slipping adhesive contact of an elastic cylinder on stretched substrates / Shaohua Chen, Huajian Gao // Proc. R. Soc. A, January 8, 2006. – 462. – P. 211–228.
5. Shillor, Meir. Quasistatic problems in Contact Mechanics / Meir Shillor // Int. J. Appl. Math. Comput. Sci. – 2001. – Vol. 11, № 1. – P. 189–204.
6. Залётов, С.В. Осесимметричная задача о действии нормальной нагрузки на изотропное полупространство с упругозакрепленной границей: дис. ... к.ф.-м.н. / С.В. Залётов. – Таганрог, 2016.
7. Ahmadi, S.F. Axisymmetric circular indentation of a half-space reinforced by a buried elastic thin film / S.F. Ahmadi, M. Eskandari // Mathematics and Mechanics of Solids. – 2014, Jul 6. On line First Version 2013 May 1. –1081286513485085.
8. Калякин, А.А. О взаимодействии штампа со слоистым упругим основанием / А.А. Калякин // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47, №3. – С. 165–175.

### References

1. Kaitukov, T.B. Methods of discrete boundary equations for solving problems of calculation of structures: Diss. Ph. D. / T.B. Kaitukov. – M., 2002.
2. Report on the implementation of the subsection measures for social services of the population in terms of providing educational services to residents of Moscow / I.A. Engovatov, supervisor B. T. Kaitukov. – M.: Moscow state University of civil engineering, 2009. Material from the site: <http://www-old.mgsu.ru>.
3. Aleksandrov, A.I. Nonlinear boundary integral equations method for contact problems of the elasticity theory / A.I. Aleksandrov, Y.M. Streljaev // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2014. – Vol. 3, No 7(69). – P. 36–40.
4. Chen Shaohua. Non-slipping adhesive contact of an elastic cylinder on stretched substrates / Shaohua Chen, Huajian Gao // Proc. R. Soc. A, January 8, 2006. – 462. – P. 211–228.
5. Shillor, Meir. Quasistatic problems in Contact Mechanics / Meir Shillor // Int. J. Appl. Math. Comput. Sci. – 2001. – Vol. 11, № 1. – P. 189–204.
6. Zaletov, S.V. Axisymmetric problem on the action of a normal load on an isotropic half-space with an elastically fixed boundary: Diss. Phys-M. SC. / S.V. Zaletov. – Taganrog, 2016.
7. Ahmadi, S.F. Axisymmetric circular indentation of a half-space reinforced by a buried elastic thin film / S.F. Ahmadi, M. Eskandari // Mathematics and Mechanics of Solids. – 2014, Jul 6. On line First Version 2013 May 1. –1081286513485085.
8. Kalyakin, A. A. On the interaction of a stamp with a layered elastic base / A.A. Kalyakin // Applied Mechanics and Technical Physics. – 2006. – Vol. 47, №3. – P. 165 – 175.

# АРХИТЕКТУРА

# ARCHITECTURE

УДК 711.4-16(470.40-21)

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

**Берсенева Марина Александровна**,  
старший преподаватель кафедры «Основы  
архитектурного проектирования»  
E-mail: marina\_o2512@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

**Berseneva Marina Alexandrovna**,  
Senior lecturer of the department  
«Fundamentals of architectural design»  
E-mail: marina\_o2512@mail.ru

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ КОМФОРТНОСТИ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ НА ПРИМЕРЕ Г.ПЕНЗЫ

М.А. Берсенева

Определяются методологические основы оценки комфортности городской среды на примере города Пензы. Дается оценка уровня комфортности городской среды. Учитываются следующие показатели: транспортная доступность, наличие организованных общественных пространств, доступность городских объектов для всех категорий населения, удобная планировка уличной сети. Показана зависимость уровня комфортности городской среды от степени благоустройства территории. Анализируется эволюция уровня благоустройства городских общественных пространств от дореволюционного периода до современного этапа. Проведено сравнение оценки комфортности, данной жителями, с полученными показателями интегральной оценки состояния окружающей среды городских пространств г. Пензы.

*Ключевые слова: город, комфортная среда, благоустройство территории, общественное пространство*

## METHODOLOGICAL BASES FOR ASSESSING THE URBAN ENVIRONMENT COMFORT ON THE EXAMPLE OF PENZA

M.A. Berseneva

The methodological basis for assessing the comfort of the urban environment is determined by the example of the city of Penza. An assessment of the comfort level of the urban environment is given. The following indicators are taken into account: transport accessibility, presence of organized public spaces, availability of urban facilities for all categories of population, convenient planning of street network. The dependence of the level of comfort of the urban environment on the degree of improvement of the territory is shown. The evolution of the level of improvement of urban public spaces from the pre-revolutionary period to the present stage is analyzed. The comparison of the assessment of comfort by residents with the obtained indicators of an integrated assessment of the state of the environment of urban spaces in Penza is made.

*Keywords: city, comfortable environment, landscaping, public space*

Совсем недавно стартовал проект «ЖКХ и городская среда», направленный на благоустройство жилых дворов, создание и благоустройство общественных пространств, качественное содержание городской среды. Предполагалось, что решение о благоустройстве должно приниматься вместе с горожанами. Это позволяет жителям решать, какое общественное пространство нужно обустроить, отчеты об общественных обсуждениях публикуются на сайтах каждого муниципалитета. Горожане принимают участие в озеленении улиц. Отмечено, что в 2017 году в городах и населенных пунктах с количеством жителей более 1000 человек было благоустроено 2700 парков и других общественных зон [1], из них 220 – парки в малых городах. Создаются такие общественные пространства, как набережные и площади, скверы и парки, пешеходные улицы. Например, в рамках учебных курсовых проектов под руководством автора студенты Пензенского государственного университета архитектуры и строительства (ПГУАС) решают задачи озеленения и благоустройства города. При проектировании скверов в городе Пензе, а также при разработке предложений по реорганизации их территорий, был разработан целый ряд эскизных проектов. Они выражают главную идею – повышение уровня комфортности городской среды. Целью данного исследования было определить уровень комфортности городской среды в Пензе на разных этапах развития города, а также в разных его районах на современном этапе его развития.

Рассмотрим, как уровень комфортности среды изменялся в городе Пензе от его основания до настоящего времени и каковы перспективы его роста в будущем. При этом комфортную городскую среду будем рассматривать как пространство, максимально приспособленное под нужды горожан. Комфортность города для его жителей определяется прежде всего следующими факторами:

- транспортная доступность;
- доступность необходимых услуг и сервисов (от государственных до коммерческих услуг), в том числе в шаговой доступности;
- доступность объектов для всех категорий населения;
- наличие организованных общественных пространств;
- удобная планировка уличной сети.

Из истории Пензы известно, что изначально город был малоблагоустроенным. Такое положение СОХРАНЯЛОСЬ вплоть до 60-х годов 19 века, когда началось мощение улиц [2]. Из памятной книжки 1864 г. известно «не совсем обыкновенное устройство тротуаров и мостовых. Тротуары делаются здесь из досок, ... в виде мостков, чрезвычайно скоро портящихся, а к правильному устройству мостовых приступлено только в 1862 году, совершенно вымощенной можно было назвать только одну улицу – Московскую» [2, с.100]. Связано это было с недостатком качественного камня. Но все же постепенно улицы города Пензы приводили в порядок. В 1901 году появилось первое уличное освещение, состоявшее из двух фонарей.

Рекреационные территории были благоустроены в городе Пензе несколько раньше. Так, на вершине Боевой горы на месте Шипин-бора был организован парк, именованный «Городское гуляние», позже названный «Верхнее гуляние». Начало его благоустройства было положено в 1821 году, когда вышел указ императора Александра I «Об устройении городов» [3, с.433]. Благоустройством парка занимались садовод-ученый Э.Магзиг и еще 149 человек. Работы велись 23 дня, было изготовлено 10 фонарей, беседки, скамейки, загородки при входе. С 1911 г. парк стал именоваться «Городской парк им. В.Г. Белинского» по случаю 100-летия со дня рождения известного критика. В 1928 году в парке была открыта народная обсерватория им. И.Н.Ульянова. Планировка парка разбита в пейзажном стиле, включающем природный ландшафт с дубравой. В 1975 году площадь парка составляла 370 га, включая пригородный лес. На территории парка было 30 аттракционов, террариум с аквариумом, канатная подвесная дорога. Парк считался одним из лучших в стране. На тропе здоровья, организованной в парке, открывались великолепные панорамы города с видовых площадок.

В целом город Пенза в 70–80-х годах 20 века становится самым благоустроенным и зеленым городом Поволжья [4]. Щербаков Александр Евгеньевич, работавший в этот

период председателем исполкома Пензы, вспоминал, как каждый кусок земли, освобожденный от ветхой застройки в центре города, был озеленен и благоустроен. В Пензе было организовано множество скверов и бульваров. Многие из них к концу 20 века стали приходить в упадок.

На сегодняшний день в городе существует проблема обновления и дополнительного благоустройства озелененных территорий. В первую очередь это связано с организацией комфортной среды жилых дворов. Общественные и рекреационные пространства также требуют преобразования, создания комфортной среды высокого художественного уровня.

Примером городской среды высокого уровня комфортности может служить зона отдыха в городе-спутнике, граничащем с районом Терновки. Вдоль водного зеркала пруда здесь выполнена набережная в нескольких уровнях, включающая велосипедные и пешеходные дорожки с мягким покрытием, фонтаны и каскады, пляжи, игровое пространство с аттракционами. С большим вкусом выполнены малые архитектурные формы – навесы, павильоны, ограждения, скамейки, скульптуры животных. У берега устроены домики для водоплавающих птиц. Подобные места отдыха должны быть обустроены в каждом сквере, парке, бульваре города Пензы. Они должны объединяться в пешеходные и велодорожки зеленого пояса, пронизывающего весь город в целом. Тогда бульвары, предназначенные для пешеходного движения, аллеи вдоль развитой дорожной сети будут связывать парки и скверы – озелененные территории, предназначенные для отдыха горожан и художественного оформления городских площадей и улиц, общественных зданий и монументов [5, 6]. Сравнительный анализ этапов развития города Пензы и повышения уровня комфортности городского общественного пространства представлен в табл. 1. Для дальнейшего наращивания уровня комфортности в г. Пензе необходимо как благоустройство новых территорий, так и реконструкция существующих зеленых общественных пространств в городе.

Чаще всего определение «комфорт» трактуется как здоровое обитание и благоприятные эмоции. Обычно ученые исследуют только один из названных аспектов. Нами было решено применить другую методику оценки, которая заключается в сравнении оценки комфортности, данной жителями г. Пензы, с объективными показателями качественной оценки экологического состояния окружающей среды городского пространства. В рамках исследования опрашиваемым было предложено определить, какую часть города из предложенного списка они считают комфортной или некомфортной средой. Для исследования были выбраны следующие районы города:

- исторический центр – набережная р. Суры;
- исторический центр – сквер им. Лермонтова;
- исторический центр – парк им. Белинского;
- исторический центр – Фонтанная площадь;
- исторический центр – Ботанический сад;
- Западная поляна – Олимпийская аллея;
- район Терновки – пересечение ул.Терновского и ул.Сухумского;
- район Арбеково – парк Ульяновых;
- район Арбеково – парк Победы и пляж у пруда за больницей №6;
- район Арбеково – пруды между ул.Минской и дачами на Каланче;
- город Спутник – набережная и пляж;
- Заводской район – парк Олимпийский;
- зоопарк.

В социологическом опросе участвовали люди обоих полов в возрасте от 18 до 65 лет. Им было предложено оценить уровень комфортности перечисленных выше районов по представленным основаниям комфортности или ее отсутствию. Полученные результаты были сопоставлены с результатами, представленными специалистами-градостроителями. В ходе этого сравнительного анализа была составлена сводная таблица (табл. 2).

Этапы развития уровня комфортности и благоустройства городского общественного пространства

<p>1-й этап – XIX век</p>	 <p>Ул.Московская в Пензе (с фонарями)</p> 	 <p>Ул.Никольская в Пензе (ныне ул. К.Маркса)</p> 
<p>2-й этап – XX век</p>	 <p>Площадь им.Ленина в Пензе</p>	 <p>Площадь Победы в Пензе</p>
<p>3-й этап – XXI век</p>	 <p>Юбилейная площадь в Пензе</p>	 <p>Набережная в городе Спутнике</p>

Сравнительная характеристика бытовой (оценка жителей) и экологической комфортности районов города Пензы

Район города	Оценка комфортности, данная жителями города	Основания оценки	Состояние окружающей среды	Основные экологические факторы
1	2	3	4	5
Исторический центр – набережная р.Суры	Средняя степень комфортности	Плохое освещение, много старых ветхих зданий	Удовлетворительное	Отсутствие промышленных площадок, интенсивная транспортная нагрузка
Исторический центр – сквер им. Лермонтова	Комфортно	Много зелени, транспортная доступность, наличие мест отдыха, близко к центру	Удовлетворительное	Отсутствие промышленных площадок, интенсивная транспортная нагрузка, наличие зеленых насаждений
Исторический центр – парк им. Белинского	Комфортно	Много природы, транспортная доступность, наличие мест отдыха	Благоприятное	Отсутствие промышленных зон и крупных магистралей, наличие зеленых насаждений
Западная поляна – Олимпийская аллея	Комфортно	Много природы, транспортная доступность, наличие мест отдыха	Благоприятное	Отсутствие промышленных зон и крупных магистралей, наличие зеленых насаждений
Район Терновки – пересечение ул.Терновского и ул.Сухумского	Некомфортно	Криминальный район, грязный сектор	Неудовлетворительное	Интенсивный транспортный поток, отсутствие зелени
Район Арбеково – парк Ульяновых	Комфортно	Много зелени, транспортная доступность, наличие мест отдыха	Удовлетворительное	Отсутствие промышленных зон, интенсивная транспортная нагрузка, наличие зеленых насаждений
Район Арбеково – парк Победы и пляж у пруда за больницей №6	Некомфортно	Плохо освещен, грязный сектор, удален от центра	Удовлетворительное	Отсутствует производство, транспортная нагрузка средняя, наличие водных массивов прудов, зелени

1	2	3	4	5
Район Арбеково – пруды между ул.Минской и дачами на Каланче	Некомфортно	Транспортная недоступность, плохо освещен, криминальный район	Удовлетворительное	Отсутствует производство, транспортная нагрузка значительная, наличие водных массивов прудов, зелени
Город Спутник – набережная и пляж	Очень комфортно	Много природы, транспортная доступность, наличие мест отдыха, много развлекательных центров	Благоприятное	Удаленность промзон, транспортных магистралей, наличие водных массивов пруда и реки Суры, зеленая зона
Заводской район – парк Олимпийский	Средняя степень комфортности	Тихо, есть зелень	Удовлетворительное	Наличие промзон, транспортный поток значительный, есть зеленые зоны
Исторический центр – Фонтанная площадь	Средняя степень комфортности	Транспортная доступность, мало зелени, грязный сектор	Неудовлетворительное	Транспортный поток значительный, мало зеленых зон, есть зеркало воды
Исторический центр – Ботанический сад	Комфортно	Много природы, тихо, наличие мест отдыха, близко к центру.	Благоприятное	Удаленность промзон, транспортных магистралей, много зелени
Зоопарк	Комфортно	Много природы, транспортная доступность, наличие мест отдыха, близко к центру.	Благоприятное	Удаленность промзон, транспортных магистралей, много зелени

Как видим, наиболее комфортными районами респонденты назвали сквер им. Лермонтова, парк им. Белинского, Ботанический сад, зоопарк (исторический центр), Олимпийскую аллею (Западная поляна), парк Ульяновых (район Арбеково), набережную и пляж (город Спутник). Указанные районы были выбраны из-за наличия транспортной доступности, зелени, достаточности мест для отдыха.

Средней степени комфортности обладают набережная р.Суры, Фонтанная площадь (исторический центр), парк Олимпийский (Заводской район). В этих районах недостаточно мест для отдыха, плохое освещение.

Некомфортными для себя опрошиваемые считают пересечение ул.Терновского и ул.Сухумского (район Терновки), парк Победы и пляж у пруда за больницей №6, пруды между ул.Минской и дачами на Каланче (район Арбеково). Связано это с удаленностью от центра, плохим освещением. Также эти районы считают грязными и криминальными.

В результате такой сравнительной характеристики выяснилось, что *степень комфортности не всегда совпадает с реальной экологической ситуацией*. Так, автомобильные дороги, которые загрязняют окружающую среду, в представлении людей считаются плюсом, т.к. позволяют оперативно перемещаться по городу.

В заключение отметим, что город – это место столкновения природного и социального, чем и вызвано затруднение в оценке вклада каждой из этих составляющих для комфортного проживания человека в городской среде. Можно констатировать, что оценка комфортности городской среды тесно связана с благоустройством территории на разных исторических этапах развития города. Не вполне коррелирует оценка комфортности жителями города с оценкой экологического состояния окружающей среды градостроителями. Общественные пространства – парки и скверы – не только помогают горожанам приятно и полезно провести время, они формируют внешний облик города. Архитектурный облик каждого городского района также влияет на оценку его комфортности. На зеленые участки обращают внимание как жители города, так и туристы. Парковые зеленые зоны выполняют рекреационную функцию по отношению к жителям города, а также способствуют поддержанию экологии городского окружения.

#### Список литературы

1. Губернский город Пенза на рубеже XIX-XX веков / под ред. С.И. Щукина. – Пенза, 2001. – 227 с.
2. Пензенская энциклопедия / гл. ред. К.Д. Вишнеvский. – Пенза: Мин-во культуры Пензен.обл., М.: Большая Российская энциклопедия, 2001. – 759 с.
3. Попрядухин, Р.Н. Строить город не просто / Р.Н. Попрядухин. – Пенза, 2015.
4. Долгачева, Т.А. Основные проблемы и рекомендации по улучшению комфортности проживания населения (на примере г. Саранска) / Т.А. Долгачева, В.В. Аникин, Л.Г. Калашникова // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Современная наука: теоретический и практический взгляд»: в 4 ч. Ч.1. – Уфа: АЭТЕРНА, 2016. – С. 292–297.
5. Сычева, А.В. Ландшафтная архитектура / А.В. Сычева. – М.: Издат. дом «ОНИКС 21 век», 2004. – 113 с.

#### References

1. Provincial city Penza at the turn of XIX-XX centuries / under the ed. S.I. Shukina. – Penza, 2001. – 227 p.
2. Penza encyclopedia / editor-in-chief K.D. Vishnevsky. – Penza: Ministry of culture of the Penza region. – М.: Great Russian encyclopedia, 2001. – 759 p.
3. Popryadukhin, R.N. Building a city is not easy / R.N. Popryadukhin. – Penza, 2015.
4. Dolgacheva T.A. The main problems and recommendations for improving the comfort of living of the population (on the example of Saransk) / T.A. Dolgacheva, V.V. Anikin, L.G. Kalashnikova // Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference “Modern science: theoretical and practical view” At 4 pm Ch.1 – Ufa: AETERNA, 2016. – P. 292–297
5. Sycheva, A.V. Landscape architecture / A.V. Sycheva. – М.: Publ. House «ONYX 21 century», 2004. – 113 p.

УДК 332.13

*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

**Белякова Елена Александровна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Кадастр недвижимости и право»  
E-mail: var\_lena@mail.ru

**Уханов Денис Андреевич**,  
магистрант  
E-mail: denis.hanov@gmail.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

**Belyakova Elena Aleksandrovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Real estate cadastre and law»  
E-mail: var\_lena@mail.ru

**Ukhanov Denis Andreevich**,  
Master student  
E-mail: denis.hanov@gmail.com

## МЕТОД МНОГОВАРИАНТНОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ НА ПРИМЕРЕ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ Г.ПЕНЗЫ

Е.А. Белякова, Д.А. Уханов

Качество городской среды прямым образом сказывается не только на качестве жизни населения города, но и на формировании комфортной городской среды, включающей в себя производственные, общественные, жилищные и рекреационные сферы существования горожан. Для оценивания качества городской среды предложен метод экспертных панелей. Сформулированные критерии, используемые для оценки, объединены в три блока по происхождению (антропогенные, природно-антропогенные и природные). На примере территории города Пензы проведена апробация предложенных критериев. Группой экспертов выполнены натурные исследования микрорайонов и анализ данных Генерального плана, Правил землепользования и застройки города и Публичной кадастровой карты. Выявлено, что в большей части микрорайонов города, набравшей среднее число баллов, отмечается некоторая неблагоустроенность и некомплексность обустройства придомовых территорий, удаленность от основных благ города и т.д. Метод интегральной оценки уровня качества городской среды позволил зонировать городскую территорию по уровню качества жилых микрорайонов; выявить проблемные участки жилой застройки и может быть использован для анализа изменений уровня качества среды городских территорий в результате реализации инвестиционных проектов их развития.

*Ключевые слова: городская среда, оценка качества, критерии оценивания, метод экспертных панелей*

## METHOD OF MULTI-VARIANT EXPERTISE ON THE EXAMPLE OF QUALITY CONTROL OF URBAN ENVIRONMENT IN PENZA

E.A. Belyakova, D.A. Ukhanov

The quality of the urban environment directly affects not only the quality of life of the population of the city, but also the formation of a comfortable urban environment, including production, public, housing and recreational areas of citizens. To assess the quality of the urban environment, a method of expert panels was proposed. The formulated criteria used for evaluation are grouped into three blocks by origin (anthropogenic, natural-anthropogenic, and natural). On the example of the territory of the city of Penza, is proposed criteria are tested. A group of experts carried out field studies of the microdistricts and analysis of the General Plan data, the Land Use and Development Rules of the city and the Public Cadastral Map. It is revealed that in most of the microdistricts of the city, which gained the average number of points, there is a certain lack of accommodation and lack of complexities in the arrangement of house territories, remoteness from the main infrastructure of the city, etc. The method of integral assessment of the quality level of the urban environment allows to zone the city territory

in terms of the quality of residential areas; identify problem areas of residential development and can be used to analyze changes in the quality level of urban areas as a result of the implementation of investment projects for their development.

*Keywords: urban environment, quality control, assessment criteria, expert panel method*

Стремительного увеличения численности городского населения подобного тому, которое наблюдалось в первой половине XX века в России, не было ни в одной развитой стране мира. Так, к началу XIX века городское население Англии и Уэльса составляло 20,3 %, Голландии – 28,8 %, Бельгии – 18,9 %. В начале XX века городское население США – 40 %, Англии и Уэльса – 50 %, России – 14 %. В 1950 г. – соответственно 63, 52, 45 %. Статистика ООН по населению мира, которая ведется с 1950 г., свидетельствует о том, что доля городского населения России уже в 50-х годах XX века приблизилась к странам с высокими доходами населения и составила 52,2 %.

Кроме таких важных показателей качества жизни, как жилищные условия, здравоохранение, образование, существует весьма широкий набор социальных услуг, которые прямым образом влияют на формирование человеческого потенциала горожанина – это рекреационные услуги, спорт, театры, услуги бытового обслуживания, которые позволяют горожанину освободиться от рутинных домашних работ и т.д. Развитость сферы услуг во многом определяет качественную ступень развития урбанизации. Недооценка значимости сферы услуг и ее слабое развитие было характерной чертой России советского периода. В валовом внутреннем продукте сфера услуг составляла в 1990 г. в России 35 %, в США – 70 %, в развитых странах Европы – от 60 до 70 %.

Для оценивания качества городской среды предлагается с помощью метода экспертных панелей сформировать нормативную ведомость участка городской территории.

Нормативная ведомость, с помощью которой предлагается оценивать каждый участок (жилой микрорайон, общественное пространство) предполагает 10-балльную шкалу оценивания: от 1 балла – самого худшего показателя, до 10 – наиболее оптимального, с полным соответствием предъявляемым требованиям к конкретному критерию.

Методика оценки качества городской среды любого населенного пункта предполагает разработку критериев оценивания, которые предлагается сгруппировать в 3 блока по «степени антропогенности». Разработанные критерии приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Критерии, используемые для оценки качества городской среды

<i>Блок 1. Антропогенные объекты</i>
1) соответствие площади участка
2) типология застройки
3) состояние зданий, строений, сооружений
4) соблюдение противопожарных нормативов застройки
5) соблюдение санитарно-гигиенических нормативов застройки
6) состояние придомовой / общественной территории, их безбарьерность, безопасность
7) общий уровень содержания и благоустройства территории
8) наличие детского сада
9) наличие школы
10) наличие вуза
11) наличие объекта здравоохранения
12) наличие аптеки
13) наличие магазина
14) наличие торгово-развлекательного центра
15) наличие рынка
16) наличие администрации
17) наличие управляющей компании

18)наличие банка
19)наличие спортивного объекта
20)наличие кафе, бара, ресторана, гостиницы
21)наличие культурно-досугового объекта
22)наличие религиозного объекта
23)наличие промышленного объекта
24)наличие кладбища
25)состояние площадок ТБО и вывоза мусора
26)наличие остановок общественного транспорта
27)наличие аэропорта
28)наличие ж/д станции
29)наличие и состояние автодорог, пешеходных тротуаров, мостов
30)состояние водоснабжения, канализации
31)состояние газификации, электрификации
32)состояние телефонной, телевизионной, интернет-связи
<i>Блок 2. Компоненты природной среды</i>
33)состояние микроклимата
34)состояние рельефа
35)проявление природных явлений: сели, оползни, подтопление и пр.
<i>Блок 3. Природно-антропогенные объекты</i>
36)наличие и состояние городского леса
37)наличие и состояние парка, сада
38)наличие и состояние озелененной территории
39)наличие и состояние водного объекта
40)наличие и состояние незастроенной территории

Экспертные панели – метод коллективной экспертизы, получаемой путем регулярного обсуждения проблем в рамках постоянно действующей группы специалистов высокого уровня [1]. Для использования экспертных панелей группам экспертов из 12–20 человек предлагается в течение нескольких месяцев обдумать предложенные нормативные ведомости по перечню оцениваемых микрорайонов, используя аналитические и информационные материалы и разработки, статистику и данные Генплана и Правил землепользования и застройки (ПЗЗ).

Результаты оценивания каждого показателя (всего 40 критериев) микрорайона всеми экспертами измеряются методом средних арифметических рангов (баллов).

Далее по каждому блоку оценивания рассчитывается средний показатель качества городской среды в конкретном микрорайоне города или другого населенного пункта. В итоге выводится интегральная оценка качества городской среды микрорайона методом весовых коэффициентов:

$$\text{Интегральная оценка} = \text{блок 1} \times 0,5 + \text{блок 2} \times 0,2 + \text{блок 3} \times 0,3, \quad (1)$$

где 0,5, 0,3 и 0,2 – веса, выбираемые экспертным путем исходя из цели оценки, достоверности информации, особенностей объекта оценки и способности подхода учесть эти особенности.

Веса назначают исходя из интуитивного представления о сравнительной важности критериев. Так, критериям блока 1 «Антропогенные объекты» предлагается назначить вес, равный 0,5, как наиболее значимым факторам в формировании комфортности городской среды; критериям блока 3 «Природно-антропогенные объекты» – вес, равный 0,3; и, наконец, критериям блока 2 «Компоненты природной среды» как незначительно влияющим на благоустроенность микрорайонов и доступность основных благ города – вес 0,2.

С целью выявления возможности применения разработанных критериев при оценке качества городской среды предлагается на примере разбитой на микрорайоны

территории города Пензы, используя метод экспертных панелей, провести необходимые обследования и рассчитать интегральную оценку качества городской среды в каждом микрорайоне города.

Экспертам после их выборки было предложено натурно обследовать микрорайоны, а также проанализировать данные Генерального плана города, ПЗЗ и Публичной кадастровой карты. Проведя оценку, каждый эксперт выставил баллы в нормативную ведомость по 10-балльной шкале.

Данные расчетов заносятся в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Итоговая ведомость интегральной оценки качества городской среды в разрезе микрорайонов города

Микрорайон	Среднеарифметические оценки качества городской среды			Интегральная оценка качества городской среды в микрорайоне
	По блоку 1	По блоку 2	По блоку 3	
1	32 критерия оценивания	3 критерия оценивания	5 критериев оценивания	
2	32 критерия оценивания	3 критерия оценивания	5 критериев оценивания	
<i>n</i>	32 критерия оценивания	3 критерия оценивания	5 критериев оценивания	

Эксперимент по расчету оценки качества городской среды Пензы проводился следующим образом.

В результате выборки было отобрано 15 экспертов:

- 6 магистрантов направления «Землеустройство и кадастры»;
- 4 преподавателя факультета управления территориями ПГУАС;
- 1 специалист Кадастровой палаты по Пензенской области;
- 1 представитель администрации г. Пензы;
- 1 представитель Департамента госимущества;
- 2 представителя – руководители строительных организаций.

Эксперты анализировали и расставляли по панелям баллы оценки по предложенным микрорайонам города. Студентам было предписано оценивать микрорайоны по результатам натурных наблюдений и сопоставлений с нормативными требованиями. Остальным экспертам – по личному опыту и данным Генплана и ПЗЗ города Пензы. В результате было получено 2595 нормативных ведомостей.

Далее проводились расчеты по выведению суммарных оценок и интегрального индикатора качества городской среды в разрезе 173 микрорайонов города. В табл. 3 приведен фрагмент основных результатов расчетов.

Т а б л и ц а 3

Фрагмент результатов нормирования территории г. Пенза по значениям интегрального индикатора качества городской среды

Микрорайон	Среднеарифметические оценки качества городской среды			Интегральная оценка качества городской среды в микрорайоне
	По блоку 1	По блоку 2	По блоку 3	
1	2	3	4	5
1) Поселок совхоза Заря	2,4	5	4,3	3,49
2) Поселок Нефтяник	2,1	4,3	4,5	3,26
3) с/т Гудок, 50 лет Победы	2,1	4,5	4,4	3,27
4) Каланча	2,1	4,4	4,4	3,26
5) Поселок ЗИФ	3	4,5	4,2	4,01
6) Улица Новоселов в Заре	3,2	4,5	4,5	3,85
7) СНТ Рассвет	2,2	4,6	4,7	3,73

1	2	3	4	5
8) Северная поляна	6,8	6,9	5	6,29
9) Десятая артель	3,6	5	7,2	5,34
10) Победа	4,2	6	7,9	5,67
11) Камыши-Хвощи	2,9	3	4,8	3,49
12) Чемодановские дачи	3	2,9	2,8	2,92
13) СНТ Строитель, Труд	3,3	3,5	2,9	3,22
14) СНТ Юбилейный	3,3	3,5	3	3,25
15) Монтажный	4	4	3,2	3,76
...				
165) Бригадирский мост	4,4	5	6,3	5,09
166) Рябова – Пушанина	4,5	4,6	3,9	4,34
167) Перспективная – Очаково – Аэропорт	4,6	4,5	3,3	4,19
168) Гидрострой, 20 шк.	5	6	4	4,9
169) Терешковой, 59 шк.	6,2	6	4	5,5
170) Рябова – Пушкари	4,6	4,7	4,1	4,47
171) Терновка, 69 шк.	7	5	4,2	5,76
172) Город Спутник	7,7	6	7,5	7,3
173) Сурский квартал	7	5,2	3,6	5,62

В результате применения интегральной оценки качества городской среды Пензы выявлено, что более 65 % микрорайонов города имеют средние значения интегрального индикатора, что говорит о наличии незначительного количества отклонений характеристик микрорайонов от современных требований к качеству городской среды. Определены также микрорайоны с весьма низкими показателями. В основном дачные и садовые массивы и частный сектор, где отсутствует требуемый уровень благоустройства и комфортного проживания и обслуживания населения.

Примененный метод многовариантной коллективной экспертизы позволил провести нормирование территории Пензы по уровню качества городской среды. Разработанные для выполнения этой задачи оценочные критерии охватывают весь перечень объектов окружающей среды в пределах территории города, что позволило максимально точно определить общее состояние качества городской среды и показателей жилищного строительства как основного его компонента. Однако необходимо отметить, что примененный метод основан на субъективном, иногда противоречивом мнении членов экспертной группы, но зачастую он является единственным источником получения информации, необходимой для решения подобных задач.

#### Список литературы:

1. Дорофеюк, А.А. Процедуры коллективной многовариантной экспертизы в задачах анализа и совершенствования социально-экономических систем управления / А.А. Дорофеюк, М.Д. Гольдовская, Н.Е. Киселева, И.В. Покровская, А.Г. Спири, А.Л. Чернявский // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2016. – №4. – С. 53–68.
2. Garkina, I.A. Mathematical Methods of System Analysis in Construction Materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 245(2017) 062014.
3. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. V.191 (2017) 012006.

## References

1. Dorofeyuk, A.A. Procedures for collective multivariate expertise in the tasks of analysis and improvement of socio-economic management systems / A.A. Dorofeyuk, M.D. Goldovskaya, N.E. Kiseleva, I.V. Pokrovskaya, A.G. Spiro, A.L. Chernyavsky // Information technologies and computing systems. 2016. – №4. – P. 53–68.
2. Garkina, I.A. Mathematical Methods of System Analysis in Construction Materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 245(2017) 062014.
3. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. V.191 (2017) 012006.

УДК 692

*Петрозаводский государственный университет*

Россия, 185910, Республика Карелия,  
г. Петрозаводск, просп. Ленина, д. 33,  
тел.: 8 (814-2) 71-10-01,  
факс: (8814-2) 71-10-00

**Селютина Любовь Федоровна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Технология и организация  
строительства»

**Емельянова Елена Геннадьевна**,  
кандидат экономических наук, доцент  
кафедры «Технология и организация  
строительства»

**Цветаев Сергей Александрович**,  
студент

*Petrozavodsk state University*

Russia, 185910, Republic of Karelia,  
Petrozavodsk, 33, Lenin Avenue,  
tel.: 8 (814-2) 71-10-01,  
fax: (8814-2) 71-10-00

**Selyutina Lyubov Fedorovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Technology and organization  
of construction»

**Emel'yanova Elena Gennad'evna**,  
Candidate of Economic Sciences, Associate  
Professor of the department «Technology and  
organization of construction»

**Tsvetaev Sergei Aleksandrovich**,  
student

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАРКАСА ЗДАНИЯ С АВТОСТОЯНКОЙ В ЦОКОЛЬНОЙ ЧАСТИ В УСЛОВИЯХ СТЕСНЕННОЙ ЗАСТРОЙКИ

Л.Ф. Селютина, Е.Г. Емельянова, С.А. Цветаев

С целью определения возможностей возведения здания с автостоянкой в цокольной части в условиях стесненной городской застройки с учетом региональных особенностей (на примере г. Петрозаводска) исследованы стальной и железобетонный каркасы административного здания. Выполнены расчеты и произведено сравнение усилий в плоских рамах и пространственной системе здания. Расчеты каркасов выполнены методом конечных элементов в программном комплексе (ПК) Лира САПР 13. Технико-экономические показатели сравниваемых вариантов определены с использованием локальных смет, которые составлены базисно-индексным методом согласно требованиям МДС 81-35.2004 [1] на основе территориальных единичных расценок Республики Карелия ТЕР-2001 (в редакции 2014 г.).

*Ключевые слова: автостоянка, пространственная система, железобетонный каркас, металлический каркас, технико-экономическое сравнение*

## DESIGN FEATURES OF THE BUILDING FRAME WITH PARKING IN THE BASEMENT IN CONSTRAINED BUILDING CONDITIONS

L.F. Selyutina, E.G. Emel'yanova, S.A. Tsvetaev

With the aim of determining the possibilities of building a parking in the basement in constrained building conditions considering regional features (on the example of Petrozavodsk) steel and reinforced concrete frames of an administrative building are investigated. Calculations and the comparison of the forces in flat frames and spatial system of the building are made. The calculations of barrels are made by the method of finite elements in the program complex (PC) Lira SAPR 13. Technical and economic indicators of the compared options are determined using local estimates which are made by basis-index method according to the requirements of MDS 81-35.2004 [1] on the basis of territorial unit rates of the Republic of Karelia TER-2001 (as amended in 2014).

*Keywords: parking, reinforced concrete frame, metal frame, technical and economic comparison*

**ВВЕДЕНИЕ**

Проектирование и строительство зданий в условиях стесненной городской застройки занимает особое место в строительной отрасли, что объясняется необходимостью учета многих факторов, в значительной степени определяющих экономическую эффективность окончательных решений. Важными факторами, влияющими на архитектурно-строительное проектирование в таких условиях, являются: функциональное назначение здания, этажность, обеспеченность парковочными местами.

Строительство здания в условиях стесненной городской застройки привлекательно для инвесторов, так как имеется развитая инфраструктура и понимание престижности объектов недвижимости в центральных районах города. Однако может возникать отрицательное отношение к проектам уплотнительной застройки в связи с исторически сложившейся психологией [2]. Смягчить остроту проблемы можно за счет использования подземных паркингов, которые остаются весьма затратными при строительстве. В связи этим необходимо использовать современные архитектурные и строительные решения для уменьшения стоимости строительства и эксплуатации таких паркингов. В статье приведены конструктивные решения и технико-экономическое сравнение двух вариантов каркасов административного здания с автостоянкой в цокольной части.

Тема строительства автостоянок остается актуальной в течение продолжительного времени во многих регионах страны.

В данной области известны исследования, посвященные организационно-технологическим вопросам строительства [2–7]. Однако достаточно полных сведений о конструктивных решениях зданий в условиях стесненной городской застройки не приводится. В представленной работе на основании изучения региональных инженерно-геологических условий размещения существующих зданий и возможных методов возведения нового административного здания предложены конструктивные решения на основе технико-экономического сравнения вариантов каркасов здания.

*Характеристика инженерно-геологических условий строительства здания*

Основанием фундаментов служит супесь бурая с гравием и галькой до 25 %, твердая. Подземные воды на глубине 12 м не обнаружены.

Инженерно-геологические условия площадки строительства позволяют организовать парковочные места в цокольной части здания.

*Характеристика объемно-планировочного решения здания*

Административное здание запроектировано ступенчатой формы, переменной этажности в три-четыре этажа (рис. 1). В осях «1-4» располагается четырехэтажная часть высотой 15,6 м, в осях «4-8» – трехэтажная высотой 11,7 м. Длина здания 26,25 м, ширина – 12,21 м.

Стегловое сочетание

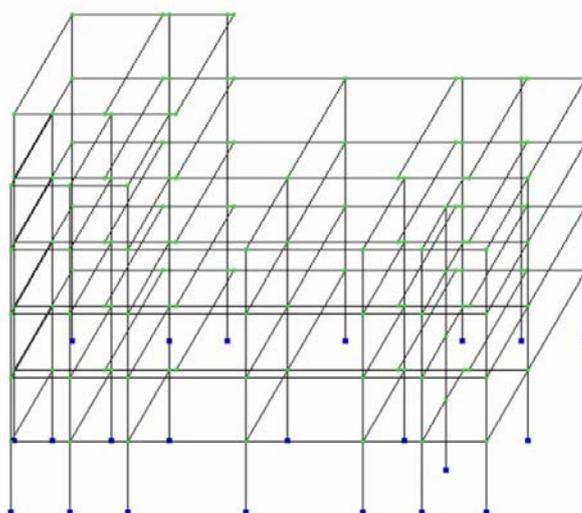


Рис. 1. Пространственный каркас здания

Вертикальная связь между этажами осуществляется с помощью двух противопожарных лестниц и пассажирского лифта. Размещение лестниц и лифта удовлетворяет требованиям пожарной безопасности [8]. Фрагменты плана 1-го этажа здания представлены на рис. 2.

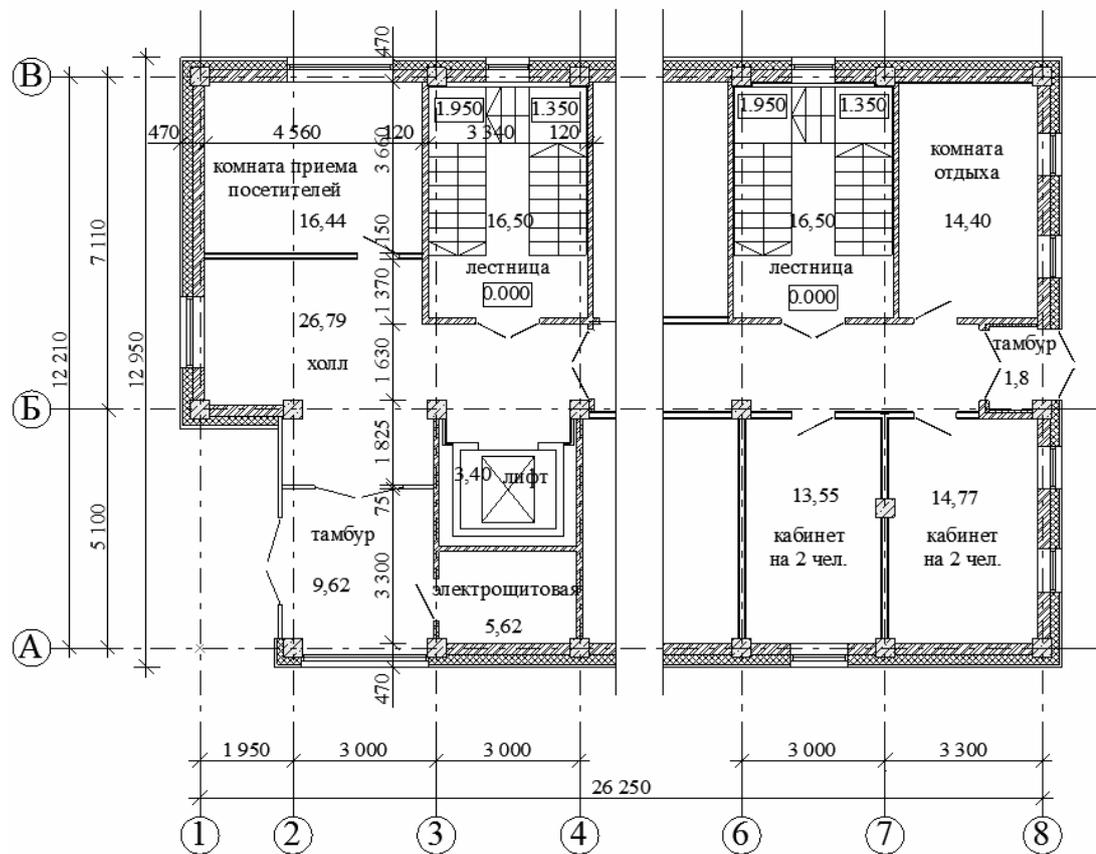


Рис. 2. Фрагменты плана первого этажа здания

#### Компоновка плана здания

Наружные стены (поэтажно опираются на балки) выполняются из силикатного кирпича (рис. 3).

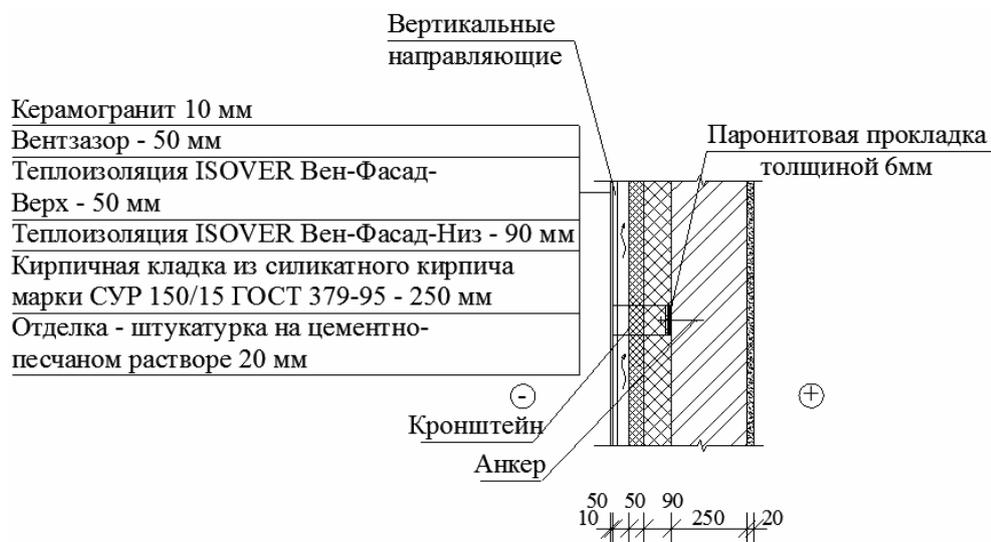


Рис. 3. Конструкция наружной стены

Перекрытия и покрытие – сборные железобетонные многопустотные плиты безопалубочного формования с устройством монолитных участков.

Проектирование паркинга в цокольном этаже здания выполнено таким образом, чтобы обеспечить значительную свободу пространства, что привело к существенному усложнению конструктивной схемы надземной части.

С целью удовлетворения требований пожарной безопасности на путях эвакуации оси балок, расположенные по цифровым осям «3», «4», «6», «7» в осях «Б – В» и формирующие пространство лестничных клеток, размещены не по осям колонн, а со смещением на 350 мм (рис. 4). Маркировочная схема железобетонных балок перекрытия представлена на рис. 5.

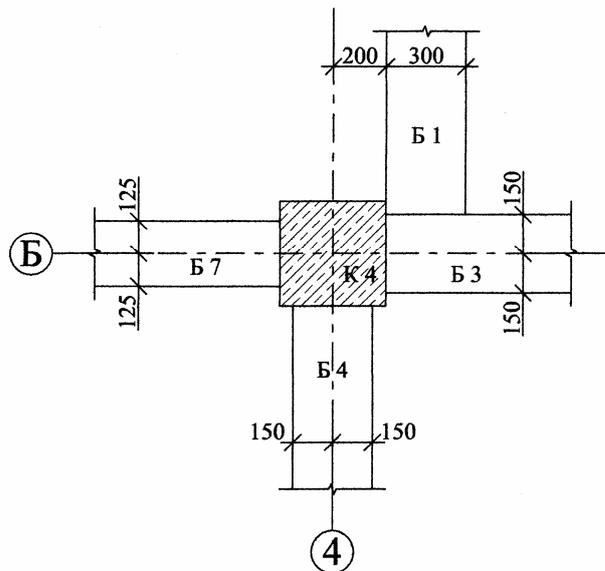


Рис. 4. Узел соединения продольных и поперечных железобетонных балок

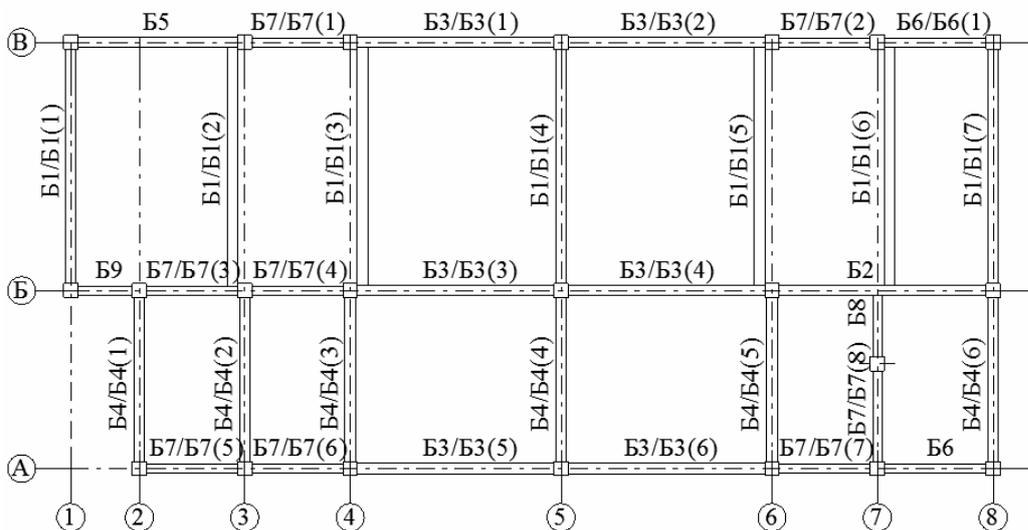


Рис. 5. Маркировочная схема железобетонных балок

Второй особенностью планировочного решения здания является смещение колонны со средней оси здания ближе к оси «А», что позволило организовать разделение потоков автомобилей в автостоянке (см. рис. 5).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как отмечено выше, для исследования приняты железобетонный и металлический каркасы. Пространственная система здания показана на рис. 1.

*Исследования железобетонного каркаса здания*

Выполнены расчеты пространственной системы здания для двух вариантов размещения узлов каркаса: 1) при выполнении рамных узлов по осям колонн; 2) со смещением стыка балок продольного и поперечного направлений от оси колонны на 350 мм. Узел соединения продольных и поперечных железобетонных балок представлен на рис. 4. Результаты расчета двух вариантов представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Площадь арматуры на опорах балок, мм<sup>2</sup>

Марка балки	Без смещения осей	Со смещением осей на 350 мм
Б1(3)	1434	1414
	889	1015
Б2	363	476
	283	309
Б3(4)	254	332
	359	456
Б5	115	224
	115	113
Б6	170	179
	163	213
Б7	203	350
	23	226

Примечания: 1. В числителе – площадь арматуры на левой опоре балки, в знаменателе – на правой опоре балки.

2. Марки балок приведены на рис. 5.

Увеличение площади сечения продольной арматуры в балке Б5 (в 2 раза) и в балке Б7 (в 10 раз) связано с опиранием на них балок перпендикулярного направления, передающих сосредоточенные силы у опор балок пространственной системы. Кроме того, площадь арматуры, определенная по варианту без смещения осей (балка Б7), меньше ее минимального значения [9] и ее необходимо увеличить для данного варианта размещения балок (без смещения осей).

Таким образом, расположение балок перекрытия со смещением от осей колонн приводит к незначительному увеличению площади арматуры, при этом значительно улучшаются условия армирования и бетонирования конструкций, обеспечиваются требования эвакуации людей.

Геометрические размеры сечения и усилия в балках представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Усилия в балках  $Q$  (кН);  $M$  (кН·м)

Марка балки	Геометрические размеры, мм		В балках пространственного каркаса					В балках плоской рамы	
	$b$ (ширина)	$h$ (высота)	$Q_y$	$Q_z$	$M_y$	$M_z$	$M_x$	$Q_z$	$M_y$
Б1(3)/ Б1(3)	300	700	0,28	146,07	165,12	0,95	0,58	210,51	233,51
Б2/ Б2	300	700	24,3	89,01	133,24	4,31	20,1	91,41	138,75
Б7/Б7(8)	250	450	0,25	50,33	41,82	0,38	0,14	62,47	70,03
Б8/Б8	250	450	0,56	72,74	80,04	1,2	0,96	51,77	45,04
Б9/Б9	250	450	0,51	23,19	12,8	1,12	8,31	23	14,55

Примечания: 1. Марки балок пространственной системы показаны в знаменателе (см. рис. 5).

2. Марки балок Б2, Б7, Б8 и Б9 совпадают в расчётах пространственного каркаса и плоских рам.

Особенно большая разница изгибающих моментов и поперечных сил ( $\frac{M_{\text{плоск}}}{M_{\text{простр}}} = 1,414$ ,  $\frac{Q_{\text{плоск}}}{Q_{\text{простр}}} = 1,44$ ) плоской и пространственной рам относится к балке

Б1, имеющей пролет 7,11 м и отношение  $l/h$  (длина/высота) = 10,15. Для балки Б7 соотношение изгибающих моментов  $\frac{M_{\text{плоск}}}{M_{\text{простр}}} = 1,67$ , поперечных сил  $\frac{Q_{\text{плоск}}}{Q_{\text{простр}}} = 1,24$ ;

пролет 3 м,  $l/h$  (длина/высота) = 6,66. Балка Б2: изгибающие моменты и поперечные силы имеют примерно одинаковые значения в плоской раме и пространственной системе, но в пространственной системе действует значительный крутящий момент (так как на балку в осях «6-8» опирается балка перпендикулярного направления). При расчете плоских рам неучет крутящего момента резко уменьшит количество поперечной арматуры, что снижает надежность таких расчетов.

Т а б л и ц а 3

Перемещения, мм, балок железобетонного каркаса

Марка балки	Перемещения в пространственной раме			Вертикальный предельный прогиб $f_u$
	$x$	$y$	$z$	
Б1/Б1(3)	2,66	6,89	30	34
Б2	2,66	3,38	30,3	31
Б3/Б3(4)	2,51	6,6	28,7	30
Б4	2,66	6,18	26,7	27,6
Б5	1,6	6,89	21,9	27,1
Б6	2,58	3,59	12,1	21,3
Б7	3,1	7,58	19,1	20
Б8	3,1	3,25	15,3	15,4
Б9	1,99	3,4	12,9	14,5

П р и м е ч а н и я : 1. В таблице указаны максимальные перемещения балок Б1 и Б3.  
2. В знаменателе показаны марки балок пространственной рамы (см. рис. 5).

Т а б л и ц а 4

Перемещения, мм, в плоских рамах

Марка балки	Перемещения в плоских рамах		
	$x$	$y$	$z$
Б1(3)		25,5	104
Б2	-0,305		-5,8
Б3(4)	1,93		-7,98
Б4(3)		-12,6	-25,2
Б5	0,775		-7,33
Б6(2)	-0,695		-3,76
Б7(8)	7,64		23,5
Б8		35,4	47,6
Б9	0,644		-3,4

Перемещения балки Б8 в плоской раме получились больше, чем в пространственной системе, потому что на балку в ее пролете опирается балка для организации движения в автостоянке.

Усложнения конструктивной формы здания привели к возникновению одновременного воздействия нескольких усилий. В табл. 5 представлен коэффициент

$$\chi = \frac{M_x}{M_y}$$

Коэффициент  $\chi$  имеет самую большую величину для балок Б3, расположенных по внутренней продольной оси здания, на которые опираются балки перпендикулярного направления со смещением от оси колонны. В балках, расположенных по наружным буквенным осям, имеющих одинаковые пролеты с балкой Б3, разгружающее действие оказывает наружная стена; для балок по оси «Б» такое разгружающее действие тяжелых стен отсутствует.

Т а б л и ц а 5

Отношение крутящих моментов к изгибающим моментам

Марка и номер балки	$M_x/M_y=\chi$	Марка и номер балки	$M_x/M_y=\chi$
Б1(1)	0,012	Б3(1)	0,035
Б1(2)	0,005	Б3(2)	0,034
Б1(3)	0,003	Б3(3)	0,183
Б1(4)	0,0012	Б3(4)	0,179
Б1(5)	0,016	Б3(5)	0,0038
Б1(6)	0,013	Б3(6)	0,0041
Б1(7)	0,019		

Знание крутящих моментов необходимо для правильного назначения диаметра и шага поперечной арматуры. Принятая конструктивная схема здания, приведенная выше, оправдала себя и в данном случае: расчетные диаметры и шаги поперечной арматуры не привели к повышенному расходу арматуры, что определило положительный экономический эффект железобетонного каркаса здания.

Программой Лира САПР расчет трещиностойкости не выполнялся, поэтому расчет моментов образования трещин и ширины раскрытия выполнен вручную по СП 63.13330. 2012 [9]. Армирование, предложенное ПК Лира САПР, позволило получить ширину раскрытия трещин, не превышающую предельную, для всех балок, кроме Б1. После выполнения расчета ширины раскрытия трещин в балке Б1 потребовалось увеличить в 1,307 раза площадь продольной арматуры в пролете.

#### Исследования металлического каркаса

Для исследования металлического каркаса приняты такие же предпосылки, что и для железобетонного каркаса. Маркировочная схема металлических балок представлена на рис.6. Профили двутавров и перемещения балок представлены в табл. 6.

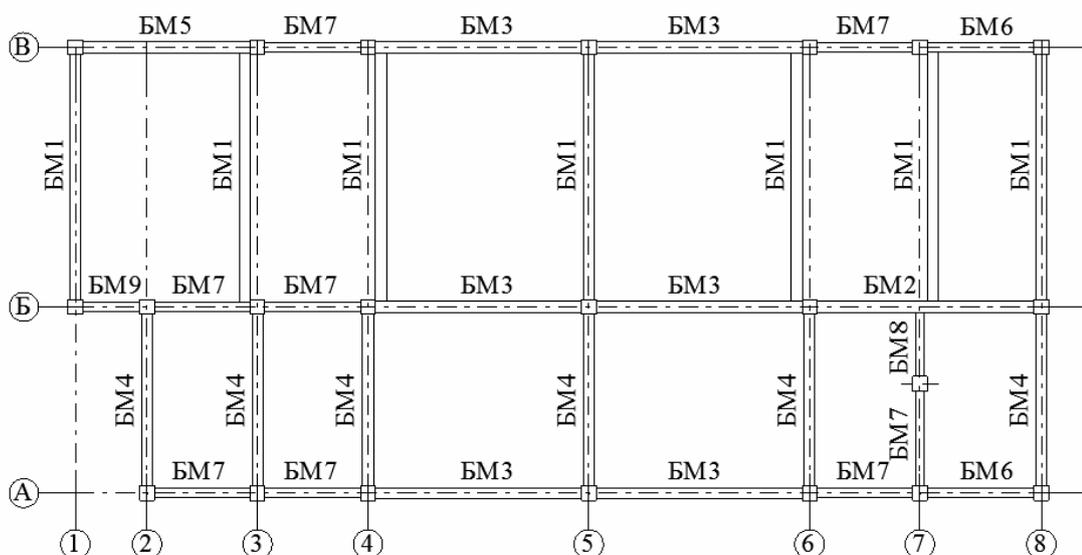


Рис.6. Маркировочная схема металлических балок

Перемещения металлических балок

Условное обозначение балки	Профиль металлической балки	Перемещения сечений балок у опор, мм			Примечание
		x	y	z	
БМ1	I 35Ш1 – 6,66 м	0,518	3,06	5	ГОСТ 8239-89
БМ2	I 26Ш1 – 5,84 м	0,259	3,1	5	ГОСТ 8239-89
БМ3	I 26Ш1 – 5,54 м	0,412	2,69	3,9	ГОСТ 8239-89
БМ4	I 30Ш1 – 4,65 м	0,518	2,69	3,9	ГОСТ 8239-89
БМ5	I 26Ш1 – 4,49 м	0,346	1,87	3,08	ГОСТ 8239-89
БМ6	I 26Ш1 – 2,84 м	0,416	3,1	1,57	ГОСТ 8239-89
БМ7	I 30Ш2 – 2,54 м	0,518	3,11	4,99	ГОСТ 8239-89
БМ8	I 40Ш1 – 1,85 м	0,235	3,11	4,99	ГОСТ 8239-89
БМ9	I 30Ш1 – 1,49 м	0,506	1,56	2,32	ГОСТ 8239-89

*Технико-экономическое сравнение вариантов каркасов административного здания*

Для сравнения экономических показателей рассматриваемых вариантов каркасов административного здания в работе был выполнен расчет сметной стоимости устройства каждого вида каркаса. Локальные сметы составлены базисно-индексным методом согласно требованиям МДС 81-35.2004 [1] на основе территориальных единичных расценок Республики Карелия ТЕР-2001 (в редакции 2014 г.) с применением индексов пересчета сметной стоимости в текущий уровень цен. Индексы изменения сметной стоимости СМР по видам строительства в текущий уровень цен (на 1-й квартал 2018 года) приняты в соответствии с приложением № 1 к распоряжению Министерства строительства, жилищно-коммунального хозяйства и энергетики РК № 1 от 15 февраля 2018 года. Индексы применялись к статьям прямых затрат и составили:

- к основной заработной плате – 16,78;
- к эксплуатации машин и механизмов – 7,59;
- к материальным затратам – 4,32.

Накладные расходы рассчитывались косвенным путем в процентах от фонда оплаты труда рабочих-строителей и механизаторов исходя из вида строительства согласно МДС 81-34.2004 [10]. Аналогично рассчитывалась сметная прибыль. Нормы сметной прибыли приняты согласно МДС 81-25.2001 [11]. Результаты сравнения экономических показателей рассматриваемых вариантов каркасов административного здания приведены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7

Расчет экономических показателей

Расчетные показатели	Каркас	
	железобетонный	металлический
Прямые затраты, руб., в том числе:	3657342	6465832
– основная зарплата	535508	482917
– эксплуатация машин и механизмов, в т.ч. заработная плата	436345	587124
– материалы	2685489	5395792
Накладные расходы, руб.	768036	617962
Себестоимость, руб.	4425378	7083795
Сметная прибыль, руб.	416020	334730
Сметная стоимость, руб.	4841398	7418524
НДС, руб.	871452	1335334
Итого с НДС, руб.	5712850	8753859
Сметная стоимость 1 м <sup>2</sup> , руб./м <sup>2</sup>	3969,3	6082,2
Трудозатраты, чел-ч.	3460,65	2315,46

Как видно из результатов сравнения, по критерию сметной стоимости более затратным является металлический каркас. При этом трудозатраты на возведение железобетонного каркаса превышают трудозатраты на возведение металлического в 1,5 раза.

Однако для принятия окончательного решения необходимо данные табл. 7 рассмотреть с учетом следующих региональных условий. К завершению возведения железобетонного каркаса здание с металлическим каркасом уже будет эксплуатироваться. Фактор времени в данном случае является недостатком меньшей трудоемкости возведения железобетонного каркаса. К тому же, если учитывать региональные особенности климата Северо-Запада России, в зимних условиях усложняется технология возведения монолитного железобетонного каркаса, что может потребовать не только дополнительных затрат времени, энергии, материальных и трудовых ресурсов, но, возможно, приведет к снижению качества и надежности каркаса при увеличении его стоимости.

### ВЫВОДЫ

1. Расчеты прочности, перемещений и трещиностойкости должны выполняться для пространственной системы здания с использованием программных комплексов. Это позволит рассчитать геометрические размеры сечений элементов, армирование, трещиностойкость и перемещения с учетом всех усилий, действующих на систему здания.

2. Технико-экономические показатели вариантов каркасов зданий необходимо анализировать с учетом региональных условий, влияющих на трудоемкость и продолжительность строительства.

### Список литературы

1. Методика определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации : с изм. от 16.06.14. : МДС 81-35.2004 : утв. Госстроем России : введ. с 09.03.04г. // Техэксперт: проф. справ. система / ООО «Кодекс ИТ». – Электрон. дан. – [Петрозаводск], cop.2015. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200035529>.
2. Пономарев, А.Б. О некоторых особенностях строительства в условиях плотной городской застройки и проблемах подготовки инженерных кадров /А.Б. Пономарев. – URL: [izhstroy.ru>catalog/article/12361](http://izhstroy.ru>catalog/article/12361) (09.06.2018).
3. Бугаева, Т.Н. Особенности возведения зданий в условиях городской застройки / Т.Н. Бугаева // Вестник ПсковГУ. Сер. «Технические науки». – 2015. – №1. – С.116–120. – URL: [ind.pckgu.ru>projects/pgu/storage/wt/wtu01/wtn01](http://ind.pckgu.ru>projects/pgu/storage/wt/wtu01/wtn01) (15.06.2018).
4. Гаджиев, А.Т. Особенности возведения жилых зданий в стесненных условиях исторически сложившейся застройки города / А.Т. Гаджиев, В.Г. Тотоев. – URL: [nauchforum.ru>студенческие конференции>/tech/3/33863](http://nauchforum.ru>студенческие конференции>/tech/3/33863) (21.06.2018).
5. Копотилова, А.С. Особенности строительства в условиях плотной городской застройки / А.С. Копотилова // Молодой ученый. – 2017. – №49. – С.59–61. – URL: <https://moluch.ru /archive/183/46924/> (04.03.2018).
6. Ермолаев, А.И. Основные мероприятия, повышающие надежность организационно-технологических решений при строительстве (реконструкции) в условиях плотной городской застройки / А.И. Ермолаев // Сб. статей по материалам LI международной студ. научно-практ. конф. №3 (50). (Россия, Новосибирск, 30 марта 2017 г.). – URL: [https://sibac.info/archive/technic№3\(50\).pdf](https://sibac.info/archive/technic№3(50).pdf)
7. Чебанова, С.А. Организационно-технологические решения строительства в стесненных городских условиях / С.А. Чебанова, О.В. Бурлаченко, В.А. Поляков // Инженерный вестник Дона. – 2018. – №1. – URL: [ivdon.ru/gu/magazine/archive/nlg](http://ivdon.ru/gu/magazine/archive/nlg) 2018/4802.
8. СП 3.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Система оповещения и управления эвакуации людей при пожаре. Требования пожарной безопасности. Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – М., 2009. – 6 с.

9. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: Минстрой России, 2013. – 175 с.

10. Методические указания по определению величины накладных расходов в строительстве, осуществляемом в районах Крайнего Севера и местностях, приравненных к ним : с изм. и доп.: МДС 81-34.2004: утв. Госстроем России: введ. с 12.01.04// Техэксперт: проф. справ. система/ ООО «Кодекс ИТ». – Электрон. дан. – [Петрозаводск], cop.2015. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200034930>.

11. Методические указания по определению величины сметной прибыли в строительстве: МДС 81-25.2001: утв. Госстроем России: введ. 01.03.01// Техэксперт: проф. справ. система / ООО «Кодекс ИТ». – Электрон. дан. – [Петрозаводск], cop.2015. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200007421>.

## References

1. Methods of determining the cost of construction products in the Russian Federation: amended in 16.06.14. : MDS 81-35.2004: app. Gosstroy of Russia]. with 09.03.04 g. // techexpert: prof. sprav. system / LLC "Code of it". – Electron. dan. – [Petrozavodsk], cop.2015. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200035529>.

2. On the features of the construction in the conditions of dense urban development and problems of training engineering personnel. – URL: [izhstroy.ru](http://izhstroy.ru) > catalog/article / 12361 (09.06.2018).

3. Bugaeva, T.N. Features of construction of buildings in urban development / T.N. Bugaev // Vestnik Pskovo. Ser. «Technical science». – 2015. – №1. – P. 116–120. – URL: [ind.pckgu.ru>projects/pgu/storage/wt/wtu01/wtn01](http://ind.pckgu.ru/projects/pgu/storage/wt/wtu01/wtn01) (15.06.2018).

4. Features of the construction of residential buildings in the cramped conditions of the city development / A.T. Gadzhiev, V.G. Totoev. – URL: [nauchforum.ru>student-conference>/tech/3/33863](http://nauchforum.ru/student-conference/tech/3/33863) (21.06.2018).

5. Koptelova, A.S. Features of construction in dense urban areas / A.S. Koptilov // Young scientist. – 2017. – No. 49. – P. 59–61. – URL: <https://moluch.ru/archive/183/46924/> (04.03.2018).

6. Yermolaev, A.I. Main measures increasing the reliability of organizational and technological solutions in the construction (reconstruction) in the conditions of dense urban development. articles on the materials of LI international student. scientific practice. Conf. №3 (50). (Russia, Novosibirsk, 30 March 2017). – URL: [https://sibac.info/archive/technic№3\(50\).pdf](https://sibac.info/archive/technic№3(50).pdf)

7. Chebanov, S.A. Organizational-technological solutions of construction in cramped urban environments / S.A. Chebanova, O.V. Burlachenko, V.A. Polyakov // Bulletin of Engineering of the Don. – 2018. – №1. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/nlg/2018/4802](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/nlg/2018/4802).

8. SP 3.13130.2009. Fire protection system. Warning system and management of evacuation of people in case of fire. Fire safety requirements. The Ministry of the Russian Federation for civil defence, emergencies and disaster relief. – М., 2009. – 6 p.

9. SP 63.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures. Updated version of SNiP 52-01-2003. – М.: Ministry Of Construction, 2013. – 175 p.

10. Guidelines for determining the value of overhead costs in construction carried out in the Far North and areas equated to them : with izm. and additional: MDS 81-34.2004: approved. The Gosstroy of Russia]. from 12.01.04 // techexpert: prof. system/ LLC "Code of it". – Electron. dan. – [Petrozavodsk], cop.2015. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200034930>.

11. Guidelines for determining the estimated profit in construction: MDS 81-25.2001: app. The Gosstroy of Russia. 01.03.01 // techexpert: Prof. system / LLC "Code of it". – Electron. dan. – [Petrozavodsk], cop.2015. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200007421>.

# ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

## ECONOMICS AND MANAGEMENT

УДК 004.4

*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

**Васин Леонид Анатольевич,**  
кандидат технических наук, доцент,  
зав. кафедрой «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: leo@pguas.ru

**Глебова Татьяна Александровна,**  
доцент кафедры «Информационно-  
вычислительные системы»

*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

**Glebova Tatiana Aleksandrovna,**  
Associate Professor of the department  
«Information-computing systems»

### ОРГАНИЗАЦИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ: ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ LINUX

Л.А. Васин, Т.А. Глебова

Рассматривается совершенствование образовательного процесса на основе внедрения различного программного обеспечения (сетевые анализаторы, сканеры портов, утилиты для настройки сетевых интерфейсов и т. д.). Обосновано использование коммерческого класса программ, дана оценка ряда ограничений на их применение (финансовые затраты на приобретение и продление лицензий, общая стоимость программного обеспечения). Показана ориентация на использование отечественного программного обеспечения при реализации программ импортозамещения.

Доказана необходимость внедрения открытого программного обеспечения в условиях запрета на приобретение иностранных программных продуктов.

Рассмотрен вариант применения ОС Linux в образовательном процессе для дисциплин, связанных с изучением сетевых технологий, а также администрированием корпоративных систем.

*Ключевые слова: строительство, подготовка кадров, образовательный процесс, операционная система, информационные сервисные службы, администрирование*

---

## ORGANIZATION OF THE EDUCATIONAL PROCESS AT UNIVERSITY ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION: APPLICATION OF THE LINUX OPERATING SYSTEM

L.A. Vasin, T.A. Glebova

We consider the improvement of the educational process based on the use of various software (network analyzers, port scanners, utilities for setting up network interfaces, etc.). The use of a commercial class of programs, the assessment of a number of restrictions on their use (financial costs for the acquisition and renewal of licenses, cost of the software). An orientation is shown on the use of domestic software in the implementation of import substitution programs.

The evaluation of the use of open source software in terms of the ban on the purchase of foreign software products is given.

The application of the Linux OS in the educational process for disciplines related to the study of network technologies, as well as the administration of corporate systems, is considered.

*Keywords: construction, training, educational process, operating system, information service services, administration*

### Введение

Изучение информационных технологий связано с использованием программных пакетов. Процесс организации учебного процесса сталкивается с определенными трудностями, связанными с программным обеспечением лабораторных занятий.

В настоящее время получила развитие ОС Linux, как открытая и свободно распространяемая операционная система, обладающая широким набором программ, а также расширенными средствами её администрирования и оптимизации. Она широко применяется в качестве базовой ОС серверов различного назначения, функционирующих в составе корпоративных информационных систем, а также при разработке программного обеспечения различных классов. Поддержка существующих сетевых протоколов, а также возможности обработки сетевых пакетов с использованием сетевого пакетного фильтра позволяют применять данную ОС в качестве базовой для различного класса маршрутизаторов.

ОС Linux обладает расширенным набором системного и пользовательского программного обеспечения, включающим языки программирования, базы данных, средства разработки, а также информационные сервисы. Поэтому перспективным является использование данной ОС в качестве основной при организации образовательного процесса для студентов, изучающих дисциплины, связанные с информационными технологиями.

В образовательном процессе вузов получили распространение программные средства для ОС Windows. Это и языки программирования, отладчики и различные СУБД, пакеты для проведения моделирования и расчетов. Это или коммерческое программное обеспечение или свободно распространяемые, а также тестовые или пробные версии с уменьшенным функциональным оснащением. Они необходимы для изучения процесса программирования, особенно с использованием средств разработки и программирования для ОС Windows Visual Studio, предоставляемой по студенческой или преподавательской лицензии. Кроме того, Autodesk обеспечивает полный доступ к пакетам автоматического проектирования, что позволяет обеспечить проведение лабораторных работ по курсам, связанным с машинной графикой и проектированием конструкций различного назначения.

Большие трудности возникают при проведении лабораторных работ по изучению структуры и организации операционных систем, процесса их администрирования, разработки сетевых программ, а также параллельного программирования при использовании ОС Windows.

Применение ОС Linux в образовательном процессе имеет следующие преимущества:

- Экономия на приобретении лицензий на используемое ПО.
- Свободное использование ОС студентами и преподавателями.

- Использование новейших версий системного и пользовательского ПО.
- Глубокое изучение процесса администрирования ОС.
- Наличие возможности реконфигураций ядра ОС.
- Детальное изучение сетевого стека с возможностью управления сетевыми пакетами.
- Изучение процесса создания систем сетевой защиты ОС.
- Возможность мониторинга структуры сетевых пакетов.
- Изучение процесса разработки и отладки программного обеспечения различного класса.
- Организация реальной работы с ОС и используемым программным обеспечением.
- Возможность изучения процесса администрирования сетевых информационных служб.
- Наличие возможности проводить тестовую и экспериментальную работы при разработке высоконагруженных приложений и сервисов.
- Изучение различных систем контейнерной и виртуальной изоляции процессов и систем.
- Изучение систем параллельного программирования.
- Изучение технологии программирования на графических процессорных устройствах.

Существуют различные версии ОС Linux, которые можно использовать при организации лабораторных занятий, посвященных изучению сетевых технологий и процесса администрирования информационных серверов различного назначения. Часть из них, такие, как Fedora Linux, CentOS Linux, Ubuntu, Debian, Astra Linux Common Edition, относятся к универсальным ОС, но существуют и специализированные версии для учебного процесса, например BaseALT Образование. Кроме этого существует приобретение Astra Linux с бесплатной лицензией для образовательных учреждений. Наличие в ее составе программных средств, а также системные возможности данных ОС позволяют создавать лабораторные работы по администрированию сетевых сервисных служб, изучению сетевых технологий, систем виртуализации, управлению сетевой подсистемой. С помощью систем виртуализации можно эмулировать различные комбинации серверов приложений с последующим их администрированием, а также специализированные серверы по управлению сетевым трафиком. Это позволяет изучить работу с реальными физическими установками серверов-приложений, таких, как файловый, почтовый, Web, а также моделировать дальнейшую их работу с использованием одной физической платформы, в роли которой может выступать компьютер на рабочем месте обучающегося.

#### Основная часть

Сетевые возможности ОС Linux позволяют организовать лабораторные занятия по учебным курсам, изучающим администрирование информационных систем и компьютерные сети (ИС). Курс по администрированию ИС подразумевает рассмотрение вопросов создания и управления сетевыми информационными сервисами в используемых ОС, управления сетевым трафиком и его мониторинга, а также конфигурирования сетевых интерфейсов, изучения структуры сетевых пакетов.

Основные трудности, связанные с невозможностью освоения всех аспектов сетевого и системного администрирования на основе ОС Windows, обуславливаются наибольшим распространением ОС Linux как базовой при построении Интернет-серверов для развертывания информационных сервисных служб. Усвоение принципов администрирования ОС Linux как базовых позволяет в дальнейшем осуществить переход на ОС Windows.

В архитектурно-строительном университете в качестве ОС для образовательного процесса используются различные проекты, такие, как Fedora Linux. Это универсальный дистрибутив, нацеленный на применение самых современных технологий при

реализации ОС Linux. Развивается при поддержке крупнейшего производителя программного обеспечения для ОС Linux RedHat. Преимущество использования данного дистрибутива заключается в работе обучающихся на самом современном программном обеспечении, а также в возможности протестировать новые изменения в структуре самой операционной системы. Кроме нее применяется отечественная ОС ALT Linux, разработанная российской компанией Alt Linux Team. По своим возможностям для использования в образовательном процессе, а также по программным продуктам, находящимся в репозитории, не уступает ОС Linux зарубежных проектов.

Построение цикла лабораторных работ по курсу «Администрирование корпоративных систем» с использованием ОС Linux выполняется в следующей последовательности:

- практическое ознакомление с основами администрирования сетевой подсистемы;
- изучение базовых сетевых сервисных служб;
- практическое создание различных вариантов сетевых сервисов, таких, как Web-сервер, файловые Samba, ftp, nfs серверы, с их интеграцией в составе локальной сети;
- настройка брандмауэра.

Первый этап обучения осуществляется с использованием командной строки терминального сеанса ОС Linux, что позволяет понять структуру файловой системы, изучить основные команды для администрирования компонентов системы, а также освоить навыки работы в терминальном режиме. В дальнейшем можно перейти к сетевому администрированию различных сетевых устройств, например маршрутизаторов, коммутаторов, в которых полностью отсутствует графический режим настройки, например оборудование Cisco.

Для работы с сетевым оборудованием и трафиком в ОС Linux включены специальные команды. С их помощью можно осуществлять полный цикл процесса администрирования сетевого стека, а также изучать структуру сетевых пакетов и проводить мониторинг работы сетевых приложений. Например, для обучения процессам настроек сетевого интерфейса используют команду `ifconfig`. На рис. 1 показана сводная информация по сетевым интерфейсам, находящимся в системе.

```

root@del-r710:/var/lib/flatpak/images
collisions:0 txqueuelen:500
RX bytes:483846 (472.5 KiB) TX bytes:415885479 (396.6 MiB)

vnet2 Link encap:Ethernet Haddr:FE:54:00:48:03:00
Inet6 addr: fe80::fc54:ff:fe48:36d/64 Scope:Link
UP BROADCAST RUNNING MULTICAST MTU:1500 Metric:1
RX packets:11268029 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
TX packets:3629332 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
collisions:0 txqueuelen:500
RX bytes:795329486 (65.6 GiB) TX bytes:4661565604 (4.3 GiB)

vnet3 Link encap:Ethernet Haddr:FE:54:00:5C:EA:29
Inet6 addr: fe80::fc54:ff:fe5c:ea2/64 Scope:Link
UP BROADCAST RUNNING MULTICAST MTU:1500 Metric:1
RX packets:1866835 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
TX packets:28248142 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
collisions:0 txqueuelen:500
RX bytes:32371233 (31.2 GiB) TX bytes:2822760714 (2.6 GiB)

vnet4 Link encap:Ethernet Haddr:FE:54:00:0F:9E:98
Inet6 addr: fe80::fc54:ff:fe0f:9e9/64 Scope:Link
UP BROADCAST RUNNING MULTICAST MTU:1500 Metric:1
RX packets:6525081 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
TX packets:1366051 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
collisions:0 txqueuelen:500
RX bytes:463642583 (43.1 GiB) TX bytes:115281882 (1.0 GiB)

vnet5 Link encap:Ethernet Haddr:FE:54:00:5D:CD:FE
Inet6 addr: fe80::fc54:ff:fe5d:cdfe/64 Scope:Link
UP BROADCAST RUNNING MULTICAST MTU:1500 Metric:1
RX packets:12420912 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
TX packets:13982597 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
collisions:0 txqueuelen:500
RX bytes:2038528564 (18.7 GiB) TX bytes:4325882253 (4.0 GiB)

vnet6 Link encap:Ethernet Haddr:FE:54:00:FC:37:EE
Inet6 addr: fe80::fc54:ff:fe54:fc37/64 Scope:Link
UP BROADCAST RUNNING MULTICAST MTU:1500 Metric:1
RX packets:37288 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
TX packets:492738 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
collisions:0 txqueuelen:500
RX bytes:3204817 (3.0 MiB) TX bytes:41871897 (399.3 MiB)

vnet7 Link encap:Ethernet Haddr:FE:54:00:5D:78:C4
Inet6 addr: fe80::fc54:ff:fe5d:78c4/64 Scope:Link
UP BROADCAST RUNNING MULTICAST MTU:1500 Metric:1
RX packets:757399 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
TX packets:632738 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
collisions:0 txqueuelen:500
RX bytes:2827591211 (2.6 GiB) TX bytes:529530102 (504.9 MiB)

root@del-r710:/images#
    
```

Рис. 1. Список сетевых интерфейсов в ОС Linux

После освоения принципов работы с сетевыми интерфейсами необходимо переходить на изучение работы с сетевыми соединениями, используя команду `netstat`. На рис. 2 показан листинг существующих сетевых соединений в ОС Linux для IP 192.168.5.4. С

помощью данной команды обучающийся может визуализировать сетевые соединения, таблицы маршрутизации, статистику интерфейсов, что позволит более детально понять принципы работы сетевой системы.

```
Active Internet connections (w/o servers)
Proto Recv-Q Send-Q Local Address           Foreign Address         State       PID/Program name
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:43426     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:43678     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.4:http      pguas.ru:39523        ESTABLISHED 3190/nginx
tcp      0      0 192.168.5.4:http      77.139.35.150:53076   TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44048     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 localhost:40760        localhost:imap         TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.99:ssh      192.168.5.1:29885     ESTABLISHED 969054/sshd
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:43888     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:43604     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:43612     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.4:http      crawl-66-249-70-17.go:63186 TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:43594     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44100     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:43874     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.4:http      91.185.15.126:epnsdp  ESTABLISHED -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:43948     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:43868     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:43674     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44092     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44238     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.4:http      91.185.15.126:av-emb-config ESTABLISHED -
tcp      0      0 192.168.5.4:http      91.185.15.126:dls-monitor ESTABLISHED -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44008     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44014     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:43568     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44098     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.4:http      77.139.35.150:53064   TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44050     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44284     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.4:http      crawl-66-249-64-223.g:65056 ESTABLISHED 3190/nginx
tcp      0      0 192.168.5.4:https     pool-97-18.ptcomm.ru:53843 ESTABLISHED 3183/nginx
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:43592     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44058     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.4:https     91x144x177x111.static-rcst ESTABLISHED 3183/nginx
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44286     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44028     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.4:http      pguas.ru:46188        ESTABLISHED 3190/nginx
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44250     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:43982     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:43578     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:43916     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44046     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.4:http      91.185.15.126:knetd   ESTABLISHED -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44268     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44138     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.4:http      dynamicip-94-181-148-39343 ESTABLISHED 3190/nginx
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44042     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44084     TIME_WAIT  -
tcp      0      0 192.168.5.116:http     192.168.5.4:44010     TIME_WAIT  -
--Далее--
```

Рис. 2. Мониторинг сетевых соединений

Для изучения сетевого трафика в терминальном режиме обучающийся использует утилиту `tcpdump`. Её основное назначение – отладка сетевых приложений и работы созданной администратором сетевой конфигурации, а также выявление причин сетевых коллизий и неисправностей работы сети. Освоив работу с этой утилитой, в рамках курса администрирования корпоративных систем можно использовать полученные компетенции при изучении курса по основам информационной безопасности. Применение именно данной утилиты более высокого уровня и с расширенными функциональными возможностями позволяет быстрее обучить основам сетевого анализа, так как формируется способность самостоятельно оценивать сетевой трафик без использования дополнительных приложений. На рис. 3 показан фрагмент анализа сетевого трафика через утилиту `tcpdump`.

После получения и закрепления навыков по проведению анализа сетевого трафика с помощью терминальной утилиты можно переходить к использованию специализированных программных пакетов, входящих в состав ОС Linux, например Wireshark. Это мощная программа-анализатор трафика. Она позволяет визуализировать весь сетевой трафик, проходящий через заданные сетевые интерфейсы в режиме реального времени. На рис. 4 показан мониторинг сетевых пакетов, проходящих через сетевой интерфейс.



Рис. 3. Фрагмент анализа сетевого трафика

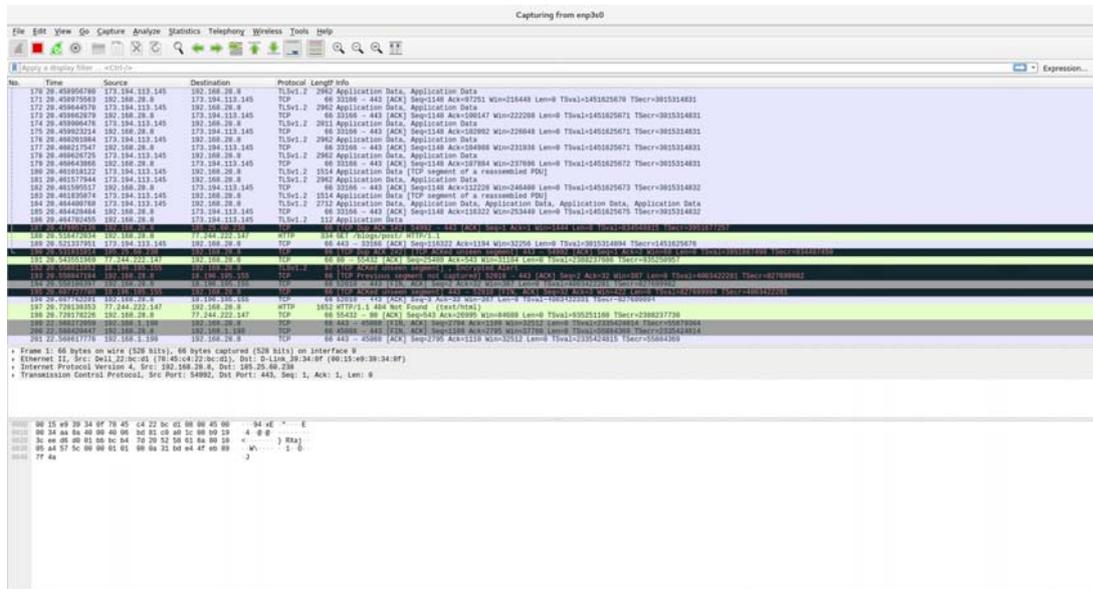


Рис. 4. Результаты захвата сетевого трафика программой Wireshark

Получив навыки работы с сетевым анализатором, обучающийся может самостоятельно освоить и другие существующие версии.

**Выводы:**

1. Показана возможность использования ОС Linux в организации образовательного процесса при изучении курса «Администрирование корпоративных систем».
2. Определены встроенные терминальные приложения с использованием возможности обучения по конфигурированию сетевых интерфейсов и анализу сетевого трафика.
3. Определен дистрибутив операционной системы Fedora Linux, используемый для проведения лабораторных работ по курсам, на которых изучаются сетевые технологии и администрирование корпоративных систем.

Список литературы

1. Таненбаум, Э.С. Современные операционные системы / Э.С. Таненбаум. – СПб.: Питер, 2010. – 1116 с.
2. Кофлер, М. Linux. Установка, настройка и администрирование / М. Кофлер, О. Сивченко. – СПб.: Питер, 2014. – 768 с.

Referances

1. Tanenbaum E.S. Modern operating systems / E.S. Tanenbaum. – SPb.: Peter, 2010. – 1116 p.
2. Kofler, M. Linux. Installation, configuration and administration / M. Kofler, O. Sivchenko. – SPb.: Peter, 2014. – 768 p.

---

## Указатель статей, опубликованных в 2018 г.

1. **Аверкин А.Г., Еремкин А.И., Киселёв С.О.** Контактный аппарат с вибронасадкой для увлажнения воздуха. – №3(36). – С.155–160.
2. **Андреев С.Ю., Ласьков Н.Н., Яхкинд М.И., Князев А.А.** Анализ концентрации феррата натрия в растворе гидроксида натрия после активационной обработки в электролизере. – №4(37). – С.159–165.
3. **Андреев С.Ю., Яхкинд М.И., Гарькина И.А.** Гидродинамические закономерности распределения величин местных осредненных скоростей турбулентного потока жидкости в поперечном сечении трубчатого гидродинамического устройства. – №2(35). – С.178–190.
4. **Андреев С.Ю., Яхкинд М.И., Гарькина И.А.** Гидродинамические закономерности перехода режима течения жидкости в трубчатом смесительном устройстве в область развитой турбулентности. – №3(36). – С.161–171.
5. **Андреев С.Ю., Яхкинд М.И., Гарькина И.А.** Оценка гидравлических характеристик трубчатого гидродинамического устройства, работающего в ламинарном режиме. – №1(34). – С.148–156.
6. **Андреев С.Ю., Яхкинд М.И., Гарькина И.А., Сафронов М.А.** Новая методика расчета гидродинамических характеристик пристеночного слоя трубчатых каплеобразователей, применяемых в процессах очистки нефтесодержащих сточных вод. – №2(35). – С.167–177.
7. **Бакушев С.В.** Главные площадки и главные напряжения в цилиндрической системе координат. – №4(37). – С.109–117.
8. **Бакушев С.В.** Ограничения деформационной теории пластичности сыпучей среды. – №2(35). – С.116–123.
9. **Белякова Е.А., Москвин Р.Н., Юрова В.С.** Самоуплотняющиеся бетоны: оптимизация свойств, технология производства. – №1(34). – С.48–54.
10. **Белякова Е.А., Уханов Д.А.** Метод многовариантной экспертизы на примере оценки качества городской среды г.Пензы. – №4(37). – С.205–210.
11. **Береговой А.М., Береговой В.А.** Выбор концепции архитектурно-строительного проектирования энергоэффективного здания. – №3(36). – С.223–228.
12. **Береговой А.М., Береговой В.А.** Энергоактивные элементы наружных ограждений зданий. – №2(35). – С.124–127.
13. **Береговой А.М., Береговой В.А., Гречишкин А.В., Воскресенский А.В.** Ограждающие конструкции с регулируемыми параметрами теплопереноса. – №1(34). – С.97–101.
14. **Береговой А.М., Береговой В.А., Скачков Ю.П.** Теплотехнические свойства наружных ограждений в условиях жаркого и холодного климата. – №4(37). – С.123–127.
15. **Береговой В.А., Снадин Е.В.** Улучшение прочностных показателей пенокерамического сырца. – №4(37). – С.80–84.
16. **Береговой В.А., Фокин Г.А., Снадин Е.В.** Псевдоразжижение сырьевых масс в технологии ячеистой керамики на основе природных силицитов. – №2(35). – С.26–30.
17. **Берсенева М.А.** Методологические основы оценки комфортности городской среды на примере г.Пензы. – №4(37). – С.198–204.
18. **Бодров В.И., Бодров М.В., Кузин В.Ю., Морозов М.С.** Определение базовых показателей энергетической эффективности систем обеспечения параметров микроклимата при капитальном ремонте жилого фонда. – №4(37). – С.178–185.

19. **Бормотов А.Н., Бормотова А.А.** Интегрированный комплекс математического моделирования и многокритериального синтеза композиционных материалов. – №3(36). – С.97–103.
20. **Вапиров Ю.М., Лаврентьева К.Г., Старцев О.В., Ерофеев В.Т.** Механизм взаимодействия древесины с водой. – №3(36). – С.40–48.
21. **Васин Л.А.** Архитектура системы беспроводного доступа на примере строительного университета. – №1(34). – С.174–179.
22. **Васин Л.А.** Организация видеоконференций в электронной информационной образовательной системе университета. – №2(35). – С.218–221.
23. **Васин Л.А.** Организация электронного документооборота в подготовке специалистов строительного профиля. – №1(34). – С.180–189.
24. **Васин Л.А.** Применение технологии виртуализации в информационной системе вуза. – №3(36). – С.229–233.
25. **Васин Л.А., Глебова Т.А.** Организация образовательного процесса в архитектурно-строительном университете: применение операционной системы LINUX. – №4(37). – С.221–228.
26. **Вдовин В.М., Карпов В.Н.** Выбор рационального расположения ригеля-распорки в стропильной системе. – №2(35). – С.111–115.
27. **Вдовин В.М., Карпов В.Н.** Сравнительный анализ работы клееных панелей перекрытия с цельнодеревянными и комбинированными несущими ребрами. – №3(36). – С.142–147.
28. **Викторова О.Л.** Оценка теплозащитных свойств карбонатно-шлакового композиционного материала. – №2(35). – С.45–49.
29. **Вилкова Н.Г., Мишина С.И., Шатина Е.А.** Влияние дизельного топлива на устойчивость пен, формирующихся в сточных водах. – №3(36). – С.172–177.
30. **Воскресенский А.В., Гречишкин А.В.** Эпоксидные композиты с упорядоченной структурой и повышенной химической стойкостью с добавками высших жирных кислот. – №2(35). – С.31–35.
31. **Гаврилов М.А., Ерофеев В.Т., Мирский В.А.** Демпфирующие свойства модифицированных эпоксидных композитов. – №1(34). – С.59–62.
32. **Гаврилов М.А., Ерофеев В.Т., Худяков В.А.** Исследование видового разнообразия грибов-литобионтов, выделенных с образцов модифицированных эпоксидных композитов в условиях морского климата. – №1(34). – С.55–58.
33. **Гаврилов М.А., Смирнов В.Ф., Ерофеев В.Т.** Образцаемость мицелиальными грибами образцов модифицированных эпоксидных композитов в натуральных условиях. – №3(36). – С.17–22.
34. **Гарькин И.Н.** Теоретические исследования составных неразрезных подкрановых балок. – №2(35). – С.100–104.
35. **Гарькин И.Н., Глухова М.В.** Методы усиления фундаментов гражданских зданий. – №3(36). – С.130–135.
36. **Гарькина И.А., Данилов А.М.** Полиномиальные модели в прогнозировании свойств композитов: состояние, перспективы. – №2(35). – С.50–54.
37. **Гарькина И.А., Данилов А.М.** Формализация процессов формирования свойств композитов. – №2(35). – С.55–60.
38. **Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В.** Краткий обзор аналитических методов синтеза сложных систем. – №4(37). – С.48–54.
39. **Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В.** Проектирование и оптимизация свойств сложных систем. – №4(37). – С.5–11.
40. **Горшков В.И., Мирошниченко Д.С., Мельников Е.А.** Математическое моделирование надежности систем вентиляции с применением управляемых стохастических ветвящихся процессов. – №2(35). – С.137–145.
41. **Гришин Б.М., Бикунова М.В., Шеин А.И., Титов Е.А.** Оценка эффективности очистки хозяйственно-бытовых сточных вод катионными флокулянтами. – №1(34). – С.129–135.

- 
42. **Гришин Б.М., Кошев А.Н., Шеин А.И., Салмин С.М.** Зернистые фильтры с намывным слоем сорбента для доочистки нефтесодержащих сточных вод. – №3(36). – С.194–198.
43. **Гучкин И.С., Ласьков Н.Н.** Из опыта использования предварительно напряженных плит марок ПН 12.15.1 и ПН 39.15.1 в наружных стенах многоэтажного жилого дома. – №1(34). – С.85–90.
44. **Гучкин И.С., Ласьков Н.Н., Артюшин Д.В.** Оценка физического состояния пирамидальных радиобашен после длительной эксплуатации в экстремальных условиях Поволжского региона. – №3(36). – С.136–141.
45. **Гучкин И.С., Ласьков Н.Н., Скачков Ю.П.** Конструкция, способ изготовления и расчет многопустотной железобетонной плиты перекрытия с проёмом. – №4(37). – С.98–102.
46. **Данилов А.М., Гарькина И.А.** Долговечность материалов с системных позиций. – №1(34). – С.42–47.
47. **Данилов А.М., Гарькина И.А.** Кинетические процессы формирования свойств материалов, идентификация. – №1(34). – С.63–67.
48. **Данилов А.М., Гарькина И.А.** Концептуальные модели композитов как сложных систем: состояние и перспективы. – №3(36). – С.56–61.
49. **Данилов А.М., Гарькина И.А.** Методы теории эргатических систем в материаловедении. – №3(36). – С.71–74.
50. **Девликамов А.Ф., Херувимова И.А.** Зарубежная практика компенсационного озеленения при освоении городских территорий. – №3(36). – С.214–228.
51. **Дерина М.А.** Выбор утеплителя для навесного фасада с вентилируемым воздушным зазором. – №2(35). – С.133–136.
52. **Дерина М.А.** Навесной фасад с вентилируемым воздушным зазором как средство повышения энергетической эффективности в жилых и общественных зданиях. – №1(34). – С.102–105.
53. **Домке Э.Р., Жесткова С.А., Акимова В.Ю.** Логистика в доставке эксплуатационных материалов для дорожно-строительной техники. – №2(35). – С.203–210.
54. **Еремкин А.И., Аверкин А.Г.** Оценка взаимодействия многокомпонентных текстильных материалов с кондиционированным воздухом. – №4(37). – С.143–150.
55. **Ерёмкин А.И., Аверкин А.Г., Баканова С.В.** Оценка эффективности локальной системы технологического кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции. – №1(34). – С.157–161.
56. **Еремкин А.И., Баканова С.В., Алексеева Т.В.** Разработка математической модели гигроскопических процессов взаимодействия текстильных материалов с кондиционированным воздухом. – №3(36). – С.178–183.
57. **Ерёмкин А.И., Фильчакина И.Н., Аверкин А.Г., Родионов Ю.В.** Методика аэродинамического расчета воздухораспределителя с оппозитными щелевидными насадками. – №4(37). – С.135–142.
58. **Ерофеев В.Т., Тараканов О.В., Ерофеева И.В., Коротаев С.А., Емельянов Д.В., Балатханова Э.М.** Исследование прочности композитов, наполненных порошками карбонатных пород. – №1(34). – С.5–13.
59. **Жегера К.В., Пышкина И.С.** Оценка эффективности применения аморфных алюмосиликатов в сухих строительных смесях. – №3(36). – С.85–90.
60. **Зернов В.В., Зайцев М.Б., Анурьева Ю.В.** Определение рациональной жесткости стержней металлических ферм из условия равноустойчивости. – №1(34). – С.106–110.
61. **Калачук Т.Г., Оноприенко Н.Н., Курбатова В.В.** О длительной прочности водонасыщенных лессовых грунтов. – №2(35). – С.105–110.
62. **Карпова О.В.** Экологическая сертификация – гарантия безопасности строительных и отделочных материалов. – №3(36). – С.91–96.
63. **Комаров В.А., Болдырева О.В.** Исследования коротких консолей ригелей многоэтажных каркасов: расчётные схемы работы в наклонных сечениях. – №3(36). – С.125–129.

64. **Комаров В.А., Болдырева О.В.** Стержневые модели бетонных полос консольных опор. – №4(37). – С.118–122.
65. **Королева Т.И., Аржаева Н.В.** Исследование возможности конденсации водяного пара в толще многослойной конструкции наружного ограждения. – №2(35). – С.152–158.
66. **Королева Т.И., Аржаева Н.В., Мельников И.Е.** Исследование влажностного состояния неоднородных конструкций наружных ограждений. – №2(35). – С.159–166.
67. **Кочеткова М.В.** Расчёт прочности ростверка под колонну по каркасно-стержневым моделям. – №1(34). – С.116–121.
68. **Кошев А.Н., Кузина В.В.** Оптимальная расстановка узлов разбиения интервала интегрирования при численном решении интегральных уравнений методом Боголюбова – Крылова. – №4(37). – С.193–197.
69. **Кошев А.Н., Кузина В.В., Васин Л.А., Глебова Т.А.** Электронная среда как средство повышения эффективности образовательного процесса. – №2(35). – С.211–217.
70. **Кошев А.Н., Логанина В.И., Демьянова В.С., Фролов М.В.** Закономерности массопереноса в отделочном слое на основе теплоизоляционной сухой строительной смеси в процессе увлажнения. – №1(34). – С.136–140.
71. **Кузина В.В., Кошев А.Н.** Об особенностях применения метода Левенберга – Марквардта при решении научных задач в области строительства. – №2(35). – С.128–132.
72. **Кузьмишкин А.А., Гарькин И.Н.** Выносливость сварных подкрановых балок. – №1(34). – С.111–115.
73. **Кучеренко М.Н., Чиркова Е.В., Бикунова М.В., Грейсух Г.И., Салмин В.В.** Определение расчетных параметров наружного и внутреннего воздуха на основе теории потенциала влажности. – №1(34). – С.162–167.
74. **Лаврова О.В.** Прочность железобетонных коротких балок на основе каркасно-стержневых моделей. – №1(34). – С.91–96.
75. **Левцев А.П., Лапин Е.С., Бикунова М.В., Салмин В.В.** Конструктивные особенности и оценка работы оборудования для импульсной подачи теплоносителя. – №4(37). – С.151–158.
76. **Леонтьев В.А.** Эффективность когенерационной станции, работающей на биогазе. – №4(37). – С.186–192.
77. **Леснов В.В., Афонин В.В., Ерофеев В.Т.** Исследование прочностных свойств наполненных пластифицированных цементных матриц, предназначенных для каркасных композитов. – №4(37). – С.71–79.
78. **Леснов В.В., Ерофеев В.Т.** Реологические и структурные свойства наполненных матричных цементных композиций, предназначенных для каркасных композитов. – №4(37). – С.12–19.
79. **Логанина В.И., Демьянова В.С., Фокин Г.А., Фролов М.В.** Обоснование выбора компонентов при создании теплоизоляционных сухих строительных смесей. – №2(35). – С.61–70.
80. **Логанина В.И., Куимова Е.И., Учаева Т.В.** Нормативная обеспеченность качества сухих строительных смесей. – №1(34). – С.37–41.
81. **Логанина В.И., Мажитов Е.Б.** Исследование проницаемости золь-силикатных покрытий. – №3(36). – С.80–84.
82. **Логанина В.И., Мажитов Е.Б.** Реологические свойства красок на основе полисиликатных растворов. – №1(34). – С.32–36.
83. **Логанина В.И., Мажитов Е.Б.** Формирование качества внешнего вида покрытий на основе полисиликатных растворов. – №3(36). – С.75–79.
84. **Мажитов Е.Б., Скачков Ю.П.** Горючесть золь-силикатных покрытий. – №4(37). – С.85–88.
85. **Максимова И.Н., Макридин Н.И., Ерофеев В.Т., Полубарова Ю.В.** Комплексная оценка кинетических параметров конструкционной прочности цементного камня в диапазоне времени от 28 суток до 4,5 лет после пропарки. – №3(36). – С.23–30.
86. **Максимова И.Н., Макридин Н.И., Ерофеев В.Т., Туманова Н.Н.** Анализ влияния концентрации и процедуры дозирования суперпластификатора на энергию

---

акустической эмиссии при силовом разрушении цементного камня в интервале времени 18 лет. – №3(36). – С.31–39.

87. **Максимова И.Н., Макридин Н.И., Королев Е.В.** Сравнительный анализ кинетических зависимостей на ранних и поздних стадиях процессов структурообразования конструкционной прочности цементных композитов. – №2(35). – С.5–12.

88. **Матюхин П.В., Павленко В.И., Широков А.В.** Изучение влияния высоких давлений прессования на изменение фазового состава гематита и его поведение при высоких температурах. – №4(37). – С.89–97.

89. **Махаев В.Б.** Градостроительная эволюция г.Темникова. – №3(36). – С.205–213.

90. **Мебадури З.А., Учаева Т.В., Сигунова Е.И.** Эффективность применения различных технологий возведения жилых домов на примере Пензенской области. – №2(35). – С.196–202.

91. **Миряев Б.В., Городнов И.И.** Купольное покрытие жилого дома. – №4(37). – С.128–134.

92. **Низина Т.А., Коровкин Д.И., Макарова Л.В., Балыков А.С., Володин В.В.** Исследование влияния температурно-влажностного режима на физико-механические свойства бездобавочного мелкозернистого бетона. – №1(34). – С.68–73.

93. **Низина Т.А., Чернов А.Н., Низин Д.Р., Горенкова А.И., Черушова Н.В.** Анализ изменения колориметрических характеристик пигментированных эпоксидных композитов в процессе натурального экспонирования. – №4(37). – С.55–64.

94. **Осипова Н.Н., Гришин Б.М., Грейсхух Г.И., Ежов Е.Г.** Режимы эксплуатации систем газоснабжения на базе баллонных установок сжиженного углеводородного газа. – №3(36). – С.184–193.

95. **Очкина Н.А.** Влияние модифицирующих добавок на пористость радиационно-защитного композита. – №2(35). – С.71–75.

96. **Петрянина Л.Н.** Функциональная организация жилого района с учетом природной среды. – №1(34). – С.168–173.

97. **Петрянина Л.Н., Гречишкин А.В.** Методика повышения эффективности использования городских территорий при реконструкции жилых районов. – №2(35). – С.191–195.

98. **Рахимбаев Ш.М., Рахимбаев И.Ш., Хахалева Е.Н.** О механизме гидросульфатоалюминатного расширения цементного камня. – №4(37). – С.65–70.

99. **Рулев А.В., Усачева Е.Ю.** Разработка методических положений по тепловому расчету конденсаторов тепловых насосов, использующих в качестве рабочих агентов зеотропные смеси. – №2(35). – С.146–151.

100. **Селютина Л.Ф., Емельянова Е.Г., Цветаев С.А.** Особенности проектирования каркаса здания с автостоянкой в цокольной части в условиях стесненной застройки. – №4(37). – С.211–220.

101. **Селяев В.П., Магдеев У.Х., Низина Т.А., Низин Д.Р., Ерофеева А.А.** Критерии разрушения и напряженно-деформированное состояние слоистых элементов с полимерными защитно-декоративными покрытиями. – №1(34). – С.74–84.

102. **Селяев В.П., Селяев П.В., Алимов М.Ф., Гарынкина Е.Н., Сорокин Е.В.** Оценка ресурса железобетонного изгибаемого элемента, подверженного действию хлоридной коррозии, по прочности наклонного сечения. – №3(36). – С.104–115.

103. **Селяев В.П., Селяев П.В., Алимов М.Ф., Горенков А.О.** Оценка надежности железобетонных изгибаемых элементов, работающих в условиях действия агрессивных сред. – №4(37). – С.103–108.

104. **Селяев В.П., Селяев П.В., Алимов М.Ф., Колотушкин А.В., Кечуткина Е.Л.** Влияние наполнителей и пластификаторов на химическое сопротивление цементных композитов водным растворам, содержащим ионы хлора. – №1(34). – С.14–22.

105. **Селяев В.П., Селяев П.В., Колотушкин А.В., Кечуткина Е.Л.** Влияние наполнителей на химическое сопротивление цементных композитов водным раствором, содержащим сульфат-ионы. – №1(34). – С.23–31.

106. **Селяев В.П., Сорокин Е.В., Селяев П.В., Алимов М.Ф.** Влияние вида функциональной зависимости « $\sigma$  –  $\epsilon$ » на расчетные прогибы пластины. – №2(35). – С.17–25.
107. **Толстой А.Д., Лесовик В.С., Крымова А.И.** Синергетические принципы самоорганизации системы в теории твердения многокомпонентных порошковых композиций. – №3(36). – С.49–55.
108. **Усачев А.П., Шурайц А.Л., Бирюков А.В., Хомутов А.О.** Моделирование процесса засорения одной фильтрующей сетки механическими примесями в зависимости от изменения газодинамических потерь на фильтрующем картридже грубой очистки. – №3(36). – С.148–154.
109. **Усачев А.П., Шурайц А.Л., Салин Д.В., Усуев З.М.** Основные принципы устройства и функционирования газовых цилиндрических фильтрующих устройств высокой пропускной способности. – №1(34). – С.141–147.
110. **Устарханов О.М., Муселемов Х.М., Ирзаев Г.Г.** Расчет параметров трехслойной панели с волокнистым наполнителем при действии динамической равномерно распределенной и сосредоточенной нагрузок. – №2(35). – С.92–99.
111. **Учаева Т.В., Духанина Е.В., Иванова Д.С.** Формирование системы риск-менеджмента на предприятиях инвестиционно-строительного комплекса. – №1(34). – С.190–193.
112. **Фиговский О.Л., Пенский О.Г.** Математические модели многоствольных строительных артиллерийских орудий. – №4(37). – С.166–177.
113. **Фокин Г.А., Тетюшева О.В., Вилкова Н.Г.** Влияние вихревого динамического поля на свойства строительных материалов. – №2(35). – С.36–44.
114. **Фомина Е.В., Лесовик В.С., Фомин А.Е., Абсиметов М.В., Елестраткин М.Ю.** Повышение эффективности газобетона за счет применения отходов угледобычи. – №4(37). – С.38–47.
115. **Хаметов Т.И.** Измерение геометрических параметров подкрановых путей мостовых кранов геодезическими методами. – №1(34). – С.122–128.
116. **Хомяков А.И.** Знаки места: региональные мемориально-музейные комплексы. – №3(36). – С.199–204.
117. **Черкасов В.Д., Авдонин В.В., Волоцкой А.Н., Юркин Ю.В., Мансурова И.А.** Влияние модифицирующих добавок на динамические свойства полимерных материалов на основе этиленвинилацетата. – №4(37). – С.20–29.
118. **Черкасов В.Д., Авдонин В.В., Юркин Ю.В., Смиркин А.С., Тюрин М.В., Бородин А.В.** Прогнозирование демпфирующих свойств композита с учетом свойств межфазного слоя. – №4(37). – С.30–37.
119. **Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Пронин Д.Н.** Изучение влияния различных тонкодисперсных добавок на физико-механические свойства цементных композитов. – №3(36). – С.62–70.
120. **Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Шешин А.В.** Влияние тонкодисперсных добавок и волокон на удельную ударную вязкость цементных композитов. – №2(35). – С.13–16.
121. **Шенин А.И., Зернов В.В., Зайцев М.Б.** Анализ дефектов крыш жилых и гражданских зданий. – №3(36). – С.116–124.
122. **Шенин А.И., Зернов В.В., Зайцев М.Б.** Опыт реновации жилого дома без расселения жильцов после отказа некоторых конструктивных элементов. – №2(35). – С.76–83.
123. **Шеховцова С.Ю., Королев Е.В.** Обзор современного опыта использования реюнивателей для реверсинга асфальтобетонных покрытий. – №3(36). – С.5–16.
124. **Шишкин С.О., Гучкин И.С., Ласьков Н.Н.** Трещинообразование и характер разрушения бетонных консолей с арматурой из стеклопластика и металла. – №2(35). – С.84–91.