

РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО 3(48)/2021

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ.....	5
Королев Е.В., Гришина А.Н., Айзенштадт А.М., Данилов А.М. BIG DATA И ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ	5
Королев Е.В., Гришина А.Н., Айзенштадт А.М. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ КАК ПОЛИДИСПЕРСНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭФФЕКТИВНЫЕ МОДЕЛИ.....	16
Лунегова А.А., Болотин А.В., Вдовин В.И. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЕГО-КИРПИЧА В ИНДИВИДУАЛЬНОМ ЖИЛИЩНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ	26
Тацки Л.Н., Ильина Л.В., Шоева Т.Е. ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КИРПИЧА В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ.....	32
Максимова И.Н., Ерофеева И.В., Афонин В.В., Емельянов Д.В., Ахмедов А.М., Матьякубов Х.Б. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ	45
Макридин Н.И., Максимова И.Н. СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗЫ КЕРАМЗИТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ.....	53
Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ В УПРАВЛЕНИИ СВОЙСТВАМИ МАТЕРИАЛОВ	63
Логанина В.И., Учасева Т.В., Зайцева М.В. ОЦЕНКА ЗАТРАТ НА ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ.....	69
Логанина В.И., Куимова Е.И., Зайцева М.В., Галкина Д.К. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ С УЧЕТОМ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЫРЬЯ	74

Зайцева М.В. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ ОТДЕЛОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ	78
Черкасов В.Д., Тюрин М.В. ВЛИЯНИЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ НА ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПВА	82
Тараканов О.В., Белякова Е.А., Кагина А.А. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД В БЕТОНАХ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ	87
Будылина Е.А., Данилов А.М., Фокин Г.А. ИННОВАЦИОННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СМЕНА ПАРАДИГМ, ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	97
Будылина Е.А., Гарькина И.А. МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В КОНСТРУИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ	106
Коровкин М.О., Короткова А.А., Ерошкина Н.А. ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПЛЕКСНОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКИ В МЕЛКОЗЕРНИСТОМ САМОУПЛОТНЯЮЩЕМся БЕТОНЕ.....	114
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ	123
Снежкина О.В. ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С МАЛЫМ И СРЕДНИМ ПРОЛОТОМ СРЕЗА	123
Волков В.П., Гарькин И.Н. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УЗЛА СТЫКА СВАИ СЕРИИ 1.011.1-10 «СВАИ ЗАБИВНЫЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ».....	129
Аль-Хаснави Яссер Сами Гариб, Ефимов О.И., Замалиев Ф.С., Ласьков Н.Н. К ВОПРОСУ О ПРОЕКТИРОВАНИИ БАЛКИ ИЗ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА С ЖЕСТКОЙ АРМАТУРОЙ.....	137
Гучкин И.С., Ласьков Н.Н. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ КОЛОНН ДЛЯ МНОГОЭТАЖНОГО КАРКАСНОГО ЖИЛОГО ДОМА	144
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ.....	150
Еремкин А.И., Пономарева И.К., Петрова К.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ ОТ ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И СОХРАННОСТЬ УБРАНСТВА В ЗАЛАХ БОГОСЛУЖЕНИЯ ЦЕРКВЕЙ, ХРАМОВ, СОБОРОВ.....	150
Усачев А.П., Шурайц А.Л., Хомутов А.О., Пикалов А.А. ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ И ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ГРУБОЙ И ТОНКОЙ ГАЗОВОЙ ОЧИСТКИ В ОДНОМ КОРПУСЕ	158
Андреев С.Ю., Лебединский К.В., Андреев В.С. НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ ЗА СЧЕТ УМЕНЬШЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ АППАРАТОВ	167
Андреев С.Ю., Сафронов М.А., Ласьков Н.Н., Яхкинд М.И. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВСПЛЫВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВ В ДИНАМИЧЕСКИХ ВОДОВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРОЦЕССАХ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД.....	176
АРХИТЕКТУРА.....	186
Береговой А.М., Береговой В.А., Снежкина О.В..... ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПОМЕЩЕНИЙ	186

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	Cherkasov V.D., Tyurin M.V. EFFECTS OF EPOXY RESIN ON THE DAMPING PROPERTIES OF A PVA-BASED MATERIAL.....	82	Usachev A.P., Shuraitis A.L., Khomutov A.O., Pikalov A.A. GAS DYNAMIC AND THERMAL EFFICIENCY OF APPLICATION OF FILTER ELEMENTS OF COARSE AND FINE GAS CLEANING IN A SINGLE BODY	158	Andreev S.Yu., Safronov M.A., Laskov N.N., Yakhkind M.I. MATHEMATICAL MODELING OF THE REGULARITIES OF BUBBLE POPPING IN DYNAMIC WATER-AIR MIXTURES USED IN FLOTATION WASTEWATER TREATMENT PROCESSES	176
Korolev E.V., Grishina A.N., Aizenshtadt A.M., Danilov A.M. BIG DATA AND MATERIAL STRUCTURE PARAMETERS	5	Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Kagina A.A. PROSPECTS OF CARBONATE ROCKS APPLICATION IN NEW GENERATION CONCRETE	87	Andreev S.Yu., Lebedinskiy K.V., Andreev V.S. NEW TECHNOLOGY FOR INTENSIFYING THE PROCESS OF SEPARATION OF GAS MIXTURES IN A CENTRIFUGAL FIELD BY REDUCING THE SIZE OF CENTRIFUGAL APPARATUSES.....	167	ARCHITECTURE	186
Korolev E.V., Grishina A.N., Aizenshtadt A.M. COMPOSITE MATERIALS AS POLYDISPERSE SYSTEMS. EFFICIENT MODELS	16	Budylna E.A., Danilov A.M., Fokin G.A. INNOVATIVE DESIGN, CHANGE OF PARADIGMS, TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF BUILDING MATERIALS.....	97	Beregovoy A.M., Beregovoy V.A., Snezhkina O.V. HEAT-ACCUMULATING STRUCTURES AND THERMAL REGIME OF INTERIOR SPACE.....	186		
Lunegova A.A., Bolotin A.V., Vdovin V.I. PROSPECTS OF LEGO BRICKS USE IN INDIVIDUAL HOUSING CONSTRUCTION.....	26	Budylna E.A., Garkina I.A. INTERDISCIPLINARY RESEARCH IN DESIGN OF COMPLEX SYSTEMS.....	106				
Tatski L.N., Ilina L.V., Shoeva T.E. SUBSTANCE AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF CLAY RAW MATERIAL FOR BRICK PRODUCTION IN WESTERN SIBERIA	32	Korovkin M.O., Korotkova A.A., Eroshkina N.A. THE EFFICIENCY OF COMPLEX MINERAL ADDITIVE IN FINE-GRAINED SELF-COMPACTING CONCRETE.....	114				
Maksimova I.N., Erofeeva I.V., Afonin V.V., Yemelyanov D.V., Ahmedov A.M., Matyakubov H.B. STATISTICAL QUALITY ASSESSMENT OF CEMENT COMPOSITES	45	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS	123				
Makridin N.I., Maksimova I.N. COMPOSITION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE CRYSTALLINE PHASE OF EXPANDED CLAY AGGREGATE	53	Snezhkina O.V. CRACKING RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH SMALL AND MEDIUM SPAN	123				
Garkina I.A., Danilov A.M., Korolev E.V. SYSTEM ANALYSIS IN CONTROL PROPERTIES OF MATERIALS	63	Volkov V.P., Garkin I.N. STRESS-DEFORMED STATE OF JOINT NODE OF SERIES 1.011.1-10 «DRIVEN REINFORCED PILES» PILES	129				
Loganina V.I., Uchaeva T.V., Zaitseva M.V. ESTIMATING THE COST FOR QUALITY IMPROVING IN DRY BUILDING MIXTURES PRODUCTION.....	69	Al-Chasnavi Yaser Sami Garib, Efimov O.I., Zamaliev F.S., Laskov N.N. ON THE DESIGN OF AERATED CONCRETE BEAMS WITH RIGID REINFORCEMENT.....	137				
Loganina V.I., Kuimova E.I., Zaitseva M.V., Galkina D.K. ASSESSMENT OF DRY BUILDING MIXTURES QUALITY TAKING INTO ACCOUNT THE VARIABILITY OF RAW MATERIALS.....	74	Guchkin I.S., Laskov N.N. COLUMNS MADE OF PIPE CONCRETE FOR A MULTI-STOREY FRAME RESIDENTIAL BUILDING	144				
Zaytseva M.V. QUALITY MANAGEMENT OF THE PROCESSES OF CEMENT CONCRETE FINISHING COATINGS PRODUCTION.....	78	ENGINEERING SYSTEMS	150				
		Eremkin A.I., Ponomareva I.K., Petrova K.A. RESEARCH OF THE INFLUENCE OF CONVECTIVE FLOWS FROM HEATING DEVICES ON CLIMATIC CONDITIONS AND PRESERVATION OF DECORATION IN CHURCHES, TEMPLES AND CATHEDRALS.....	150				

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691-4: 51-74: 519.6

Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет
Россия, 190005, Санкт-Петербург,
2-я Красноармейская ул., д. 4

Королев Евгений Валерьевич,
доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе
E-mail: prorector_nr@spbgasu.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

Гришина Анна Николаевна,
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник НОЦ «Наноматериалы
и нанотехнологии», доцент кафедры
«Строительные материалы
и материаловедение»
E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru

Северный (Арктический) федеральный
университет имени М.В. Ломоносова
163002, Россия, г. Архангельск,
наб. Северной Двины, 17,
тел.: +7(8182) 41 28 34

Айзенштадт Аркадий Михайлович,
доктор химических наук, профессор,
зав. кафедрой «Композиционные
материалы и строительная экология»
E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru

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

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

Saint Petersburg State University of
Architecture and Civil Engineering
Russia, 190005, St. Petersburg,
4, 2nd Krasnoarmeyskaya St.

Korolev Evgenij Valerievich,
Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector for
scientific work
E-mail: prorector_nr@spbgasu.ru

National Research Moscow State University of
Civil Engineering

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

Grishina Anna Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Senior Researcher of
Scientific and Educational Center
«Nanomaterials and Nanotechnology»,
Associate Professor of the department
«Constriction materials and Materials Science»
E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru

Northern (Arctic) Federal University named
after M.V. Lomonosov
163002, Russia, Severnaya Dvina Emb.,
17, Arkhangelsk,
tel.: +7(8182) 41 28 34

Ayzenshtadt Arkady Mikhaylovich,
Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Head of the department «Composite Materials
and Construction Ecology»
E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru

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

Danilov Aleksander Maksimovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Mathematics and Mathematical
Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

BIG DATA И ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ*

Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Айзенштадт, А.М. Данилов

Представлен методический подход к определению структурных уровней и параметров структуры строительных материалов, анализ которых с применением методов нового синтетического направления – анализа данных (big data) – позволит расширить знания о материалах, уточнить современные представления об их структурообразовании, определить области исследований, неизвестных ранее, выявить технологические решения, не нашедшие практического применения, но имеющие потенциал для развития, наиболее часто реализуемые технологические решения и т.д. Реализация указанного подхода позволит получать качественные данные, что создаст условия для количественных обобщений и развития теорий структурообразования различных строительных материалов.

Ключевые слова: структурообразование, параметры структуры, полиструктурная теория, теория искусственных строительных конгломератов, анализ больших данных

BIG DATA AND MATERIAL STRUCTURE PARAMETERS*

E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenshtadt, A.M. Danilov

The article presents a methodological approach to determining structural levels and parameters of the structure of building materials, the analysis of which using the methods of a new synthetic direction – data analysis (big data) – will expand our knowledge about the materials, clarify modern ideas about their structure formation, and identify areas of research previously unknown, identify technological solutions that have not found practical application, but have a potential for development, the most frequently implemented technological solutions, etc. The implementation of this approach will allow obtaining qualitative data, which will create conditions for quantitative generalizations and the development of theories of structure formation of various building materials.

Keywords: structure formation, structure parameters, polystructural theory, theory of artificial building conglomerates, big data analysis

Введение. Развитие материаловедения будет все более сопряжено с цифровизацией как проводимых исследований и экспертизы, так и разрабатываемых и внедряемых технологий строительных материалов. Примером последнего является концепция цифрового производства [1]. Безусловно, цифровизация вносит все большие изменения в различные сферы экономики и для строительного материаловедения можно ожидать, что она будет влиять не только на производственные процессы, но и на обоснование выбора и проектирование материалов, предназначенных для изготовления изделий и строительных конструкций.

В данной статье нас будут интересовать дополнительные возможности цифровизации, связанные с расширением знаний о материалах, уточнение современных представлений об их структурообразовании; определение областей исследований, неизвестных ранее; выявление технологических решений, не нашедших практического применения, но имеющих потенциал для развития; наиболее часто реализуемые технологические решения и т.д. Некоторые представления об указанном изложены в работе [2]. Авторы данной работы предполагают, что указанные дополнительные возможности помогут предоставить подходы, сформированные в новом синтетическом направлении – анализ (больших) данных.

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

Big Data. Обобщения, которые может дать анализ данных – результатов исследований, проведенных за последние десятилетия по научной специальности «Строительные материалы и изделия», неразрывно сопряжены с представлениями о структурообразовании исследуемого материала, который классифицирован по каким-либо признакам. В государственном классификаторе научно-технической информации¹ строительные материалы классифицированы следующим образом:

- нерудные и неметаллорудные строительные материалы;
- минеральные вяжущие вещества в строительстве;
- бетоны. Железобетон. Строительные растворы, смеси, составы;
- обожженные материалы и изделия в строительстве;
- стекло и другие плавные материалы в строительстве;
- металлы, используемые в строительстве, и изделия из них;
- древесина и строительные изделия из нее;
- органические материалы и строительные изделия на их основе;
- строительные материалы и изделия на основе полимеров;
- строительные химикаты;
- лакокрасочные материалы, клеи и мастики в строительстве;
- композиционные материалы;
- отходы производства и их использование.

Представленная классификация отражает этапы развития строительного материаловедения и содержит наименования не только строительных материалов, полученных на основе различных групп вяжущих, но и обобщенных групп материалов или их компонентов. Необходимо отметить, что в паспорте национального проекта «Наука»² к приоритетной области научно-технологического развития³ отнесена категория Международной патентной классификации C04B «Известь; магнезия; шлак; цементы; их составы, например строительные растворы, бетон или аналогичные строительные материалы; искусственные камни; керамика; огнеупоры, обработка природного камня», которая четко соотносится со строительным материаловедением.

Для анализа данных о структурообразовании выбранного материала указанная и аналогичные классификации не предназначены. Они удобны в иерархических классификациях данных для первичного разделения материалов. Для выявления новых знаний или совершенствования существующих теорий существенным потенциалом обладает подход, который в зарубежной литературе получил наименование «Big Data», или научный анализ данных. Главные преимущества, которые предоставляет такой анализ, заключаются [3-5]:

- в обнаружении скрытых тенденций в больших наборах данных;
- в осуществлении прогноза на основе выявленных тенденций.

Кроме того, применительно к строительному материаловедению использование научного анализа данных позволит повысить качество разрабатываемых технологических решений, точность и обоснованность выводов, а также выявить аномалии, требующие привлечения дополнительных методов, отличающихся от традиционных, принятых в строительном материаловедении, способов интерпретации результатов исследования.

Анализ данных может включать следующие типы [4]:

- *описательный анализ* (применительно к строительному материаловедению в описательном анализе устанавливается наблюдаемый эффект или факт; отвечает на вопрос: что произошло?);
- *диагностический анализ* (определение причин возникновения эффекта или факта; отвечает на вопрос: почему это произошло?);

¹ База данных ГРНТИ (<https://extech.ru/info/catalogs/grnti>).

² Паспорт национального проекта «Наука» (<http://government.ru/info/35565/>).

³ Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016г. №642 «О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» (<http://www.kremlin.ru/acts/bank/41449>).

– *прогностический анализ* (прогнозирование изменения состояния материала (например, его обобщенного критерия качества) во времени или при воздействии эксплуатационного фактора; отвечает на вопрос: что произойдет?);

– *предписывающий анализ* (определение границ варьирования рецептурно-технологических факторов или эксплуатационных факторов, обеспечивающих функционирование материала; отвечает на вопрос: что следует делать?).

Каждый вид анализа, безусловно, представляет ценность как для частных технологических решений, так и для материаловедения в целом и в общем характеризует уровень системности знаний о каждом строительном материале и о теории его структурообразования.

Из обширного арсенала методов «Big Data» [3, 4] видится, что на первом этапе широкое распространение получают следующие методы:

- метод *k*-средних;
- метод главных компонент;
- метод наивной байесовской классификации;
- метод логистической регрессии;
- метод *k*-ближайших соседей;
- регрессионный анализ.

Параметры структуры. Для проведения анализа необходимо не только наличие данных, но и возможность их использования для анализа. Это означает, что должна быть собрана информация (сформированы массивы данных), которая позволяла бы осуществлять оценку процесса структурообразования с учетом иерархичности материала. Полаком А.Ф. и др. [6] предложены структурно-геометрические признаки для классификации дисперсных систем, к которым относятся строительные материалы композиционной или композитной структуры. Причем авторы [6] считают, что классификация структурно-геометрических признаков на основе модели дисперсной системы является оптимальной. В соответствии с предложенной классификацией выделяются следующие структурно-геометрические признаки:

- 1) форма частиц: изометрическая (шарообразная) и изометрическая (пластинчатая или игольчатая);
- 2) размер частиц: грубо-, тонкодисперсные, коллоидные и надмолекулярные системы, а по распределению частиц по размерам – моно- и полидисперсные системы;
- 3) ориентация частиц: изотропные, ортотропные и анизотропные;
- 4) объемная доля твердой фазы: сильноразбавленные, рыхлые, плотные и очень плотные;
- 5) агрегатное состояние: 1-го рода (частицы не связаны силами), 2-го рода (частицы образуют агрегаты) и 3-го рода (частицы образуют флоккулы);
- 6) изменчивость во времени: стационарные и развивающиеся.

Эту классификацию можно дополнить параметрами структуры, определяемыми в [7]¹, а именно:

- коэффициент, характеризующий вид функции распределения частиц по объему;
- коэффициент неравноосности частиц;
- толщина перегородок между порами.

Для развития науки необходимо установление однозначно трактуемых терминов и определений. В данной работе указанное относится к понятию «параметр структуры». Базовым определением, естественно, является понятие структуры. Адаптированное к строительному материаловедению определение структуры дано в [8], где структура представляется как «совокупность структурных элементов и связей материала, обеспечивающих сохранение или определенный характер изменения основных его свойств при внешних воздействиях и внутренних превращениях». В этом и других определениях структуры [9–11] указываются два ключевых понятия – строение и связь. Первое из них указывает на взаимное расположение структурных элементов [11], а второе – на наличие

¹ Указанный нормативный документ не действует. При этом важно отметить, что современные методы исследования, такие, как рентгеновская томография и средства обработки изображения, позволяют существенно повысить качество получаемой информации о структуре материала.

связей, обеспечивающих сохранение основных свойств при внешних и внутренних воздействиях [9]. Отсюда можно предположить следующее определение: *параметр¹ структуры материала* – физическая величина², обеспечивающая идентификацию расположения структурных элементов и/или количественную оценку его влияния на свойства материала. Очевидно, что к параметрам структуры относятся геометрические характеристики³ (размер, форма и ориентация структурного элемента), а также характеристики, демонстрирующие синергетический эффект [12, 13] от изменения геометрических характеристик структурного элемента. Параметры структуры должны соответствовать следующим основным требованиям:

1) четко идентифицироваться и иметь высокую частоту выявления, то есть структурный элемент должен являться массовым объектом для рассматриваемого структурного уровня;

2) определяться прямыми экспериментальными методами или косвенными методами на основе экспериментальных данных.

Кроме того, формирование перечня параметров структуры необходимо проводить с учетом структурного уровня материала и его состояния в рассматриваемый момент времени. Целесообразно выделить три состояния материала:

1) состояние смеси;

2) состояние структуры материала после завершения начального периода структурообразования, то есть после завершения твердения;

3) состояние структуры материала в период эксплуатации, то есть в период воздействия эксплуатационных факторов.

Каждое состояние характеризуется как общими, так и специфическими параметрами структуры. Последнее характерно в основном для первого и второго состояний, а для второго и третьего состояний перечень параметров структуры во многом будет аналогичен. Анализ количественного и качественного изменения параметров структуры позволит не только выявить эволюционирующие объекты структуры, но и идентифицировать их с физическими величинами, описывающими процесс деструкции (например, энергия активации и константа активационного объема в уравнении долговечности С.Н. Журкова [14] или изменение энергии поверхности материала при механосинтезе дисперсных систем [15, 16]). Предположительно, это улучшит не только качество проектирования материалов с заданными свойствами и сроком службы, но и позволит начать разрабатывать теорию самовосстановления строительных материалов.

Очевидно, что установление параметров структуры в состоянии смеси требует специфических методов определения (см., например, [17, 18]) и условий проведения, что часто заменяется на усредненные расчетные значения. Значительный объем информации по параметрам структуры смеси можно восстановить по параметрам структуры материала в начальный период: очевидно, что отклонения в геометрических характеристиках будут связаны с объемными изменениями при твердении матричного материала. Поэтому при отсутствии специальных задач исследования смеси рационально представление рассчитанных средних значений параметров структуры.

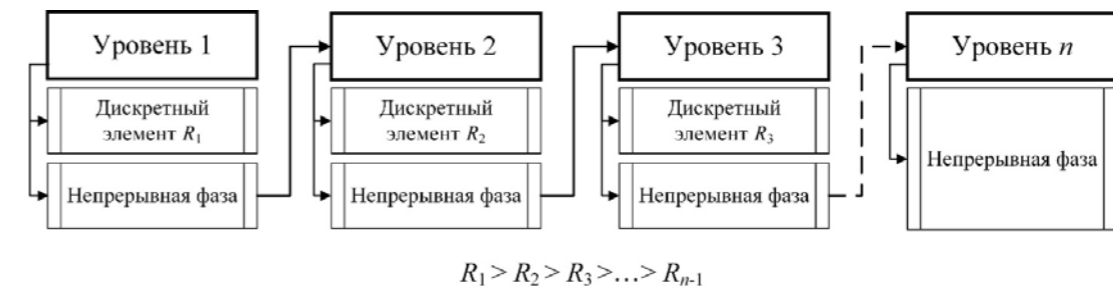
Структурные уровни. Выделение структурных уровней является важной процедурой для кластеризации строительных материалов с идентичными параметрами структуры. В данном случае количество структурных уровней является дополнительным классификационным признаком, который четко сопряжен с размерами элементов структуры. Рационально выделять дисперсную фазу (дискретный элемент структуры) и дисперсионную среду (непрерывный элемент структуры). Под дискретным элементом понимается элемент структуры, визуально имеющий четко

¹ Параметр в технике, величина, характеризующая какое-либо свойство процесса, явления, системы, технического устройства [10].

² Физическая величина, свойство, общее в качественном отношении многим физическим объектам (физическими системам, их состояниям и происходящим в них процессам), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта [10].

³ Характеристика в технике, взаимосвязь между зависимыми и независимыми переменными, определяющими состояние технического объекта (процесса, прибора, устройства, машины, системы) [10].

выраженную замкнутую по контуру границу раздела. Очевидно, что такие элементы структуры можно выделить на каждом структурном уровне материала независимо от его состояния. Структурный уровень, для которого такая классификация не может быть проведена или нерациональна, можно принять как предельный уровень, представленный только непрерывной фазой (см. рисунок). Такой подход позволяет разрешить дилемму о количестве структурных уровней, предлагаемых в полиструктурной теории [19] и теории искусственных строительных конгломератов [20]. При этом очевидно, что избыточное выделение структурных уровней увеличит трудозатраты на их определение и на данном уровне строительного материаловедения не повысит объем значимой для анализа информации (данных).



Последовательность выявления структурных уровней

На рисунке представлен алгоритм определения структурных уровней, который заключается в последовательной (в соответствии с масштабом) классификации непрерывной фазы предыдущего структурного уровня. Для каждого дискретного элемента структуры определяются геометрические характеристики, а для непрерывной фазы – толщины слоев непрерывной фазы, разделяющих дискретные элементы. Для строительных материалов дискретными элементами являются частицы дисперсных материалов (заполнители, волокна) и воздушные включения. Исчерпывающим является перечень *геометрических характеристик* (с учетом классификации [6]), представленный в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Геометрические характеристики дискретных элементов и непрерывной фазы

Характеристика	Классификация	Параметр структуры
Дискретный элемент		
Форма	– изометрическая (шарообразная); – изометрическая (пластинчатая, игольчатая или цилиндрическая)	Коэффициент неравноосности рассматриваемого вида дискретного элемента
Размер	– грубодисперсные (более 5 мм); – мелкодисперсные (от 0,15 до 5 мм); – тонкодисперсные (от 10 мкм до 0,15 мкм); – коллоидные и надмолекулярные (менее 1 мкм)	Средний размер или средние размеры с учетом формы и распределения по размерам рассматриваемого вида дискретного элемента
Ориентация в пространстве	– изотропные; – ортотропные; – анизотропные	Коэффициент направленности рассматриваемого вида дискретного элемента
Непрерывная фаза		
Толщина слоя непрерывной фазы	–	Средняя толщина слоя непрерывной фазы между дискретными элементами рассматриваемого вида

Важным параметром структуры, являющимся сопряженным с геометрическими характеристиками дискретных элементов и непрерывной фазы, является *объемная концентрация* указанных элементов структуры.

Предельный уровень структуры. Как уже отмечалось, этот уровень имеет особенность, заключающуюся в отсутствии возможности или целесообразности выделения преобладающего (массового) дискретного элемента и непрерывной фазы. Это вносит определенные сложности в установление параметров структуры, элементы которой по причине высокой дисперсности наиболее активно участвуют в физико-химических процессах взаимодействия с окружающей средой и эксплуатационными факторами. При исключении геометрических характеристик из приоритетных признаков для классификации параметрами структуры главным образом будут объемные концентрации структурных элементов. Так, для материалов (матриц), имеющих аморфно-кристаллическую структуру [21, 22], параметрами структуры будут являться: относительное содержание аморфной (рентгеноаморфной) фазы и относительные содержания кристаллической фазы с дополнительным выделением относительного содержания отдельных минералов. При наличии пор их содержание и размер также включаются в перечень параметров структуры. Также целесообразно ввести параметр, позволяющий проводить оценку степени совершенства кристаллов, сформированных или преобразующихся в процесс структурообразования. Такой характеристикой является параметр порядка, вычисление которого проводится по данным рентгенофазового анализа:

$$P_{or} = (1 - \delta_a) Me_{(\rho_d I)},$$

где δ_a – относительное содержание рентгеноаморфной фазы; $Me_{(\rho_d I)}$ – медиана значений произведения $\rho_d I$; ρ_d – плотность дислокаций, рассчитанная по формуле Селякова – Шеррера; I – относительная интенсивность дифракционной линии.

Очевидно, что для других видов матричных материалов должны быть разработаны аналогичные по содержанию параметры структуры.

Дополнительные параметры структуры. Из предложенного определения следует, что параметрами структуры являются не только геометрические характеристики и сопряженные с ними объемные концентрации структурных элементов, но и характеристики, демонстрирующие степень влияния вида и концентрации связей на структуру материала (в [6] структурно-геометрический признак, получивший название «агрегатное состояние»). Естественно, что при взаимодействии компонентов материала, имеющих различные физические и/или химические свойства, часто в контактной зоне происходят изменения, приводящие к формированию градиентного слоя вещества со свойствами, отличающимися от свойств этого вещества в объеме. Общее решение для веществ, взаимодействие которых описывается силами Ван-дер-Ваальса, было предложено в [23], а для полимерных композиционных материалов такой объем матрицы получил наименование «пленочной» фазы [24]. Очевидно, что пленочная фаза имеет как некоторую толщину, так и свойства, позволяющие в определенном диапазоне ее содержания повышать эксплуатационные свойства композиционных (композитных) материалов. Оценку влияния формирования пленочной фазы на качество структуры можно провести по коэффициенту k_m , который демонстрирует превышение прочности вяжущего, находящегося в пленочном состоянии $\sigma_{m,p}$, над его нормальной прочностью σ_m :

$$k_m = \frac{\sigma_{m,p}}{\sigma_m}.$$

Рассчитать k_m можно по методике, представленной в [25]. Для нахождения аналогичной характеристики – толщины слоя адсорбированного вяжущего – при нахождении материала в состоянии смеси можно использовать методику, указанную в [17].

Одновременно с повышением свойств могут протекать процессы образования дефектов, которые при воздействии эксплуатационных факторов определенной интенсивности могут развиваться с образованием и ростом трещин. В [26–28] показано, что прочность материала изменяется по степенному закону от концентрации дефектов:

$$R = R_0 (1 - v_p)^t,$$

а показатель степени характеризует фрактальную природу системы трещин:

$$t = \frac{2}{3 - D_H},$$

где R_0 – прочность бездефектного материала; v_p – объемная концентрация дефектов; D_H – фрактальная размерность системы трещин.

Определить параметры R_0 и D_H можно по методике, представленной в [28].

Безусловно, представленные параметры структуры материала не являются исчерпывающими и в зависимости от вида строительного материала могут быть предложены и обоснованы другие параметры структуры, характеризующие вид и концентрацию связей в материале.

Представленные параметры структуры содержат важные дополнительные сведения о процессе структурообразования и могут быть избирательно установлены к материалу, находящемуся в одном из предложенных состояний. Для состояния смеси таким дополнительным параметром структуры является толщина слоя адсорбированного вяжущего, для состояния материала после начального периода структурообразования параметрами структуры являются k_m , R_0 и D_H , а для состояния материала в эксплуатационный период структурообразования – только R_0 и D_H .

Обобщенные сведения о параметрах структуры сведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Обобщенная матрица параметров структуры материала

		Состояние материала		
		Состояние смеси	Состояние после начального периода структурообразования	Состояние эксплуатационного периода структурообразования
Структурный уровень	1	ГХ* ОД* ДП ₁	ГХ ОД ДП ₂	ГХ ОД ДП ₃
	2	ГХ* ОД*	ГХ ОД	ГХ ОД
	3	ГХ* ОД*	ГХ ОД	ГХ ОД

	n	–	СФ P_{or}	СФ P_{or}

ГХ – геометрические характеристики; ОД – объемные концентрации (доли); ДП_i – дополнительные параметры; СФ – относительное содержание фаз; P_{or} – параметр порядка; * – определяются расчетом.

Очевидно, в зависимости от состояния, в котором находится материал, последовательность определения параметров структуры будет различной. Для состояния смеси и после начального структурообразования она будет выстраиваться по траектории «снизу вверх», так как это этап разработки материала с заданными свойствами (разработка технологического решения), а для состояния материала в эксплуатационный период структурообразования – по траектории «сверху вниз».

Реализация представленного методического подхода, по мнению авторов, позволит решить сформулированные целевые задачи развития строительного материаловедения и создать условия для количественных обобщений и развития теорий структурообразования различных строительных материалов.

Список литературы

1. Уэнглер, Т. Бетон в цифровом производстве: возможности и вызовы / Т. Уэнглер, Э. Льоре, Л. Райтер, Н. Хак, Ф. Грамацио, М. Колер, М. Бернхард, Б. Дилленбургер, Й. Бухли, Н. Руссель, Р. Флатт // Цемент и его применение. – 2019. – №2. – С. 80–87.
2. Van Damme, H. Cement and Concrete Research / H. Van Damme. – 2018 – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.002>.
3. Ён, Анналин. Теоретический минимум по Big Data. Все, что нужно знать о больших данных / Анналин Ён, Кеннет Су. – СПб.: Питер, 2021. – 208 с.
4. Еременко, К. Работа с данными в любой сфере. Как выйти на новый уровень, используя аналитику / К. Еременко. – М.: Альпина Паблишер, 2019. – 304 с.
5. Стивенс-Давидовиц, С. Все лгут. Поисквики, Big Data и Интернет знают о вас все / С. Стивенс-Давидовиц. – М.: Эксмо, 2018. – 384 с.
6. Полак, А.Ф. Твердение минеральных вяжущих веществ / А.Ф. Полак, В.В. Бабков, Е.П. Андреева. – Уфа: Башк. кн. изд-во, 1990. – 216 с.
7. ГОСТ 22023–76. Метод микроскопического количественного анализа структуры. – М.: Издательство стандартов, 1979. – 10 с.
8. Евтушенко, Е.И. Активационные процессы в технологии строительных материалов / Е.И. Евтушенко. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2003. – 209 с.
9. Современный энциклопедический словарь. – М.: Изд-во «Большая Российская Энциклопедия», 1997. – 576 с.
10. Большая советская энциклопедия: в 30 т. – 3-е изд. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1969–1986.
11. Новый иллюстрированный энциклопедический словарь. – М.: Большая Российская энциклопедия, 2005. – 912 с.
12. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // Academia. Архитектура и строительство. – 2020. – № 3. – С. 143–159.
13. Вешнякова, Л.А. Поверхностная активность кремнесодержащих горных пород / Л.А. Вешнякова, Т.А. Дроздук, А.М. Айзенштадт, М.А. Фролова, А.С. Тутыгин // Материаловедение. – 2016. – №5. – С. 45–48.
14. Бартенев, Г.М. Физика и механика полимеров / Г.М. Бартенев, Ю.В. Зеленев. – М.: Высшая школа, 1983. – 391 с.
15. Данилов, В.Е. Особенности расчета свободной энергии поверхности на основе модели межфазного взаимодействия Оунса–Вендта–Рабея–Кьельбле / В.Е. Данилов, Е.В. Королев, А.М. Айзенштадт, В.В. Строкова // Строительные материалы. – 2019. – № 11. – С. 66–72.
16. Данилов, В.Е. Изменение поверхностной энергии – критерий оптимизации состава бесцементного композиционного вяжущего / В.Е. Данилов, А.М. Айзенштадт, М.А. Фролова, А.С. Тутыгин // Материаловедение. – 2018. – №2. – С. 39–44.
17. Иноземцев, С.С. Исследование адсорбционно-сольватного слоя битума на поверхности минерального порошка / С.С. Иноземцев, М.К. Поздняков, Е.В. Королев // Вестник МГСУ. – 2012. – №11. – С. 159–167.
18. Айзенштадт, А.М. Возможный подход к оценке дисперсионного взаимодействия в порошковых системах / А.М. Айзенштадт, Е.В. Королев, Т.А. Дроздук, В.Е. Данилов, М.А. Фролова // Физика и химия обработки материалов. – 2021. – №3. – С. 40–48.
19. Соломатов, В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов // Известия вузов. Строительство. – 1985. – №8. – С. 58–64.

20. Рыбьев, И.А. Строительное материаловедение / И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 2004. – 701 с.
21. Строкова, В.В. Управление процессами синтеза строительных материалов с учетом типоморфизма сырья / В.В. Строкова // Строительные материалы. – 2004. – № 9. Приложение «Строительные материалы: наука». – № 4. – С. 2–5.
22. Строкова, В.В. К эффективности использования типоморфных признаков при выборе сырья стройиндустрии / В.В. Строкова // Вестник отделения строительных наук РААСН. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2005. – № 9. – С. 379–383.
23. Русанов, А.И. Фазовые равновесия и поверхностные явления / А.И. Русанов. – Л.: Химия, 1967. – 388 с.
24. Бобрышев, А.Н. Синергетика композиционных материалов / А.Н. Бобрышев, В.Н. Козомазов, Л.О. Бабин, В.И. Соломатов. – Липецк: НПО Ориус, 1994. – 151 с.
25. Гришина, А.Н. Прочность жидкостекольных композитов, отвержденных ферроборовым шлаком / А.Н. Гришина, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2012. – №6. – С. 68–70.
26. Гусев, Б.В. Модели полидисперсных систем: критерии оценки и анализ показателей эффективности / Б.В. Гусев, Е.В. Королев, А.Н. Гришина // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 8. – С. 31–39.
27. Королев, Е.В. Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Айзенштадт // Строительные материалы. – 2020. – № 9. – С. 54–61.
28. Королев, Е.В. Фрактальная размерность как универсальная характеристика параметров структуры и прочности материала / Е.В. Королев, А.Н. Гришина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 1 (42). – С. 5–15.

References

1. Wengler, T. Concrete in digital production: opportunities and challenges / T. Wengler, E. Lloret, L. Reiter, N. Hack, F. Gramazio, M. Kohler, M. Bernhard, B. Dillenburger, J. Buchli, N. Roussel, R. Flatt // Cement and its application. – 2019. – № 2. – P. 80–87.
2. Van Damme, H. Cement and Concrete Research / H. Van Damme. – 2018 – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.002>.
3. Eun, Annalin. Theoretical minimum on Big Data. Everything you need to know about big data / Annalin Eun, Kenneth Su. – SPb.: Peter, 2021. – 208 p.
4. Eremenko, K. Working with data in any area. How to reach a new level using analytics / K. Eremenko. – M.: Alpina Publisher, 2019. – 304 p.
5. Stevens-Davidowitz, S. Everybody lies. Search engines, Big Data and the Internet know everything about you / S. Stevens-Davidowitz. – M.: Eksmo, 2018. – 384 p.
6. Polak, A.F. Hardening of mineral binders / A.F. Polak, V.V. Babkov, E.P. Andreeva. – Ufa: Bashk. book publishing house, 1990. – 216 p.
7. GOST 22023–76. Method of microscopic quantitative analysis of the structure. – M.: Publishing house of standards, 1979. – 10 p.
8. Evtushenko, E.I. Activation processes in building materials technology / E.I. Evtushenko. – Belgorod: Publishing house of BSTU im. V.G. Shukhova, 2003. – 209 p.
9. Modern encyclopedic dictionary. – M.: Publishing house «Great Russian Encyclopedia», 1997. – 576 p.
10. Great Soviet Encyclopedia: in 30 vol. – 3rd ed. – M.: Publishing house «Soviet Encyclopedia», 1969. – 1986.
11. New illustrated encyclopedic dictionary. – M.: Great Russian Encyclopedia, 2005. – 912 p.
12. Korolev, E.V. Prospects for the development of building materials science / E.V. Korolev // Academia. Architecture and construction. – 2020. – №3. – P. 143–159.
13. Veshnyakova, L.A. Surface activity of siliceous rocks / L.A. Veshnyakova, T.A. Drozdruk, A.M. Aizenshtadt, M.A. Frolova, A.S. Tutygin // Materials Science. – 2016. – No. 5. – P. 45–48.

14. Bartenev, G.M. Physics and mechanics of polymers / G.M. Bartenev, Yu.V. Zelenev. – M: Higher school, 1983. – 391 p.
15. Danilov, V.E. Features of the calculation of the free energy of a surface on the basis of the Ouns – Wendt – Rabel – Kjelble model of interphase interaction / V.E. Danilov, E.V. Korolev, A.M. Aizenshtadt, V.V. Strokova // Stroitelnye materialy. – 2019. – № 11. – P. 66–72.
16. Danilov, V.E. Change in surface energy – a criterion for optimizing the composition of cementless composite binder / V.E. Danilov, A.M. Aizenshtadt, M.A. Frolova, A.S. Tutygin // Materials Science. – 2018. – № 2. – P. 39–44.
17. Inozemtsev, S.S. Investigation of the adsorption-solvation layer of bitumen on the surface of a mineral powder / S.S., Inozemtsev M.K. Pozdnyakov, E.V. Korolev // Vestnik MGSU. – 2012. – №11. – P. 159–167.
18. Aizenshtadt, A.M. Possible Approach to Estimation of Dispersion Interaction in Powder Systems / A.M. Aizenshtadt, E.V. Korolev, T.A. Drozdyuk, V.E. Danilov, M.A. Frolova // Physics and Chemistry of Material Processing. – 2021. – №3. – P. 40–48.
19. Solomatov, V.I. Development of the polystructural theory of composite building materials / V.I. Solomatov // Izvestiya Vuzov. Construction. – 1985. – No. 8. – P. 58–64.
20. Rybiev, I.A. Building materials science / I.A. Rybiev. – M.: Higher school, 2004. – 701 p.
21. Strokova, V.V. Management of the processes of synthesis of building materials taking into account the typomorphism of raw materials / V.V. Strokova // Building materials. – 2004. – No. 9. Appendix «Building materials: science». – № 4. – P. 2–5.
22. Strokova, V.V. On the efficiency of using typomorphic features when choosing raw materials for the construction industry / V.V. Strokova // Bulletin of the Department of Construction Sciences RAASN. – Belgorod: BSTU Publishing House, 2005. – № 9. – P. 379–383.
23. Rusanov, A.I. Phase equilibria and surface phenomena / A.I. Rusanov. – L.: Chemistry, 1967. – 388 p.
24. Bobryshev, A.N. Synergetics of composite materials / A.N. Bobryshev, V.N. Kozomazov, L.O. Babin, V.I. Solomatov. – Lipetsk: NPO Orius, 1994. – 151 p
25. Grishina, A.N. Strength of liquid glass composites cured with ferrobore slag / A.N. Grishina, E.V. Korolev // Building materials. – 2012. – № 6. – P.68–70.
26. Gusev, B.V. Models of polydisperse systems: evaluation criteria and analysis of efficiency indicators / B.V. Gusev, E.V. Korolev, A.N. Grishina // Industrial and Civil Construction. – 2018. – № 8. – P. 31–9.
27. Korolev, E.V. Analysis of the structure formation of composites using fractal dimension / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenshtadt // Building materials. – 2020. – No. 9. – P. 54–1.
28. Korolev, E.V. Fractal dimension as a universal characteristic of the parameters of the structure and strength of the material / E.V. Korolev, A.N. Grishina // Regional architecture and engineering. – 2020. – № 1 (42). – P. 5–15.

УДК 691.322 : 51-74

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
Россия, 190005, Санкт-Петербург,
2-я Красноармейская ул., д. 4

Королев Евгений Валерьевич,
доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе
E-mail: prorector_nr@spbgasu.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

Гришина Анна Николаевна,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник НОЦ
«Наноматериалы и нанотехнологии»,
доцент кафедры «Строительные материалы
и материаловедение»
E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru

Северный (Арктический) федеральный
университет имени М.В. Ломоносова
163002, Россия, г. Архангельск,
наб. Северной Двины, 17,
тел.: +7(8182) 41 28 34

Айзенштадт Аркадий Михайлович,
доктор химических наук, профессор,
зав. кафедрой «Композиционные
материалы и строительная экология»
E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru

Saint Petersburg State University of
Architecture and Civil Engineering
Russia, 190005, St. Petersburg,
4, 2nd Krasnoarmeyskaya St.

Korolev Evgenij Valerievich,
Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector for
scientific work
E-mail: prorector_nr@spbgasu.ru

National Research Moscow State University of
Civil Engineering

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

Grishina Anna Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Senior Researcher of
Scientific and Educational Center
«Nanomaterials and Nanotechnology»,
Associate Professor of the department
«Constriction materials and Materials Science»
E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru

Northern (Arctic) Federal University named
after M.V. Lomonosov
163002, Russia, Severnaya Dvina Emb.,
17, Arkhangelsk,
tel.: +7(8182) 41 28 34

Ayzenshtadt Arkady Mikhaylovich,
Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Head of the Department «Composite
Materials and Construction Ecology»
E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ КАК ПОЛИДИСПЕРСНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭФФЕКТИВНЫЕ МОДЕЛИ*

Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Айзенштадт

На основе представления строительных материалов на минеральной основе полидисперсными системами с широким распределением частиц по размеру проведен анализ различных моделей полидисперсных систем и установлены модели, перспективные для разработки на их основе частных методов проектирования составов композитных строительных материалов. Рассмотрены классические модели, а также скейлинговая модель и модель фундаментальных соотношений. Анализ этих моделей проведен с применением различных параметров, в том числе учитывающих сложность достижения требуемой в соответствии с моделью конфигурации частиц. Показано, что модель Швейцарской федеральной лаборатории рационально применять для проектирования фракционного состава дисперсной фазы (смеси заполнителей) материала, скейлинговую модель – для определения начального состава полидисперсной системы, а модель фундаментальных соотношений – для ретроспективного анализа параметров структуры

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

развивающейся полидисперсной системы для определения начального состава полидисперсной системы.

Ключевые слова: полидисперсные системы, строительные материалы на минеральной основе, прочность, пористость, скейлинговая модель, модель фундаментальных соотношений, модель Фуллера

COMPOSITE MATERIALS AS POLYDISPERSE SYSTEMS. EFFICIENT MODELS

E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenshtadt

In this work, based on the representation of mineral-based building materials by polydisperse systems with a wide particle size distribution, the analysis of various models of polydisperse systems is carried out and models that are promising for the development of private methods of designing compositions of composite building materials on their basis are established. Classical models, as well as a scaling model and a model of fundamental relations are considered. A analysis of these models was carried out using various parameters, including those taking into account the complexity of achieving the particle configuration required in accordance with the model. It is shown that a model of a Swiss Federal Laboratory is rational to use for designing a fractional composition of the dispersed phase (mixture of fillers) of the material, a scaling model – to determine the initial composition of the polydisperse system, and a model of fundamental ratios – for retrospective analysis of the structure parameters of the developing polydisperse system. to determine the initial composition of the polydisperse system.

Keywords: polydisperse systems, mineral-based building materials, strength, porosity, scaling model, model of fundamental relations, Fuller's model

В общем случае дисперсно-упрочненные строительные композиты могут быть представлены моделью полидисперсной системы. В зависимости от постановки задачи такая модель может быть распространена на весь композит или его дисперсную часть.

Композиты, содержащие искусственные камни в качестве матричного материала, можно рассматривать как полидисперсную систему в целом. В работе [1] для определения площади контактов $F_0^{(к)}$ в объеме композита предложена следующая зависимость:

$$F_0^{(к)} = \frac{v_f S_p}{2}, \quad (1)$$

где v_f – объемная доля твердой фазы; S_p – площадь поверхности пор, суммарный объем которых равен: $V_p = v_p V_0$ (здесь v_p – объемная доля воздушных пор; V_0 – суммарный объем композита).

Зависимость (1) соответствует концепции прочности R композитных материалов, представленной в [2]:

$$R = R_0 (1 - v_p)^{\frac{2}{3-D_H}},$$

где R_0 – прочность бездефектного материала; v_p – объемная доля дефектов (в первом приближении в качестве дефектов рассматриваются воздушные поры); D_H – фрактальная размерность системы трещин. Эта концепция удобна для анализа и выбора модели полидисперсной системы. Поэтому исходя из естественных предположений:

1) образование и рост трещин сопряжен с разрывом связей, а следовательно, изменением площади контактов. Отсюда можно представить, что площадь трещин S_{cr} равна:

$$S_{cr} = \varepsilon_{cr} F_0^{(к)}, \quad (2)$$

где ε_{cr} – доля площади контактов, разрушенных трещинами ($\varepsilon_{cr} < 1$);

2) объемная доля твердой фазы и площадь поверхности пор S_p могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} v_f &= 1 - v_p; \\ S_p &= \frac{v_p V_0}{d_p k_g}; \end{aligned} \quad (3)$$

здесь d_p – средний диаметр пор; k_g – коэффициент, учитывающий форму пор (для сферических пор $k_g = 1/6$), отсюда площадь трещин равна:

$$S_{cr} = \varepsilon_{cr} \frac{(1 - v_p) v_p V_0}{2 d_p k_g}. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что объемная доля пор является источником трещин, но при этом в отличие от уравнения прочности максимальная площадь трещин не достигается при $v_p = 0$.

Естественно, что площадь трещин существенно возрастает при уменьшении диаметра пор:

$$\frac{dS_{cr}}{dd_p} = - \frac{\varepsilon_{cr} (1 - v_p) v_p V_0}{2 k_g d_p^2} \quad (5)$$

и достигает максимума при $v_p = 0,5$, равного:

$$S_{cr} = \frac{1}{8} \frac{\varepsilon_{cr} V_0}{d_p k_g}. \quad (6)$$

Отсюда следует условие оптимизации дисперсной системы при ее проектировании:

$$Y_m = (d_p v_p)^{-1} = \max. \quad (7)$$

Практическая важность формирования плотноупакованных систем частиц предопределила множественность различных подходов. Эффективность этих подходов будем оценивать следующими параметрами:

- пустотность (пористость) v_p ;
- площадь поверхности частиц S_f ;
- показатель конфигурации частиц S_k ;
- показатель структурной сложности S_{st} .

Показатель S_k позволяет оценить сложность достижения заданной конфигурации частиц. Очевидно, что минимальное значение S_k имеет монодисперсная система: количество вариантов различных перестановок в пространстве не влияет на характеристики системы. При переходе к полидисперсным системам вероятность достижения проектируемых характеристик возрастает при сокращении количества вариантов пространственного расположения частиц. Отсюда S_k равен:

$$S_k = k_n \ln \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^f n_i \right)!}{\prod_{i=1}^f (n_i)!} \right], \quad (8)$$

где n_i – количество частиц определенного размера; f – количество фракций частиц; k_n – константа.

Значения факториалов вычисляются по формуле Стирлинга [3]: $\ln(n!) = n \ln(n) - n$.

Показатель структурной сложности дополняет информацию, получаемую при определении S_k и рассчитывается по формуле

$$S_{st} = \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^f v(d_i)}{\prod_{i=1}^f v(d_i)} \right), \quad (9)$$

где $v(d_i)$ – объемная доля частиц с размером d_i .

Числитель формулы (9) может быть представлен также как

$$\sum_{i=1}^f v(d_i) = 1 - v_p. \quad (10)$$

Знаменатель формулы (9) уменьшается при увеличении количества фракций частиц и, соответственно, снижении количества частиц каждой фракции, так как

$$\sum_{i=1}^f v(d_i) + v_p = 1. \quad (11)$$

Естественно, что уменьшение количества частиц какой-либо фракции закономерно приводит к усложнению их распределения по объему материала.

Для расчета Y_m значение d_p определяется по формуле

$$d_p = \sum_{i=1}^f v(d_i) d_i. \quad (12)$$

Рассмотрим различные традиционные модели полидисперсных систем, к которым, в частности, относятся [4]:

- распределение, предложенное Фуллером и Андреасеном;
- распределение Швейцарской федеральной лаборатории по испытанию материалов;
- распределение Гуммеля;
- распределение, предложенное Функом и Дингером;
- модифицированное распределение Функа – Диггера [12].

Отдельно рассмотрим скейлинговую модель и модель фундаментальных соотношений (МФС) [4]. Особое внимание к указанным моделям вызвано следующими обстоятельствами. Скейлинговая модель, как и традиционные модели, позволяет проектировать полидисперсные системы, конфигурация частиц в которых базируется на масштабной инвариантности, характерной для фракталов (рис. 1).

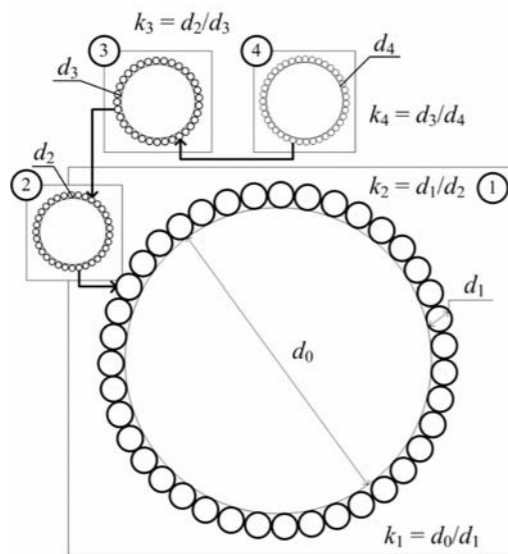


Рис. 1. Скейлинговая модель полидисперсной системы (цифрами обозначены масштабные уровни)

Расчет содержания частиц в скейлинговой модели производится по формулам:

– объемная доля частиц с максимальным диаметром d_0 :

$$v(d_0) = \eta_{\max} / \left(1 + \sum_{i=1}^m \left(2^i / \prod_{j=0}^i k_j \right) \right)^3;$$

– объемная доля частиц с диаметром $d_l < d_0$:

$$v(d_l) = \left(1 - \sum_{i=0}^{l-1} v(d_i) \right) \eta_{\max} / \left(1 + \sum_{i=l+1}^m \left(2^i / \prod_{j=0}^i k_j \right) \right)^3,$$

где η_{\max} – максимальная доля частиц с размером d_0 .

Модель фундаментальных соотношений устанавливает концентрационные соотношения между отдельными фракциями полидисперсной системы, сохраняя индифферентность относительно характерного размера частиц. Базовыми константами в указанной модели являются:

- константа гексагональной пространственной упаковки сфер одинакового диаметра $\mu = 0,7405$ [5];
- константа золотого сечения $\Phi = 1,618$ [6];
- числа Фибоначчи F_n [7];
- критические объемные концентрации частиц при формировании бесконечного кластера при 0,16 и 0,34 (далее – $\vartheta_1 = 0,16$ и $\vartheta_{II} = 0,34$) [8, 9].

Объемная доля частиц с диаметром d_0 равна:

$$v(d_0) = \mu / \Phi^{F_1} = 0,458,$$

а объемная доля частиц с диаметром частиц $d_l < d_0$ –

$$v(d_l) = 1 - v(d_0) - \vartheta_{II} F_2.$$

Объемная доля частиц с диаметром $d_l < d_1$ рассчитывается по формуле

$$v(d_l) = \mu \left(\vartheta_{II} - \sum_{i=2}^{l-1} v(d_i) \right) / \Phi^{F_{l+1}}.$$

С учетом указанных базовых констант содержание частиц каждого диаметра постоянно (рис. 2). В этом случае оптимизация (формирование плотной упаковки частиц) осуществляется рациональным выбором диаметров частиц. Объемная доля матричного материала, представленного частицами диаметром d_m , равна:

$$v(d_m) = 1 - \sum_i v(d_i) \geq \vartheta_1.$$

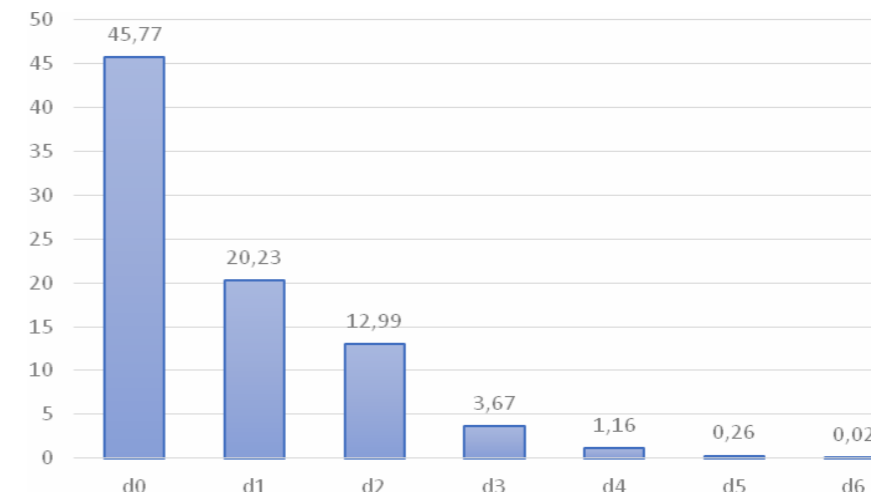


Рис. 2. Объемная доля частиц в соответствии с моделью МФС ($d_0 > d_1 > d_2 > \dots > d_6$, d_i – выбранные при проектировании диаметры частиц)

Из МФС следует, что увеличение значения числа Фибоначчи приводит к быстрому снижению объемной доли фракций $v(d_i)$: при $F_7 = 13$ объемная доля $v(d_6) = 0,02\%$, при $F_8 = 21$ объемная доля $v(d_7) = 0,00048\%$, а при $F_9 = 34$ объемная доля $v(d_8) = 0,0000009\%$, то есть уменьшение объемной доли составляет $v(d_6)/v(d_8) > 22000$.

Важным условием является также

$$v(d_1) + v(d_2) \geq \vartheta_{II},$$

так как увеличение объемных долей частиц с диаметрами d_3, d_4, \dots, d_{m-1} будет закономерно приводить только к значительному увеличению S_k .

Для расчета Y_m необходимо определить правило вычисления объемной доли пор. Для этого, исходя из физических соображений, предположим, что весь объем пор сконцентрирован в $v(d_m)$, тогда: $0 \leq v_p \leq v(d_m)$. Четким физическим обоснованием будет являться масштабный уровень, для которого пористость может быть идентифицирована. Предположим, что меньше d_{gm} пористость не определяется, тогда, используя ранее введенные константы, получим:

$$v_p = v(d_m)(1 - \mu)^{d_m/d_{gm}}. \quad (13)$$

Во всех представленных моделях формирование плотноупакованной полидисперсной системы достигается при определенной конфигурации расположения частиц, достижение которой часто возможно только при строго заданных соотношениях диаметров смежных групп частиц. Например, в модели идеального заполнения для обеспечения расположения частицы в межчастичном пространстве сфер, имеющих гексагональную упаковку, соотношения диаметров сфер должно быть:

$$d_{i+1}/d_i = 0,1547.$$

Поиск оптимальных соотношений диаметров частиц осуществляется постоянно, и для каждой дисперсной системы данное соотношение индивидуально. Однако в ряде работ предложены обобщения, которые приняты в данной работе. В частности, в работах [10, 11] показано, что формирование плотноупакованных дисперсных систем обеспечивается при использовании частиц, соотношение между диаметрами которых не менее $d_i/d_{i+1} = 8 \dots 10$.

Для определения параметров скейлинговой модели важной константой является значение η_{max} . Очевидно, что эта величина может изменяться в достаточно широком диапазоне: $\mu \leq \eta_{max} < 1$ (здесь μ – константа гексагональной пространственной упаковки сфер одинакового диаметра). При этом должны выполняться условия:

1) объемная доля $v(d_0) \leq \mu_k/q$ (здесь μ_k – константа кубической пространственной упаковки сфер одинакового диаметра ($\mu_k = 0,5236$); $q > 1$ – константа). Выполнение данного условия определяет требуемую раздвижку зерен с d_0 для расположения частиц других диаметров;

2) объемная доля частиц с диаметрами $d_3, d_4, d_5, \dots, d_m$ должна быть не меньше ϑ_{II} , то есть

$$v_{fa} = \sum_{i=3}^m v(d_i) \geq \vartheta_{II}.$$

Представленные условия должны быть учтены при анализе скейлинговой модели. Для этого введем дополнительную функцию:

$$Y_\eta = \sqrt[4]{(v_{fa} - \vartheta_{II})^2 \left(v(d_0) - \frac{\mu_k}{k} \right)^2} = \min. \quad (14)$$

Отсюда для модели рассматриваемых полидисперсных систем необходимо формулу (7) дополнить функцией Y_η , а также учесть изменение структурной сложности S_{st} . Отсюда:

$$Y_{ms} = \frac{Y_m}{Y_\eta S_{st}} = \max. \quad (15)$$

Результаты анализа рассмотренных моделей с использованием (15) представлены в табл. 2 и требуют некоторых пояснений. Эти пояснения относятся к скейлинговой модели и МФС.

Зависимость $Y_{ms} = f(\eta_{max})$ представлена на рис. 3, из которого видно, что на рассматриваемой зависимости Y_{ms} наблюдаются максимумы при $\eta_{max} = 0,80$, $\eta_{max} = 0,85$ и $\eta_{max} = 1,0$ (при значении $\eta_{max} = 1,0$ значение $Y_{ms} \rightarrow \infty$, так как $v_p = 0$; этот результат по естественным соображениям исключен из рассмотрения).

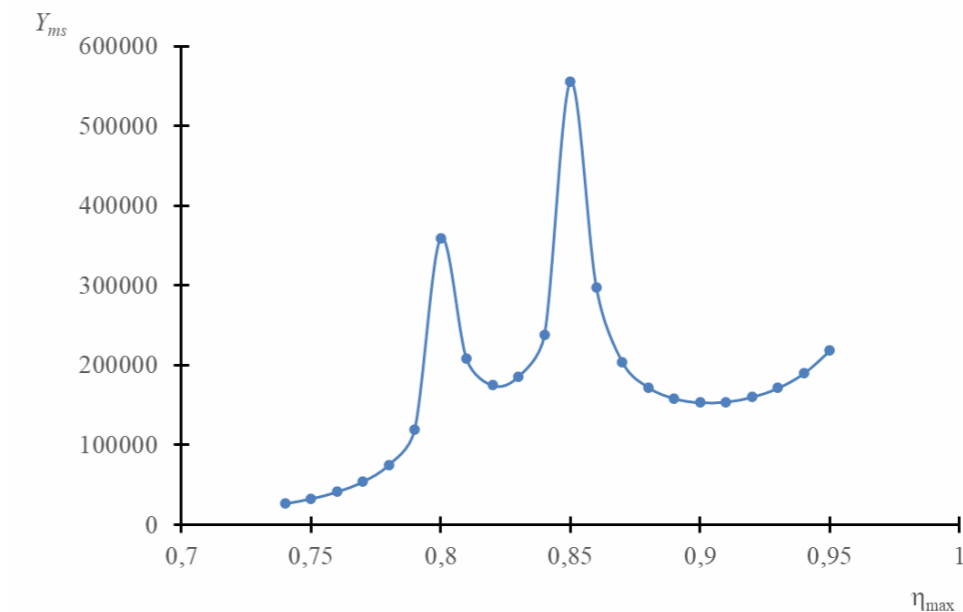


Рис. 3. Зависимость $Y_{ms} = f(\eta_{max})$ для скейлинговой модели

Для МФС определение v_p проведено по формуле (13) при различных $d_m/d_{gm} = 1 \dots 3$ (табл. 1). Из полученных данных следует очевидная закономерность: увеличение соотношения d_m/d_{gm} приводит к росту значений Y_{ms} .

Данные табл. 2 демонстрируют, что из рассмотренных моделей полидисперсных систем перспективными являются модели:

- Швейцарской федеральной лаборатории;
- скейлинговая модель.

Показатели эффективности МФС*

Наименование показателя	Соотношение d_m / d_{gm}		
	1,0	2,0	3,0
Показатель конфигурации частиц S_k	57,59	58,7	59,0
Площадь поверхности частиц S_f	71014,07	89376,3	94141,4
Пористость (пустотность) $v_p, \%$	4,13	1,07	0,28
Доля частиц с диаметром $d_0, \%$	29,87	32,93	33,72
Суммарная доля частиц с диаметрами $d_3 \dots d_m, \%$	45,77	45,77	45,77
Показатель структурной сложности S_{st}	20,25	20,05	20,01
Показатель Y_{ms}	8397,6	64156,7	486398,1

П р и м е ч а н и е . * – рассмотренный диапазон частиц: от $d_0 = 10$ мм до $d_6 = 10$ нм; соотношение $d_i / d_{i+1} = 10$.

Т а б л и ц а 2

Показатели эффективности моделей полидисперсных систем*

Наименование показателя	Вид модели полидисперсной системы							
	Фуллера	Гумеля при $n=0,45$	Швейцарской федеральной лаборатории	Андреасана	Модернизированная модель Функа – Дингера	Идеального заполнения	Скейлинговая модель**	ФМС
Показатель конфигурации частиц S_k	56,15	89,34	28,29	89,34	51,69	59,33	410,85	58,71
Площадь поверхности частиц S_f	1199,02	2006,17	606,17	2006,17	1103,80	1498,24	16508,25	89376,34
Пористость (пустотность) $v_p, \%$	0,06	0,13	0,03	0,13	8,00	0,07	0,43	1,07
Доля частиц с диаметром $d_0, \%$	36,75	33,79	48,38	33,79	33,84	63,00	43,52	45,77
Суммарная доля частиц с диаметрами $d_3 \dots d_m, \%$	19,94	23,36	11,97	23,36	18,35	13,62	31,47	32,93
Показатель структурной сложности S_{st}	23,30	21,73	26,23	21,73	23,80	23,95	17,15	20,05
Показатель Y_{ms}	167384,2	89064,4	224807,8	89064,4	1118,1	48157,8	555412,2	64156,7

П р и м е ч а н и е : * – рассмотренный диапазон частиц: от $d_0 = 10$ мм до $d_6 = 10$ нм; соотношение $d_i / d_{i+1} = 10$; ** – данные представлены для $\eta_{max} = 0,85$.

Причем скейлинговая модель может быть пригодна для проектирования при $\eta_{max} = 0,80$ и $\eta_{max} = 0,85$. Высокие показатели Y_{ms} этой модели обеспечиваются балансом значений рассмотренных показателей. Кроме того, для указанной модели характерно наименьшее значение показателя структурной сложности системы. Такая

модель полезна для проектирования начального распределения частиц полидисперсной системы. При этом особое значение приобретает изменчивость параметров структуры во времени.

Для модели Швейцарской федеральной лаборатории высокое значение Y_{ms} обеспечивается низким значением v_p . Однако для указанной модели характерно максимальное значение показателя структурной сложности S_{st} и наименьшее значение суммарной доли частиц с диаметрами $d_3 \dots d_m$. Это существенно ограничивает возможность применения указанной модели для проектирования полидисперсных систем. Но ее применение рационально при определении фракционного состава дисперсных компонентов материала.

Перспективной является МФС для анализа развивающихся полидисперсных систем (в соответствии с классификацией, предложенной в [1]), для которых начальные размеры отдельных фракций частиц могут претерпеть изменения. Для таких развивающихся систем индифферентность МФС относительно размеров позволяет разработать методику ретроспективного анализа развивающихся систем, обеспечивающего определение начального распределения частиц полидисперсной системы с учетом уровня ее преобразования.

Таким образом, проведен анализ различных моделей полидисперсных систем и установлены модели, перспективные для разработки на их основе частных методов проектирования составов композитных строительных материалов, то есть методов, учитывающих индивидуальные особенности компонентов проектируемого материала. Модель Швейцарской федеральной лаборатории рационально применять для проектирования фракционного состава дисперсной фазы материала, скейлинговую модель – для определения начального состава полидисперсной системы, а модель фундаментальных соотношений – для ретроспективного анализа параметров структуры развивающейся полидисперсной системы для определения начального состава полидисперсной системы.

Список литературы

1. Полак, А.Ф. Твердение минеральных вяжущих веществ / А.Ф. Полак, В.В. Бабков, Е.П. Андреева. – Уфа: Башк.кн.изд-во, 1990. – 216 с.
2. Королев, Е.В. Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Айзенштадт // Строительные материалы. – 2020. – № 9. – С. 54–61.
3. Ильин, В.А. Математический анализ. Продолжение курса / В.А. Ильин, В.А. Садовничий, Бл.Х. Сендов. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 358 с.
4. Гусев, Б.В. Модели полидисперсных систем: критерии оценки и анализ показателей эффективности / Б.В. Гусев, Е.В. Королев, А.Н. Гришина // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 8. – С. 31–39.
5. Придатко, Ю.М. Моделирование плотной упаковки частиц композитного материала / Ю.М. Придатко, Л.В. Королев, В.М. Готовцев // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – №4 (62). – С. 96–100.
6. Васютинский, Н.А. Золотая пропорция / Н.А. Васютинский. – М.: Молодая гвардия, 1990. – 238 с.
7. Воробьев, Н.Н. Числа Фибоначчи / Н.Н. Воробьев. – М.: Наука, 1984. – 144 с.
8. Бобрышев, А.Н. Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композиционных систем / А.Н. Бобрышев, В.Т. Ерофеев, В.Н. Козомазов. – СПб.: Наука, 2012. – 476 с.
9. Иудин, Д.И. Фракталы: от простого к сложному / Д.И. Иудин, Е.В. Копосов. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2012. – 200 с.
10. Королев, Е.В. Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы / Е.В. Королев, Ю.М. Баженов, А.И. Альбакасов. – Пенза-Оренбург: ИПК ОГУ, 2010. – 364 с.

11. Соломатов, В.И. Интенсивная технология бетонов / В.И. Соломатов, М.К. Тахиров, Шах Мд. Тахер; Совм. изд. СССР – Бангладеш. – М.: Стройиздат, 1989. – 264 с.
 12. Белов, В.В. Компьютерное моделирование и оптимизирование составов строительных композитов / В.В. Белов, И.В. Образцов. – Тверь: ТГТУ, 2014. – 124 с.

References

1. Polak, A.F. Hardening of mineral binders / A.F. Polak, V.V. Babkov, E.P. Andreeva. – Ufa: Bashk.kn.izd-vo, 1990. – 216 p.
 2. Korolev, E.V. Analysis of the structure formation of composites using fractal dimension / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenshtadt // Building materials. – 2020. – № 9. – P. 54–61.
 3. Ilyin, V.A. Mathematical analysis. Continuation of the course / V.A. Ilyin, V.A. Sadvonichy, Bl.H. Sendov. – М.: Moscow State University Publishing House, 1987. – 358 p.
 4. Gusev, B.V. Models of polydisperse systems: evaluation criteria and analysis of efficiency indicators / B.V. Gusev, E.V. Korolev, A.N. Grishina // Industrial and civil construction. – 2018. – № 8. – P. 31–39.
 5. Pridatko, Yu.M. Modeling of dense packing of particles of a composite material / Yu.M. Pridatko, L.V. Korolev, V.M. Gotovtsev // Bulletin of the Saratov State Technical University. – 2011. – №4 (62). – P. 96–100.
 6. Vasyutinsky, N.A. The golden proportion / N.A. Vasyutinsky. – М.: Young Guard, 1990. – 238 p.
 7. Vorobiev, N.N. Fibonacci numbers / N.N. Vorobiev. – М.: Nauka, 1984. – 144 p.
 8. Bobryshev, A.N. Physics and Synergetics of Dispersed-Disordered Condensed Composite Systems / A.N. Bobryshev, V.T. Erofeev, V.N. Kozomazov. – SPb.: Science, 2012. – 476 p.
 9. Judin, D.I. Fractals: from simple to complex / D.I. Judin, E.V. Kopusov. – N. Novgorod: NNGASU, 2012. – 200 p.
 10. Korolev, E.V. Radiation-protective and chemically resistant sulfur building materials / E.V. Korolev, Yu.M. Bazhenov, A.I. Albasov. – Penza-Orenburg: IPK OSU, 2010. – 364 p.
 11. Solomatov, V.I. Intensive concrete technology / V.I. Solomatov, M.K. Takhirov, Shah Md. Takher; Joint Ed. USSR – Bangladesh. – М.: Stroyizdat, 1989. – 264 p.
 12. Belov, V.V. Computer modeling and optimization of building composites compositions / V.V. Belov, I.V. Obraztsov. – Tver: TSTU, 2014. – 124 p.

УДК 691.4

Северо-Восточный государственный университет (СВГУ)
 Россия, 685000, г. Магадан,
 ул. Портовая, д. 13,
 тел.: +7 (4132) 63-93-43; факс +7 (4132) 63-07-64

Луневова Анастасия Антоновна,
 кандидат экономических наук, доцент
 кафедры «Промышленное и гражданское
 строительство»
 E-mail: laaru@rambler.ru;

Вдовин Владислав Иванович,
 студент
 E-mail: vdovinvladislav1995@mail.ru
 БУ ВО «Сургутский государственный
 университет» (СурГУ)

Россия, 628400, г. Сургут, пр. Ленина, д. 1,
 тел.: +7 (3462) 76-30-02;

Болотин Александр Викторович,
 кандидат химических наук
 E-mail: alexandr_bolotin@mail.ru

Northeast State University

Russia, 685000, Magadan, 13, Portovaya St.,
 tel.: +7 (4132) 63-93-43; fax: +7 (4132) 63-07-64

Lunegova Anastasia Antonovna,
 Candidate of Economic Sciences, Associate
 Professor of the department «Industrial and
 civil engineering»
 E-mail: laaru@rambler.ru

Vdovin Vladislav Ivanovich,
 Student
 E-mail: vdovinvladislav1995@mail.ru
 Surgut State University

Russia, 628400, Surgut, pr. Lenin, d. 1,
 tel.: +7 (3462) 76-30-02

Bolotin Alexander Viktorovich,
 Candidate of Chemical Sciences
 E-mail: alexandr_bolotin@mail.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЕГО-КИРПИЧА В ИНДИВИДУАЛЬНОМ ЖИЛИЩНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.А. Луневова, А.В. Болотин, В.И. Вдовин

Рассматривается возможность использования лего-кирпича в индивидуальном жилищном строительстве в Магаданской области. Произведенные расчеты выявили удовлетворительные прочностные и теплофизические качества лего-кирпича.

Ключевые слова: строительные материалы, монолитное домостроение, лего-кирпич, прочность, теплофизические свойства, нагрузка, несущая ограждающая конструкция, теплотехнический расчет, глубина промерзания

PROSPECTS OF LEGO BRICKS USE IN INDIVIDUAL HOUSING CONSTRUCTION

А.А. Lunegova, А.В. Bolotin, В.И. Vdovin

The article discusses the possibility of using lego-bricks in individual housing construction in Magadan region. The given calculations have revealed satisfactory strength and thermophysical quality of lego-bricks.

Keywords: building materials, monolithic housing construction, lego-brick, strength, thermophysical properties, load, load-bearing enclosing structure, heat engineering calculation, frost penetration depth

Введение (Introduction). В настоящее время все больше внимания уделяется строительным материалам с малым логистическим плечом. Данному требованию будет удовлетворять лего-кирпич, произведенный вблизи от потенциального потребителя.

Цель исследования: изучение возможности строительства индивидуального жилья в Магаданской области из лего-кирпича.

Задачи исследования:

1. Выполнить сбор нагрузок на обрез фундамента стены монолитной и из лего-кирпича.

2. Произвести теплотехнический расчет стены из лего-кирпича.

Методы (Methods). В Магаданской области в основном в индивидуальном секторе развито монолитное и шлакоблочное домостроение. В этих условиях альтернативой данным строительным материалам будет строительство жилья из лего-кирпича. К основным преимуществам лего-кирпича относятся:

- производство кирпича без обжига;
- экономия средств за счет использования клея в качестве связующего.

Недостаток лего-кирпича: в настоящий момент изделие не сертифицировано.

Лего-кирпич можно рассматривать как разновидность полнотелого гиперпрессованного кирпича, производимого посредством прессования под высоким давлением без последующего обжига. Для строительства капитальных стен и перегородок применяют изделия прочностью не ниже М150 [1].

Технические характеристики строительных материалов и их стоимость представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Сравнительная характеристика строительных материалов [1, 2, 3]

Характеристики	Ед. изм	Лего-кирпич	Кирпич	Монолитное домостроение
Размеры	мм	250×125×65	250×125×65	-
Вес	1 шт.	3,2-4	4	-
Плотность	кг/м ³	1500	1600-1900	1800-2500
Морозостойкость	Циклов замораживания и оттаивания	До F200	F35-40	До 1000
Водопоглощение	%	5,5-6,0	14,0	3,0-10,0
Теплопроводность	Вт/(м·°С)	0,4-0,56	0,5-0,8	1,1-2,9
Предел прочности при сжатии изделий для М150	МПа	12,5-15	12,5-15	13,1
Стоимость 1 м ³ *	Руб.	9000	10660	15620

* По ценам Магаданской области по состоянию на 01.01.2021 г.

По многим параметрам лего-кирпич не уступает кирпичу строительному полнотелому, который прочно завоевал строительную нишу во всех регионах России, однако во многом уступает монолитной стене, предпочтение которой отдается населением Магаданской области. Преимуществом лего-кирпича для жителей Магаданской области выступает привлекательная стоимость 1 м³ несущей стены: дешевле более чем в 1,5 раза (см. табл. 1).

Для сравнения произведем сбор нагрузок на обрез фундамента под несущую стену двухэтажного жилого дома монолитной стены и стены, выполненной из лего-кирпича. В качестве примера нами выбран район строительства – г. Магадан.

Примем состав покрытия:

- керамочерепица;
- обрешётка 50×50 мм с шагом 0,35 м;
- контробрешётка 40×50 мм по стропилам с шагом 0,9 м;
- пароизоляция;
- стропила 150×50 мм с шагом 0,9 м;
- утеплитель 150 мм;
- обрешётка под гипсоплиту 25×50 мм с шагом 0,4 м;
- гипсоплита 10 мм.

По методике, изложенной в работе [4], величины нормативной и расчетной нагрузок от перекрытия составляют соответственно:

$$q_n = 2,03 \text{ кПа};$$

$$q = 2,21 \text{ кПа}.$$

Примем состав перекрытия:

- линолеум;
- прослойка из мастики;
- гидроизоляционная прослойка;
- цементно-песчаная стяжка 40 мм;
- утеплитель «Пеноплекс» 100 мм;
- монолитная плита 160 мм.

Значения нормативной и расчетной нагрузок от перекрытия соответственно составляют:

$$q_n = 6,76 \text{ кПа};$$

$$q = 7,78 \text{ кПа}.$$

Нормативная нагрузка на обрез фундамента монолитной стены с учетом веса балок сечением 0,2×0,4 м и грузовой площади $A_{гр} = 18 \text{ м}^2$ будет равна:

$$N_n = q_n^{\text{перекрытия}} \cdot A_{гр} + q^{\text{перекрытия}} \cdot A_{гр} + n_{\text{балок}} \cdot N_{\text{балки}}^n + N_{\text{стены}}^n = 6,76 \cdot 18 + 2,03 \cdot 18 + 1 \cdot 12,0 + 61,45 = 231,67 \text{ кН}. \quad (1)$$

Расчетная нагрузка:

$$N = (q_{\text{перекрытия}} \cdot A_{гр} + q_{\text{перекрытия}} \cdot A_{гр} + n_{\text{балок}} \cdot N_{\text{балки}} + N_{\text{стены}}) \cdot \gamma_n = 7,78 \cdot 18 + 2,21 \cdot 18 + 1 \cdot 13,2 + 67,60 = 260,62 \text{ кН}. \quad (2)$$

Соответствующие вычисления на обрез фундамента от стены из лего-кирпича дали результат по расчетной нагрузке:

$$N = 239,11 \text{ кН}.$$

Полученные значения нормативных и расчетных нагрузок на низ монолитной стены оказались больше, чем значения нагрузок на низ стены из лего-кирпича:

$$N_{\text{монолит. ст}} = 260,62 > N_{\text{лего-кирпич. ст}} = 239,11.$$

Следует отметить, что уменьшение нагрузки на фундамент является преимуществом стены из лего-кирпича перед монолитной стеной.

Для дальнейшего обоснования выполним теплотехнический расчет наружной стены здания из лего-кирпича по методике, изложенной в работе [5]. Теплотехнический расчет начинается со сбора исходных данных для города Магадан.

Расчетная температура наиболее холодных пяти суток [6, табл. 3.1, столб. 5]: $t_n = -28 \text{ °С}$.

Определяем градусо-сутки отопительного периода:

$$\text{ГСОП} = (t_v - t_{\text{от.пер}}) \cdot z_{\text{от.пер}} = (20 - 7,4) \cdot 279 = 3515,4 \text{ °С} \cdot \text{сут/год}.$$

По [7, табл. 3] определяем требуемое сопротивление теплопередаче $R_0^{\text{тр}}$, используя интерполирование:

$$R_0^{\text{тр}} = R_{0 \text{ min}}^{\text{тр}} + \frac{(\text{ГСОП} - \text{ГСОП}_{\text{min}})}{\text{ГСОП}_{\text{max}} - \text{ГСОП}_{\text{min}}} \cdot (R_{0 \text{ max}}^{\text{тр}} - R_{0 \text{ min}}^{\text{тр}}) = 2,1 + \frac{3515,4 - 2000}{4000 - 2000} \cdot (2,8 - 2,1) = 2,63 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}. \quad (3)$$

В табл. 2 представлены характеристики материалов принятой стены здания.

Т а б л и ц а 2
Характеристики материалов ограждающей конструкции [7]

№ п/п	Наименование материала	ρ , кг/м ³	δ , м	λ , Вт/(м·°C)	R , м ² ·°C/Вт
1	Лего-кирпич	1500	0,38	0,5	0,76
2	Плита минераловатная	125	δ_2	0,064	2,81
3	Листы гипсовые обшивочные	1050	0,0125	0,36	0,034

Находим требуемые условные сопротивления теплопередаче по формуле

$$R_0^{\text{тр. усл.}} = \frac{R_0^{\text{тр.}}}{r} = \frac{2,63}{0,74} = 3,55 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}, \quad (4)$$

где r – коэффициент теплотехнической однородности, принимаемый равным 0,74 (СП 23-10-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий»).

Определяем требуемое сопротивление теплоотдаче слоя утеплителя:

$$R_{\text{утеп.}}^{\text{тр.}} = 3,55 - \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,38}{0,5} + \frac{\delta_{\text{утеп.}}}{0,064} + \frac{0,0125}{0,36} + \frac{1}{23} \right) = 2,5969 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}. \quad (5)$$

Рассчитываем толщину утеплителя:

$$\delta_{\text{утеп.}} = R_{\text{утеп.}}^{\text{тр.}} \cdot \lambda_{\text{утеп.}} = 2,5969 \cdot 0,064 = 0,166 \text{ м}. \quad (6)$$

Принимаем толщину утеплителя 180 мм.

Определяем приведенное сопротивление теплопередаче наружной стены.

$$R_0^{\text{нп}} = R_B + \sum R_K + R_H = \frac{1}{8,7} + \frac{0,38}{0,5} + \frac{0,18}{0,064} + \frac{0,0125}{0,36} + \frac{1}{23} = 3,61 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}, \quad (7)$$

$$R_0 = R_0^{\text{нп}} \cdot r = 3,61 \cdot 0,74 = 2,67 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}. \quad (8)$$

Проверяем условие: $R_0 \geq R_0^{\text{тр.}} \Rightarrow 2,67 > 2,63$ – условие сопротивления теплопередаче выполнено, значит, толщина утеплителя подобрана верно.

Выполняем проверку конструкции на невыпадение конденсата на внутренней поверхности ограждения.

Определяем температуру внутренней ограждающей конструкции:

$$\tau_b = t_b - \frac{n \cdot (t_b - t_n)}{R_0 \cdot \alpha_b} = 20 - \frac{1 \cdot (20 - (-28))}{2,67 \cdot 8,7} = 17,93 \text{ °C}, \quad (9)$$

где n – коэффициент, учитывающий зависимость положения наружной поверхности ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху ($n = 1$).

Температура точки росы $t_{\text{т.р.}}$ равна 10,7 °C.

Проверяем условие: $\tau_b > t_{\text{т.р.}} \Rightarrow 17,93 > 9,3$ – условие невыпадения конденсата на внутренней поверхности ограждения выполняется.

Определяем толщину промерзания ограждающей конструкции (графическим методом).

Строим график и определяем глубину промерзания конструкции (см. рисунок).

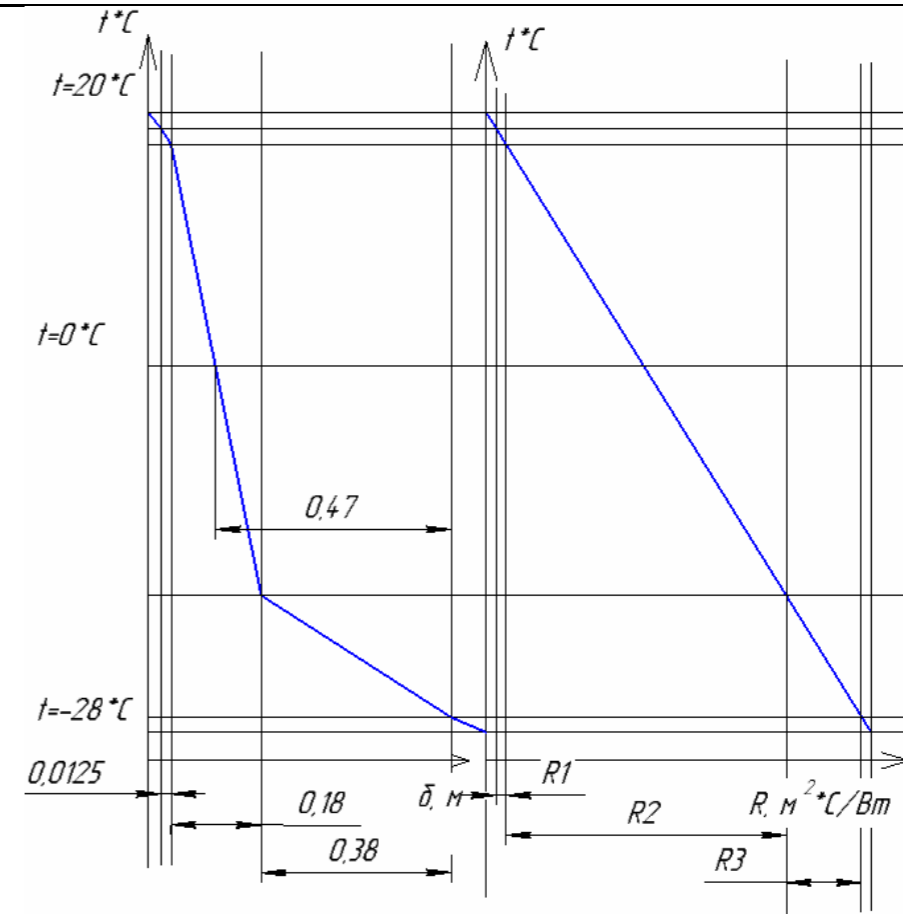


График промерзания стены

Из графика видим, что глубина промерзания ограждающей конструкции $\delta_{\text{пром}} = 0,47 \text{ м}$.

Выполним проверку ограждающей конструкции на температурный перепад.

Температурный перепад между температурой воздуха внутри помещения t_b и температурой ограждающей конструкции τ_b не должен превышать нормированный Δt_n .

Проверяем условие: $\Delta t_n \geq t_b - \tau_b \Rightarrow \Delta t_n \geq 20 - 17,93 \Rightarrow \Delta t_n \geq 2,64$;

$\Delta t_n = 4 \text{ °C} \Rightarrow 4 > 2,64$ – условие выполняется.

Таким образом, температурный перепад выполнен.

Результаты (Results). Сравнительная характеристика свойств строительных материалов выявила, что лего-кирпич по сравнению с монолитной стеной уступает по прочностным характеристикам. По сбору нагрузок на обрез фундамента получен результат в пользу лего-кирпича, что является преимуществом. С точки зрения стоимости жилья из лего-кирпича индивидуальному застройщику обойдется гораздо дешевле.

Дискуссия (Discussion). Для дальнейшего обоснования преимуществ лего-кирпича перед другими строительными материалами целесообразно более детально рассмотреть технологические процессы строительства жилья индивидуальными застройщиками. Простота возведения стен из лего-кирпича влечет за собой сокращение сроков строительства, что также является преимуществом.

Заключение (Conclusion). Расчеты, произведенные в ходе исследования, доказали возможность использования лего-кирпича в ИЖС в Магаданской области. Лего-кирпич имеет ряд преимуществ перед другими строительными материалами, что делает его привлекательным с точки зрения цена/качество. Использование лего-кирпича в ИЖС позволит увеличить ввод в эксплуатацию жилья, построенного населением за счет собственных и заемных средств.

Список литературы

1. Лего-кирпич – интересный строительный материал с большим потенциалом. – URL: <https://www.forumhouse.ru/journal/articles/7154-kirpich-lego-raznovidnosti-harakteristiki-primenenie> (дата обращения 20.04.2021).
2. СП 15.13330.2012. Каменные и армокаменные конструкции. Masonry and reinforced masonry structures. Актуализированная редакция СНиП II-22-81*. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200092703> (дата обращения 20.04.2021).
3. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082> (дата обращения 20.04.2021).
4. Лунегова, А.А. К вопросу о применении ракушечника в строительстве / А.А. Лунегова, А.В. Болотин, Г.Г. Жукова, Д.Н. Овсянникова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 10, № 3. – С. 61–75.
5. Болотин, А.В. Производство теплоизоляционного материала на основе вулканического пепла месторождений Примагаданья / А.В. Болотин, С.М. Сергеев, А.А. Лунегова, Е.А. Кочеткова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 10, № 4. – С. 78–91.
6. СП 131.13330.2018. Строительная климатология. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/554402860> (дата обращения 20.04.2021).
7. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Thermal performance of the buildings. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095525> (дата обращения 20.04.2021).

References

1. Lego brick is an interesting building material with great potential. – URL: <https://www.forumhouse.ru/journal/articles/7154-kirpich-lego-raznovidnosti-harakteristiki-primenenie> (Accessed 20.04.2021).
2. SP 15.13330.2012. Stone and reinforced stone structures. Masonry and reinforced masonry structures. Updated edition of СНиП II-22-81*. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200092703> (Accessed 20.04.2021).
3. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082> (Accessed 20.04.2021).
4. Lunegova, A.A. On the use of shell rock in construction / A.A. Lunegova, A.V. Bolotin, G.G. Zhukova, D.N. Ovsyannikova // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture. – 2019. – Vol. 10, №.3. – P. 61–75
5. Bolotin, A.V. Production of heat-insulating material based on volcanic ash from the Primagadan region / A.V. Bolotin, S.M. Sergeev, A.A. Lunegova, E.A. Kochetkova // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture. – 2019. – Vol.10, №. 4. – P. 78–91
6. SP 131.13330.2018 Construction climatology. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/554402860> (Accessed 20.04.2021).
7. SP 50.13330.2012. Thermal protection of buildings. Updated edition of СНиП 23-02-2003. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095525> (Accessed 04.20.2021).

УДК 621.315.612.5

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Россия, 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113

Ташки Людмила Николаевна, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительные материалы, стандартизация и сертификация»

Ильина Лилия Владимировна, доктор технических наук, декан факультета инженерных и информационных технологий, профессор кафедры «Строительные материалы, стандартизация и сертификация», советник РААСН E-mail: nsklika@mail.ru

Шоева Татьяна Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы, стандартизация и сертификация» E-mail: shoeva_geotom@mail.ru

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)

Russia, 630008, Novosibirsk, 113, Leningradskaya St.

Tatsky Lyudmila Nikolaevna, Candidate of Sciences, Associate Professor, Professor of the department of «Building Materials, Standardization and Certification»

Ilyina Lilia Vladimirovna, Doctor of Sciences, Dean of the Faculty of Engineering and Information Technologies, Professor of the department «Building Materials, Standardization and Certification», Adviser to the RAASN E-mail: nsklika@mail.ru

Shoeva Tatyana Evgenyevna, Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Building Materials, Standardization and Certification» E-mail: shoeva_geotom@mail.ru

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КИРПИЧА В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Л.Н. Ташки, Л.В. Ильина, Т.Е. Шоева

Изучены вещественный состав и технологические свойства глинистого сырья для производства кирпича в г. Новосибирске и Новосибирской области. Приведены результаты исследования гранулометрического, химического и минерального составов глинистых пород. Особенности сырья является высокое содержание пылеватых частиц и низкое – глинистых, а также несоответствие между достаточным числом пластичности и низкой максимальной молекулярной влажностью. Даны технологические рекомендации для повышения эффективности использования низкокачественного глинистого сырья в производстве кирпича.

Ключевые слова: низкокачественное глинистое сырье, гранулометрический, химический, минеральный состав, пылеватые фракции, компрессионное формование, добавки-плавни, механотермическая активация, керамический кирпич

SUBSTANCE AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF CLAY RAW MATERIAL FOR BRICK PRODUCTION IN WESTERN SIBERIA

L.N. Tatski, L.V. Ilyina, T.E. Shoeva

The material composition and technological properties of clay raw materials for brick production in the city of Novosibirsk and Novosibirsk region have been studied. The results of studying the granulometric, chemical and mineral compositions of clay rocks are presented. The peculiarities of the raw materials are a high content of dusty particles and a low content of clay ones, as well as a discrepancy between a sufficient number of plasticity and a low maximum molecular moisture

capacity. Technological recommendations are given to improve the efficiency of using low-quality clay raw materials in the production of bricks.

Keywords: low-quality clay raw materials, granulometric, chemical, mineral composition, silt fractions, compression molding, additives, flux, mechanochemical activation, ceramic bricks

Введение. В геоморфологическом отношении Новосибирское Приобье – приподнятое плато с расположенной в центре долиной реки Оби. Как показали многолетние геологические исследования Ф.А. Никитенко, лессовые породы, то суглинистые, то супесчаные, покрывают пространства междуречий и высокие террасы р. Оби [1-5]. Так, в районе г. Новосибирска лессовидные суглинки достигают мощности 1,5–2 м на первой надпойменной террасе р. Оби, 3–5 м на второй, 6–8 м на третьей, 13–15 м на возвышенных участках плато [1, 6].

Покровные отложения чаще всего сложены лессовидными суглинками с подчиненным количеством мелкозернистых кварцполевошпатовых песков. Для суглинков в основном характерен гидрослюдистый состав с хорошо развитыми процессами каолинизации [1, 7, 8]. Подобные глинистые породы являются сырьевой базой производства кирпича в г. Новосибирске и области [9, 10].

Цель работы. Сравнительное комплексное исследование вещественного состава и технологических свойств глинистых пород нескольких месторождений г. Новосибирска и области.

1. Методы исследования.

Макроскопическое описание глинистых пород производилось путем осмотра валовых проб с помощью лупы. Определялся тип структуры и текстуры сырья, наличие примесей. Гранулометрический состав глинистых пород изучался методом Б.И. Рутковского, основанным на способности глинистых частиц набухать в воде и на различной скорости падения частиц в воде в зависимости от их размера. Тип породы устанавливался по тройной диаграмме В.В. Охотина.

По рентгенограммам, снятым на порошковом дифрактометре D8 Advance (Bruker AXS, Германия), безэталоным методом Ритвельда выполнялся количественный анализ проб. Расчет производился в программе для профессионального и структурного анализа Topas 4.2 (Bruker AXS, Германия) [7]. В отдельных экспериментах для установления вида глинистой составляющей применялась специальная обработка проб [10, 11].

Термический анализ выполнялся на термоанализаторе NETZSCH STA 449F1 в аргоне, скорость съемки 10 °С/мин. Химический состав сырья определялся силикатным анализом. Пластичность устанавливалась следующим образом: верхний предел пластичности ϕ_1 – методом баланстрованного конуса, нижний предел ϕ_2 – по максимальной молекулярной влагоемкости (метод академика А.Ф. Лебедева). Разность между ϕ_1 и ϕ_2 – число пластичности. По ГОСТ 916975* «Сырье глинистое для керамической промышленности. Классификация» устанавливалась группа сырья. Технологические свойства глинистых пород определялись в соответствии с требованиями ГОСТ 21216-2014 «Сырье глинистое. Методы испытаний».

Изготовление керамических образцов полусухого прессования заключалось в следующем. Глинистое сырье высушивалось и измельчалось в течение 2 часов в шаровой мельнице (механоактивация). Затем порошок тщательно перемешивался и увлажнялся до влажности 10–12 мас. %. Пресс-порошок протирала через сито 1,25 мм, имитируя процесс грануляции. При давлении 25 МПа прессовались образцы-цилиндры диаметром 40 мм и массой 80 г. Давление прикладывалось двухстадийно (на первой стадии оно составляло 50 % от максимального). Высушивание образцов: несколько дней под влажной тканью, затем в специальном шкафу при температуре 100–105 °С. Обжиг образцов осуществлялся в лабораторной электропечи в течение 8 часов с выдержкой при максимальной температуре 1 ч.

Для обожженных образцов определялись средняя плотность, предел прочности при сжатии, водопоглощение за 48 часов.

При подготовке сырья для пластического формования глинистую породу сбивали в брикет и вылеживали 24–48 ч во влажной ткани. В формах из оргстекла формовали кубики размером 50×50×50 мм и балочки 135×30×15 мм. Высушивание и обжиг образцов осуществлялись так же, как и образцов полусухого прессования. Кубики испытывали на сжатие, балочки – на изгиб.

2. Результаты экспериментов

В качестве объектов исследования выбраны представительные пробы глинистых пород следующих месторождений г. Новосибирска и НСО: 1 – Верх-Тулинское; 2 – Каменское; 3 – Клещихинское; 4 – Боровое; 5 – Барышевское; 6 – Бердское.

По результатам макроскопического исследования установлено, что все сырье характеризуется крупнодисперсной структурой, беспорядочной текстурой.

Наличие известняка и других примесей приведено в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Наличие примесей в сырье

№ п/п	Месторождение	Наличие известняка (проба на 10 %-ную HCl)	Наличие других примесей
1	Верх-Тулинское	Бурное вскипание	Кварц, слюда, полевой шпат
2	Каменское	Интенсивное вскипание	Кварц, полевой шпат
3	Клещихинское	Бурное вскипание	Кварц, полевой шпат
4	Боровое	Интенсивное вскипание	Кварц, полевой шпат
5	Барышевское	Бурное вскипание	Кварц, полевой шпат
6	Бердское	Бурное вскипание	Кварц, полевой шпат

Сырье всех месторождений вскипает интенсивно или бурно от действия HCl, т.е. во всех пробах присутствует карбонат кальция. Среди прочих примесей обнаружены кварц, полевой шпат.

Гранулометрический состав сырья показал, что крупнозернистых включений в глинистых породах всех месторождений чрезвычайно мало: остаток на сите № 050 менее 1 мас. %, т.е. – по ГОСТ 9169 -75* – низкое содержание.

В табл. 2 приведены результаты определения гранулометрического состава пород по методу Б.И. Рутковского, которые показывают высокое содержание пылеватых частиц в сырье всех месторождений (57,0–81,5 об. %). Для определения типа глинистых пород данные гранулометрического анализа наносились на тройную диаграмму В.В. Охотина (рис. 1, табл.2).

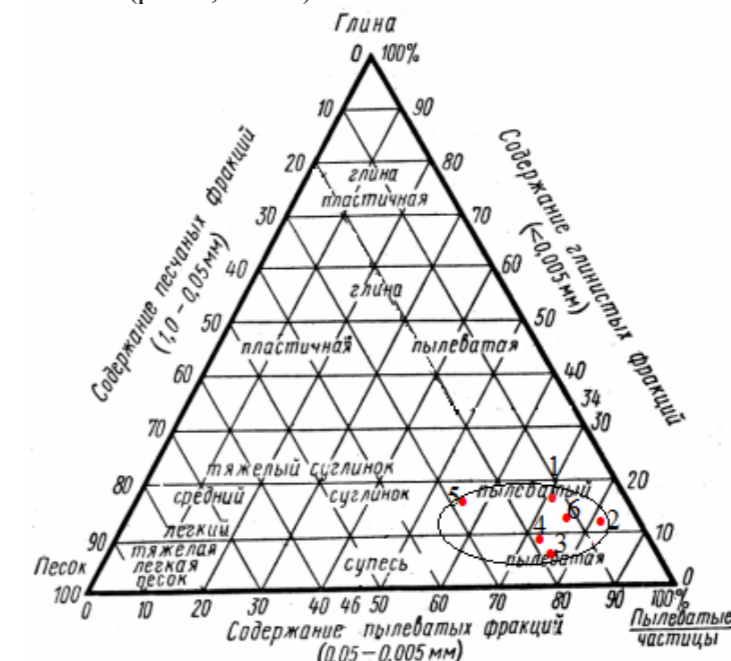


Рис. 1. Тройная диаграмма В.В. Охотина

Гранулометрический состав сырья

№ п/п	Месторождение	Содержание фракций, об. %			Тип сырья
		50-1000 мкм	5-50 мкм	менее 5 мкм	
1	Верх-Тулинское	10,17	71,70	18,13	Суглинок средний пылеватый
2	Каменское	6,00	81,50	12,50	Суглинок легкий пылеватый
3	Клещихинское	19,45	75,19	6,81	Супесь легкая пылеватая
4	Барышевское	19,50	71,44	9,06	Супесь тяжелая пылеватая
5	Боровое	26,10	57,00	16,90	Суглинок средний пылеватый
6	Бердское	11,50	75,00	13,00	Суглинок легкий пылеватый

Сырье Клещихинского и Барышевского месторождений относится к пылеватым супесям, остальные породы – к легким, средним и тяжелым пылеватым суглинкам. Высокое содержание пылеватых частиц приводит к повышенной чувствительности пород к сушке, к увеличению количества брака при использовании пластического способа формования кирпича или к усложнению состава сырьевой смеси.

Порода Каменского месторождения является сырьевой базой предприятия ООО «Стройкерамика» г. Новосибирска. Заводская лаборатория с 2012 года каждые две недели определяла гранулометрический состав сырья по методу Б.И. Рутковского (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Гранулометрический состав сырья Каменского месторождения за период 2012-2019 гг.

Год измерения	Среднее арифметическое значение содержания фракций (об. %)		
	< 5 мкм (глинистые)	> 50 мкм (песчаные)	5-50 мкм (пылеватые)
2012	13,74	7,12	79,14
2013	13,70	6,75	79,55
2014	15,13	6,77	78,10
2015	14,12	7,29	78,59
2016	13,38	7,28	79,34
2017	13,47	9,09	77,44
2018	13,42	7,55	79,03
2019	10,47	8,64	80,89

Судя по тройной диаграмме В.В. Охотина, сырье относится к легким пылеватым суглинкам. Авторами статьи выполнены обработка приведенных в табл. 3 данных с целью оценки изменчивости по содержанию глинистых и песчаных фракций (табл. 4). По известным в статистике формулам [12] вычислены среднее квадратическое отклонение и вариационный коэффициент.

Т а б л и ц а 4

Изменчивость гранулометрического состава Каменского сырья

Год измерения	Фракция < 5 мкм		Фракция > 50 мкм	
	Среднее квадратич. отклонение, %	Вариационный коэффициент, %	Среднее квадратич. отклонение, %	Вариационный коэффициент, %
2012	3,08	22,43	3,19	44,2
2013	2,85	16,71	3,08	30,95
2014	3,15	21,87	3,62	53,26
2015	2,44	17,37	4,09	43,55
2016	2,65	20,61	3,56	45,20
2017	2,24	16,68	3,39	39,14
2018	1,52	11,29	3,00	39,75
2019	1,91	18,24	2,77	32,06

Приведенные результаты показывают, что сырье более однородно по содержанию глинистых фракций, чем по содержанию песчаных частиц.

В дальнейшем необходимо определить возможные границы изменчивости по содержанию глинистых и песчаных фракций, выход за которые потребует, например, осуществить переход на другой участок разработки карьера. Химический состав глинистых пород приведен в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Химический состав сырья по результатам силикатного анализа

Месторождение	Содержание оксидов, мас. % на сухое вещество								Сумма	Al ₂ O ₃ *
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	SO ₃	п.п.п.		
Верх-Тулинское	60,90	12,52	4,68	5,95	2,50	3,69	0,10	7,74	98,09	13,83
Каменское	63,58	14,26	4,52	5,51	1,36	3,76	0,10	6,69	99,68	15,21
Клещихинское	62,58	12,26	5,04	5,93	2,38	3,54	0,20	7,94	99,47	12,37
Боровое	64,00	12,73	5,32	4,58	1,98	4,13	0,10	7,14	99,98	13,71
Барышевское	64,41	14,27	6,03	1,81	2,36	4,03	0,10	5,92	98,93	15,34
Бердское**	60,50	13,30	5,35	5,18	1,62	3,60	-	8,63	98,18	14,83

Пр и м е ч а н и я : 1. Al₂O₃* – содержание оксида в расчете на прокаленное вещество.

2. **Результаты по месторождению опубликованы в [13].

В соответствии с ГОСТ 9169-75*, глинистые породы Верх-Тулинского, Клещихинского и Барышевского месторождений относятся к кислому, а Каменского, Борового, Бердского – к полукислому сырью. В зависимости от содержания Fe₂O₃ все породы классифицируются как сырье с высоким его содержанием, поэтому после обжига керамический черепок имеет красную окраску.

На известной керамиком диаграмме промышленного назначения сырья А.И. Августиника (рис. 2) видно, что породы исследуемых месторождений располагаются «кучно» за исключением Барышевского, которое хотя и пригодно для производства кирпича, но существенно отличается по химическому составу от остальных.

Минеральный состав глинистых пород определялся комплексным термическим и рентгенофазовым анализами. В отдельных случаях использовалась микроскопия. Результаты термического анализа для сырья различных месторождений идентичны, кроме пород Верх-Тулинского месторождения.

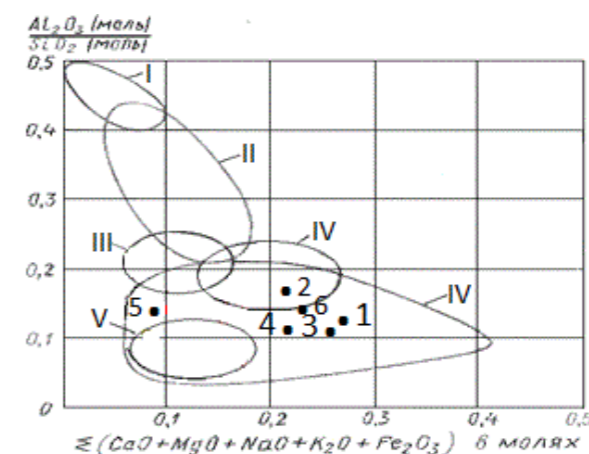


Рис. 2. Промышленное назначение глин в зависимости от их химического состава.

Глины, пригодные для производства:

I – огнеупорных шамотных изделий; II – плиток для пола; III – гончарных и терракотовых изделий; IV–V – мостового клинкера; VI – кирпича

Два эндотермических эффекта в низкотемпературной области (85-155 °С) связаны с потерей адсорбционной воды глинистыми минералами. При температуре 263-280 °С

происходит дегидратация минералов гидрослюдистой группы. Широкий эндозффект с максимумом при 485-500 °С и наличие эндозффекта при 845-880 °С подтверждают присутствие монтмориллонита. При 940-955 °С при незначительной потере остатков химически связанной воды завершается разрушение решетки гидрослюды, а эндозффект переходит в экзотермический при температуре 1000 °С, что говорит о кристаллизации новообразований. Все породы закарбонизованы, о чем свидетельствует глубокий эндотермический пик с максимумом при 740-745 °С и значительной потерей массы и CO₂. Эффект при температуре 580 °С может быть отнесен к наличию в сырье кремнезема. Однако присутствие при этой же температуре двойного пика удаления воды (заштрихованная область) говорит о происходящем процессе дегидратации (возможно, каолинита). Для примера на рис. 3-4 представлены кривые комплексного термического анализа сырья Каменского месторождения, сравнить которые можно с таковыми Клещихинского месторождения.

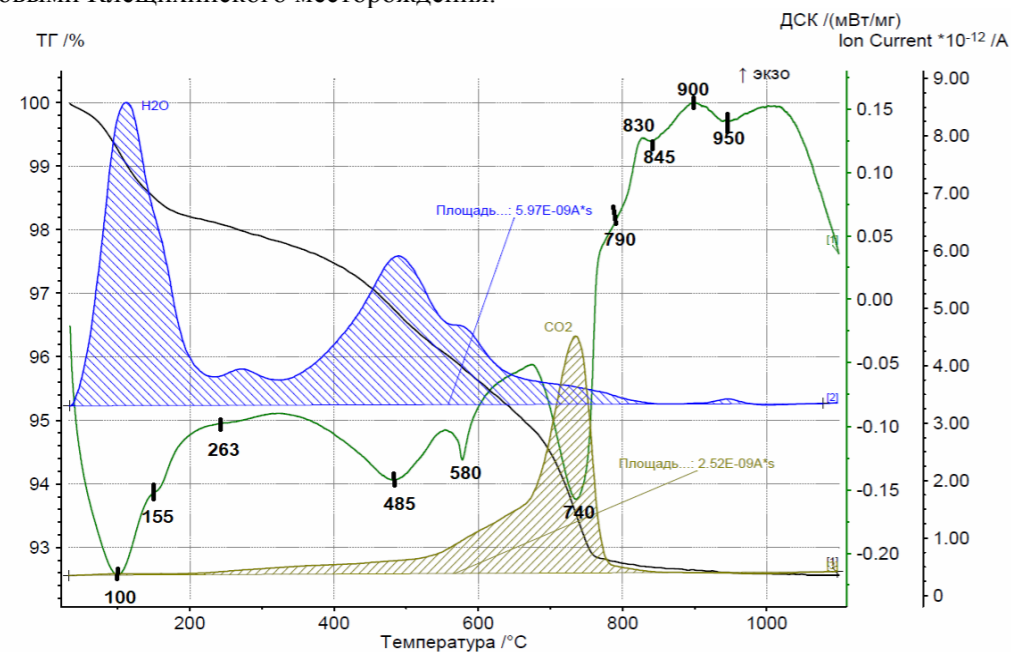


Рис. 3. Кривые комплексного термического анализа глинистого сырья Каменского месторождения

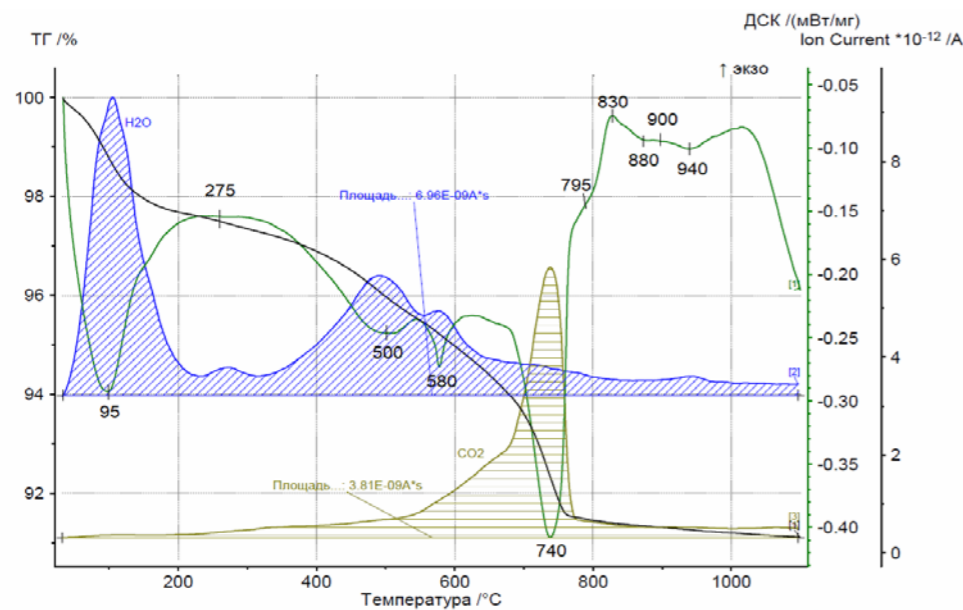


Рис. 4. Кривые комплексного термического анализа глинистого сырья Клещихинского месторождения

Эндотермический эффект при температуре 800-1000 °С связан с дегидратацией и перестройкой решетки мусковита; экзотермический эффект при температуре 380 °С обусловлен слабым процессом раскристаллизации мусковита; эндотермический эффект (1100-1200 °С) – распадом решетки слюды, образованием игольчатого муллита и аморфной фазы.

Микроскопические исследования подтвердили, что основным глинистым минералом для суглинков обоих месторождений является гидрослюда (показатель светопреломления $N_g = 1,57-1,59$ и $N_p = 1,56-1,54$). В качестве второстепенных минералов в Клещихинском суглинке обнаружены каолинит ($N_g = N_p = 1,56$), монтмориллонит ($N_g = 1,51$, $N_p = 1,49$) и хлорит $N_g=1,58$; в Каменском – каолинит ($N_g = N_p = 1,56$) и хлорит $N_g=1,58$.

Обращает на себя внимание то, что в упомянутых выше суглинках низкотемпературные эффекты более интенсивны, чем пики дегидратации, что характерно для минерала монтмориллонита. В сырье месторождения Верх-Тулинского, наоборот, более интенсивны пики дегидратации, вероятно, каолинита. Интересно также, что химически связанная вода в сырье Верх-Тулинского и Борового месторождений сохраняется до 1100 °С, в то время как в Каменском сырье она исчезает уже при 970 °С (см. рис. 3).

40 лет назад Г.И. Книгина с соавторами разработали способы подготовки сырья с низким содержанием глинистых фракций для определения глинистых минералов рентгеноструктурным анализом [10]. Эти методы не потеряли актуальности в связи с отсутствием в Сибири качественного сырья. Они в настоящее время дополнены, общеизвестны и изучаются студентами геологических специальностей [11].

Наличие эффекта с $d=14,24-14,37$ Å подтверждает присутствие кроме смешанослойных образований минерала хлорита. Подтверждением является обработка пробы кипящей 1NНCl, приводящая к уменьшению интенсивности этого пика. Присутствие гидрослюды устанавливается по пикам $d=9,97-10,00$ Å и 4,98 Å, которые не изменяются при обработке глицерином и нагревании в течение 1 ч при 350 °С. Прокаливание при 750 °С нарушает кристалличность гидрослюды, что выражается в снижении интенсивности дифракционных максимумов. Дифракционные пики с $d=7,08$; 4,47-4,48 Å идентифицируются как каолинитовые. Обработка кипящей соляной кислотой и глицерином не оказывает влияния на эффекты. Монтмориллонит идентифицируется по смещению рефлекса с 12,47 Å до 17,5 Å при обработке пробы глицерином за счет набухания кристаллической решетки [10]. Все глинистые породы, обогащенные кварцем, имеют пики с $d=3,34$; 4,25; 1,82 Å. Альбит обнаружен по эффектам с $d=4,02-4,03$ и 3,52 Å. Полевые шпаты выявляются по пикам с $d=3,24$; 2,23; 1,80 Å. Примесь хлорита может быть обнаружена по рефлексам с $d=14,24-14,28$ Å и в глинистых породах всех месторождений, кроме Барышевского и Каменского. Кальцит выявлен во всех породах по пикам с $d=3,03-3,02$; 2,59; 2,45 и 2,09 Å. Альбит обнаружен по эффектам с $d=4,02-4,03$ и 3,52 Å.

Интересные, на наш взгляд, результаты получены за счет использования количественного анализа по рентгенограммам сырья (рис. 5, табл. 4). Не выявлено присутствие глинистых фаз, видимо, ввиду их незначительного содержания. В качестве примера на рис. 5 показана дифрактограмма сырья Верх-Тулинского месторождения. Дифрактограмма Клещихинской породы приведена в [14].

Т а б л и ц а 4

Количественный анализ минерального состава глинистых пород

Месторождение	Содержание, мас. %			
	мусковит	кварц	альбит	кальцит
Каменское	15	30	46	9
Клещихинское	10	25	51	13
Боровое	16	34	38	12

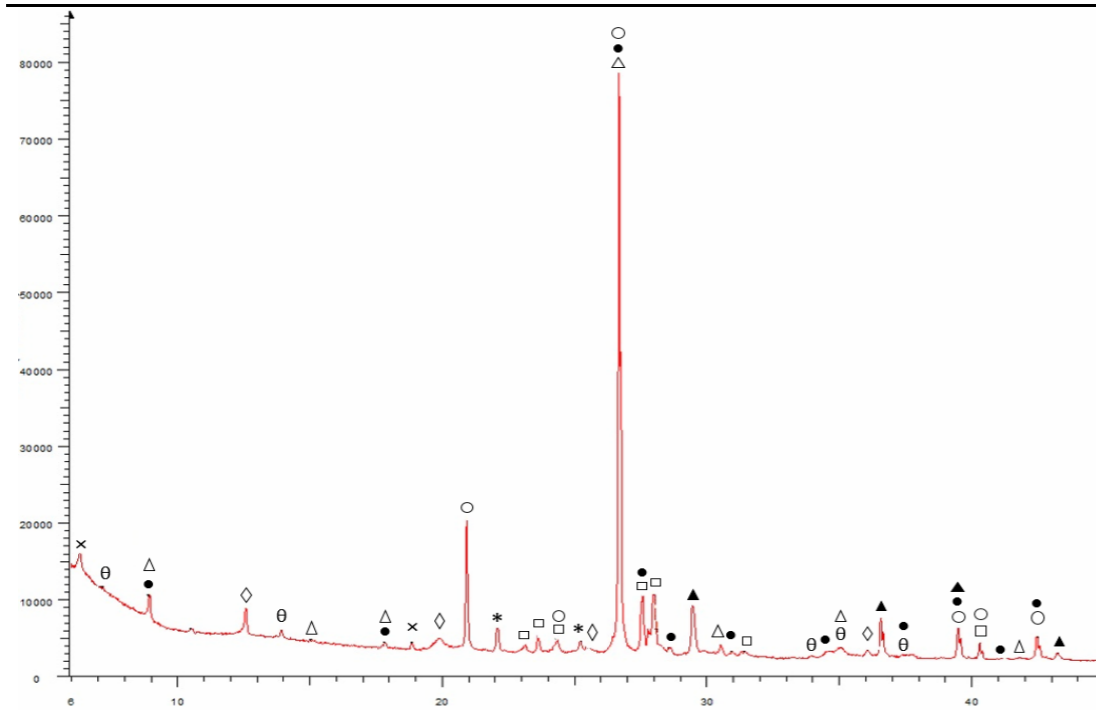


Рис. 5. Дифрактограмма сырья Верх-Тулинского месторождения:

Δ – слюда; ● – гидрослюда; ◇ – каолинит; □ – полевого шпат; ○ – кварц; * – альбит;
θ – монтмориллонит; × – хлорит; ▲ – кальцит

В табл. 5 приведены обобщенные результаты исследования минерального состава глинистых пород.

Т а б л и ц а 5

Минеральный состав глинистых пород

Месторождение	Глинистые минералы		Примеси других минералов	Классификация (ГОСТ 9169-75*)
	основные	второстепенные		
Верх-Тулинское	гидро-слюда	каолинит, хлорит, монтмориллонит	кварц, кальцит, альбит, полевого шпат, слюда	полиминеральное
Каменское	гидро-слюда	смешанослойные минералы монтмориллонит – гидрослюда, каолинит	кварц, кальцит, альбит, полевого шпат, слюда	полиминеральное
Клещихинское	гидро-слюда	каолинит, хлорит, монтмориллонит	кварц, кальцит, полевого шпат, слюда	полиминеральное
Боровое	гидро-слюда	каолинит, хлорит, монтмориллонит	кварц, кальцит, альбит, полевого шпат, слюда	полиминеральное
Барышевское	гидро-слюда,	смешанослойные минералы, монтмориллонит, гидрослюда, немного каолинита	кварц, кальцит, полевого шпат	полиминеральное
Бердское*	гидро-слюда, каолинит	хлорит	кварц, кальцит, полевого шпат	гидрослюдисто-каолинитовое

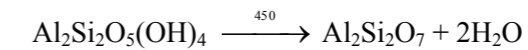
П р и м е ч а н и я : 1) * данные опубликованы в [13];

2) все породы содержат оксиды и гидроксиды железа.

Таким образом, глинистые породы представляют собой сырье, основным глинистым минералом которого являются гидрослюда с примесью монтмориллонита, каолинита и в большинстве своем – хлорита. В сырье Каменского и Барышевского месторождений выявлены смешанослойные образования. В качестве примесей породы содержат кварц, кальцит, полевые шпаты, оксиды и гидроксиды железа, слюду.

Глинистая порода Бердского месторождения [14] в соответствии с ГОСТ 9169-75*, на наш взгляд, должна быть классифицирована как полиминеральная; ее глинистая составляющая – не как гидрослюдисто-каолинитовая, а каолинит-гидрослюдистая, т.к. основным минералом является гидрослюда.

В публикации У. Уоррела [15] приводятся результаты экспериментов с кремнезем-глиноземистыми гелями, указывающие на образование при температуре около 1000 °С из каолинита $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ минерала силлиманита $Al_2O_3 \cdot SiO_2$. Высказано предположение, что его появление могло быть связано с тем, что гели гораздо более реактивны, чем метакаолинит $Al_2Si_2O_7$, и в них удерживается некоторое количество связанной воды [1, 4].



Выполненные авторами настоящей статьи эксперименты показали, что до 1000 °С некоторое количество связанной воды в системе остается [14]. Следовательно, можно предположить образование силлиманита. Особенно это характерно для сырья Верх-Тулинского, Борового месторождений.

В исследуемых лессовидных глинистых породах кварц и кальцит сосредоточены в основном в пылеватых фракциях. Из кальцита и слюд (например, мусковита) при термообработке выделяются флюсующие ионы Са и К, понижающие температуру плавления системы. В результате их взаимодействия с SiO_2 уже при 1000 °С может образовываться субстанция, которая затвердевает в виде стеклофазы сложного состава [7].

Таким образом, авторы выдвигают гипотезу о возможности образования в системе на основе лессовидных суглинков при температуре обжига 1000 °С силлиманита и стекловидной фазы сложного состава благодаря флюсующему действию ионов Са и К.

Технологические свойства глинистого сырья приведены в табл. 6-7.

Высокая дисперсность пылеватых частиц является причиной несоответствия сырья большинства месторождений (см. табл. 6). На эту особенность лессовидного сырья указывала в своих ранних работах Г.И. Книгина, отмечая скорее зыбкость, чем пластичность глинистых пород [8, 9].

Таким образом, глинистое сырье является технологически трудным и требует эффективных способов управления его свойствами.

Т а б л и ц а 6

Пластичность глинистых пород

№ п/п	Месторождение	Влажность, мас. %		Число пластичности	Классификация по ГОСТ 9169-75*
		верхний предел пластичности	максимальная молекулярная влагоемкость		
1	Верх-Тулинское	31,07	17,94	13,13	Умеренно-пластичное
2	Каменское	25,10	13,40	11,70	Умеренно-пластичное
3	Клещихинское	27,50	12,30	15,20	Среднепластичное
4	Боровое	26,50	11,30	15,20	Среднепластичное
5	Барышевское	29,20	17,90	11,30	Умеренно-пластичное
6	Бердское*	29,90	14,52	15,40	Среднепластичное

П р и м е ч а н и е . * – результаты по данным [13].

Т а б л и ц а 7

Физико-технические свойства образцов

№ п/п	Месторождение	Формовочная влажность, %	Воздушная линейная усадка, %	Физико-технические свойства			
				Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности, МПа, при		Водопоглощение за 24 ч, %
					сжатию	изгибе	
1	Верх-Тулинское	23	9,2	1760	21,90	не опр.	13,10
		12	–	1809	28,37	–	14,09
2	Каменское	12	5,9	1890	39,9	–	13,50
3	Клещихинское	23	7,5	1870	27,5	2,12	18,30
		10	–	1970	34,4	–	14,59
4	Боровое	23	10	1810	18,8	2,84	13,10
		12	–	1960	40,6	–	12,97
5	Барышевское	23	6,8	1740	15,3	2,36	17,20
		12	–	1790	25,1	–	14,90
6	Бердское*	нет данных	нет данных	1830	22,6	3,21	12,60
		10	–	1890	42,6	–	13,86

Примечание. Образцы пластического формования № 1 и 3 обжигались при температуре 1000 °С, № 4-6 – при 950 °С; образцы полусухого прессования № 2, 3, 4, 6- отпрессовывались при давлении 25 МПа, обжигались при 1050 °С.

Результаты исследования физико-технических свойств обожженных образцов приведены в табл. 7. Полученные результаты показывают, что предел прочности у образцов полусухого прессования намного выше, чем у образцов пластического формования. Значительные величины воздушной усадки говорят о необходимости использования отошающих добавок при пластическом формовании. В соответствии с ГОСТ 21216-2014 «Сырье глинистое. Методы испытаний», изучаемые породы являются легкоплавкими (температура огнеупорности 1240-1250 °С) и неспекающимися (водопоглощение при температуре обжига образцов значительно превышает 5 мас. %) (см. табл. 7).

Заключение

Обобщая результаты исследований, можно сформулировать следующие выводы:

1. Все породы содержат менее 1 мас. % крупнозернистых включений. По гранулометрическому составу сырье всех месторождений пылеватое, по типу пород относится к суглинкам и даже к супесям. По химическому составу породы являются кислыми или полукислыми с высоким содержанием красящих оксидов (Fe₂O₃). По минералогическому составу сырье относится к группе полиминеральных пород. Среди неглинистых минералов обнаружены кварц, альбит, полевой шпат, кальцит, мусковит. По диаграмме А.И. Августиника, сырье пригодно для производства кирпича.

2. Глинистые породы характеризуются как умеренно- и среднепластичное сырье. Отмечено несоответствие между достаточным числом пластичности и низкой максимальной молекулярной влагоемкостью, связанное с высокой дисперсностью пылевой фракции. Сырье является легкоплавким и неспекающимся.

Таким образом, изученные глинистые породы представляют собой низкого качества, технологически трудное сырье. Для повышения эффективности его использования в производстве кирпича необходимо:

- применять способ компрессионного формования из гранулированных шихт [16];

- включать в технологическую схему измельчительно-сушильную установку (ИСУ), осуществляющую сушку, помол, разделение сырья по крупности и его механотермическую активацию, устраняющую вредное влияние карбонатов [17];

- поскольку исследованное сырье является неспекающимся, в шихты необходимо вводить добавки-плавни (нефелин-сиенит, молотое оконное стекло и др.) [17].

При продолжении исследований следует испытать образцы на морозостойкость и разработать способы ее повышения.

Список литературы

1. Никитенко, Ф.А. Инженерно-геологические свойства лессовых пород Верхнего Приобья в связи с условиями их формирования / Ф.А. Никитенко // Известия вузов. Геология и разведка. – 1959. – № 8. – С. 123–127.
2. Глины и глинистые минералы Сибири / под ред. Ю.Л. Казанского. – Новосибирск: Наука, 1965. – 132 с.
3. Арефьев, В.С. Генетические и инженерно-геологические особенности лессовых пород Верхнего Приобья: автореф. дис... канд. геол.-мин. наук / В.С. Арефьев. – Томск, 1975. – 24 с.
4. Горбунова, Т.А. Характеристика лессовых пород г. Барнаула как основа инженерно-геологического районирования его территории: автореф. дис... канд. геол.-мин. наук / Т.А. Горбунова. – М., 1975. – 23 с.
5. Сулашкина, Г.А. О происхождении и инженерно-геологических особенностях лессовых пород юго-востока Западно-Сибирской низменности / Г.А. Сулашкина, М.П. Нагорный // Известия вузов. Геология и разведка. – 1967. – № 9. – С. 47–51.
6. Швецов, Г.И. Изменение микроструктуры лессовых пород Приобского плато с глубиной / Г.И. Швецов. – Барнаул, 1990. – Кн. 3. – С. 14–18.
7. Швецов, Г.И. Инженерно-геологическая природа и закономерности формирования лессовых пород (на примере юга Западно-Сибирской плиты): автореф. дис... д-ра геол.-мин. наук / Г.И. Швецов. – Иркутск, 1991. – 43 с.
8. Ивченко, Г.И. Введение в математическую статистику / Г.И. Ивченко, Ю.И. Медведев. – М.: Изд-во ЛКИ, 2010. – § 2.2. Выборочные моменты: точная и асимптотическая теория.
9. Столбоушкин, А.Ю. Особенности глинистого сырья Западной Сибири как сырьевой базы строительной керамики / А.Ю. Столбоушкин, О.А. Фомина, Д.В. Акст, Л.Е. Захарченко // Технические и физико-математические науки. – 2019. – № 3 (42). – С. 27.
10. Книгина, Г.И. Способы подготовки суглинков для определения глинистых минералов рентгеноструктурным анализом / Г.И. Книгина, Н.Ф. Сорокикова, В.Ф. Панова // Стекло и керамика. – 1981. – № 1. – С. 20–21.
11. Куцевол, М.Л. Рентгеновский метод диагностики и качественного фазового анализа минералов / М.Л. Куцевол // Практическое руководство к лабораторным работам по дисциплине «Лабораторные методы изучения минералов». – Днепропетровск, 2012. – С. 18–35.
12. Фомина, О.А. Анализ глинистого сырья для производства строительной керамики / О.А. Фомина, А.Ю. Столбоушкин, Д.В. Акст // Повышение качества и эффективности строительных и специальных материалов: сборник научных трудов по материалам Национальной научно-технической конференции с международным участием. – Новосибирск, 2019. – С. 82–89.
13. Вакалова, Т.В. Перспективы расширения отечественной сырьевой базы строительной керамики за счет комплексного использования месторождений глинистого сырья / Т.В. Вакалова, В.М. Погребенов, И.Б. Ревва // Вестник науки Сибири. Серия 11. Архитектура и строительство. – 2012. – № 1 (2). – С. 339–347.
14. Тацки, Л.Н. Влияние состава шихты из низкокачественного сырья на свойства осветленного керамического черепка / Л.Н. Тацки, Л.В. Ильина // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 2 (8). – С. 114–122.

15. Уоррелл, У. Глины и керамическое сырье / У. Уоррелл; под ред. В.П. Петрова. М.: Мир, 1978. – С. 178–179.
16. Столбоушкин, А.Ю. Перспективное направление развития строительных керамических материалов из низкокачественного сырья / А.Ю. Столбоушкин // Строительные материалы. – 2018. – № 4. – С. 24–28.
17. Тацки, Л.Н. Технологические принципы повышения качества керамического кирпича полусухого прессования из низкокачественного сырья / Л.Н. Тацки, Л.В. Ильина, Н.С. Филин // Известия вузов. Строительство. – 2019. – № 7. – С. 35–48.

References

1. Nikitenko, F.A. Engineering-geological properties of loess rocks of the Upper Ob region in connection with the conditions of their formation / F.A. Nikitenko // *Izvestiya vuzov. Geology and exploration*. – 1959. – No. 8. – P. 123–127.
2. *Clays and clay minerals of Siberia* / ed. Yu.L. Kazansky. – Novosibirsk: Nauka, 1965. – 132 p.
3. Arefiev, V.S. Genetic and geotechnical features of the loess rocks of the Upper Ob region: abstract of Ph.D. dis ... cand. geol.-min. sciences / V.S. Arefiev. – Tomsk, 1975. – 24 p.
4. Gorbunova, T.A. Characteristics of loess rocks in the city of Barnaul as the basis for engineering-geological zoning of its territory: avtoref. dis ... cand. geol.-min. sciences / T.A. Gorbunova. – M., 1975. – 23 p.
5. Sulashkina, G.A. On the origin and engineering-geological features of loess rocks in the southeast of the West Siberian lowland / G.A. Sulashkina, M.P. Nagorny // *Izvestiya vuzov. Geology and exploration*. – 1967. – No. 9. – P. 47–51.
6. Shvetsov, G.I. Changes in the microstructure of the loess rocks of the Ob plateau with depth / G.I. Shvetsov. – Barnaul. 1990. – Book. 3. – P. 14–18.
7. Shvetsov, G.I. Engineering-geological nature and patterns of formation of loess rocks (on the example of the south of the West Siberian plate): avtoref. dis ... doctor of geol.-min. sciences / G.I. Shvetsov. – Irkutsk, 1991. – 43 p.
8. Ivchenko, G.I. An introduction to mathematical statistics / G.I. Ivchenko, Yu.I. Medvedev. – M.: Publishing house LCI, 2010. – § 2.2. Sample moments: exact and asymptotic theory.
9. Stolbushkin, A.Yu. Features of clay raw materials of Western Siberia as a raw material base for building ceramics / A.Yu. Stolbushkin, O.A. Fomina, D.V. Akst, L.Ye. Zakharchenko // *Technical and physical and mathematical sciences*. – No. 3 (42). – 2019. – P. 27.
10. Knigina, G.I. Methods for the preparation of loams for the determination of clay minerals by X-ray structural analysis / G.I. Knigina, N.F. Sorokovikova, V.F. Panova // *Glass and ceramics*. – 1981. – No. 1. – P. 20–21.
11. Kutsevol, M.L. X-ray method of diagnostics and qualitative phase analysis of minerals / M.L. Kutsevol // *Practical guide to laboratory work in the discipline «Laboratory methods of studying minerals»*. – Dnepropetrovsk, 2012. – P. 18–35.
12. Fomina, O.A. Analysis of clay raw materials for the production of building ceramics / O.A. Fomina, A.Yu. Stolbushkin, D.V. Akst // *Improving the quality and efficiency of building and special materials. Collection of scientific papers based on the materials of the national scientific and technical conference with international participation*. – Novosibirsk, 2019. – P. 82–89.
13. Vakalova, T.V. Prospects for expanding the domestic raw material base of building ceramics due to the complex use of clay deposits / T.V. Vakalova, V.M. Pogrebenov, I.B. Revva // *Bulletin of Science of Siberia. Series 11. Architecture and construction*. – 2012. – No. 1 (2). – P. 339–347.
14. Tatski, L.N. Influence of the composition of the charge from low-quality raw materials on the properties of the clarified ceramic shard / L.N. Tatski, L.V. Ilyina // *Construction and reconstruction*. – 2020. – No. 2 (8). – P. 114–122.

15. Worrell, W. Clays and ceramic raw materials / W. Worrell; ed. V.P. Petrov. – M.: World, 1978. – P. 178–179.
16. Stolbushkin, A.Yu. Promising direction of development of building ceramic materials from low-quality raw materials / A.Yu. Stolbushkin // *Building materials*. – 2018. – No. 4. – P. 24–28.
17. Tatski, L.N. Technological principles of improving the quality of semi-dry pressing ceramic bricks from low-quality raw materials / L.N. Tatski, L.V. Ilyina, N.S. Filin // *Izvestiya vuzov. Building*. – 2019. – No. 7. – P. 35–48.

УДК 519.22:691.32

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

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

Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева)
Россия, 430005, г. Саранск,
ул. Большевистская, д. 68
тел. (8342) 48-25-64

Ерофеева Ирина Владимировна,
кандидат технических наук, инженер
кафедры «Инженерная и компьютерная
графика»
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

Афонин Виктор Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Автоматизированные системы
обработки информации и управления»
E-mail: vvafonin53@yandex.ru

Емельянов Денис Владимирович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные материалы и
технологии»
E-mail: emelyanoffdv@yandex.ru

Ахмедов Арслан Меретдурдыевич,
магистрант архитектурно-строительного
факультета
E-mail: arslan.akhmedov.92@mail.ru

Матьякубов Хасан Бахрамович,
студент архитектурно-строительного
факультета
E-mail: abakan_94h@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

Maksimova Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Quality Management and
Construction Technologies»
E-mail: maksimovain@mail.ru

Ogarev Mordovia State University (MRSU)
Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.,
tel.: (8342) 48-25-64

Erofeeva Irina Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Engineer of the
department «Engineering and Computer
Graphics»
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

Afonin Viktor Vasilyevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Automated Information
Processing Systems and Control»
E-mail: vvafonin53@yandex.ru

Emelyanov Denis Vladimirovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Building Materials and
Technologies»
E-mail: emelyanoffdv@yandex.ru

Ahmedov Arslan Meretdurdyevich,
Undergraduate of the Faculty of Architecture
and Civil Engineering
E-mail: arslan.akhmedov.92@mail.ru

Matyakubov Hasan Bahramovich,
Student of the Faculty of Architecture and
Civil Engineering
E-mail: abakan_94h@mail.ru

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

И.Н. Максимова, И.В. Ерофеева, В.В. Афонин, Д.В. Емельянов,
А.М. Ахмедов, Х.Б. Матьякубов

Приводится эвристический подход к оценке качества цементных композитов, выдержанных в условиях повышенной влажности и переменных положительных температур. В основу критерия ранжирования составов цементных композитов положен коэффициент линейной ранговой корреляции Пирсона, на основе которого предлагается статистическая оценка качества цементных композитов. Испытания цементных композитов проводилось с контролем четырех показателей свойств – твердости, модуля деформации материала, равновесного модуля упругости, условно-мгновенного модуля упругости.

Ключевые слова: цементные композиты, показатели свойств, ранговая корреляция Пирсона, оценка качества, ранжирование составов

STATISTICAL QUALITY ASSESSMENT OF CEMENT COMPOSITES

I.N. Maksimova, I.V. Erofeeva, V.V. Afonin, D.V. Yemelyanov,
A.M. Ahmedov, H.B. Matyakubov

Abstract. A heuristic approach to assessing the quality of cement composites aged in conditions of high humidity and variable positive temperatures is presented. The criterion for ranking the compositions of cement composites is based on the Pearson linear rank correlation coefficient, on the basis of which a statistical assessment of the quality of cement composites is proposed. Tests of cement composites were carried out with the control of four parameters of properties – hardness, the modulus of deformation of the material, the equilibrium modulus of elasticity, the conditionally instantaneous modulus of elasticity.

Keywords: cement composites, property indicators, Pearson rank correlation, quality assessment, ranking of compositions

Введение

Исследование цементных композитов остается востребованной тематикой в научных и экспериментальных исследованиях [1–13]. При этом осуществляется контроль прочностных показателей цементных композитов и в целом строительных материалов [1, 3, 9, 11]. Немало работ посвящено исследованию цементных композитов, экспонируемых в некоторых критических условиях эксплуатации, включая различные климатические условия [1, 3, 5, 7, 10, 12, 13].

Одной из задач при разработке и производстве цементных композитов является выбор состава образцов, свойства которых наиболее подходят для успешной эксплуатации. В решении подобных задач применяются как аналитические, так и численные и эвристические методы [4, 6, 11, 14–17].

В данной работе предлагается использовать такой раздел математической статистики, как корреляционный анализ. С его помощью на основе ранговой линейной корреляции Пирсона осуществляется оценка качества группы исследуемых образцов различных составов, которые экспонировались в условиях повышенной влажности и переменных положительных температур.

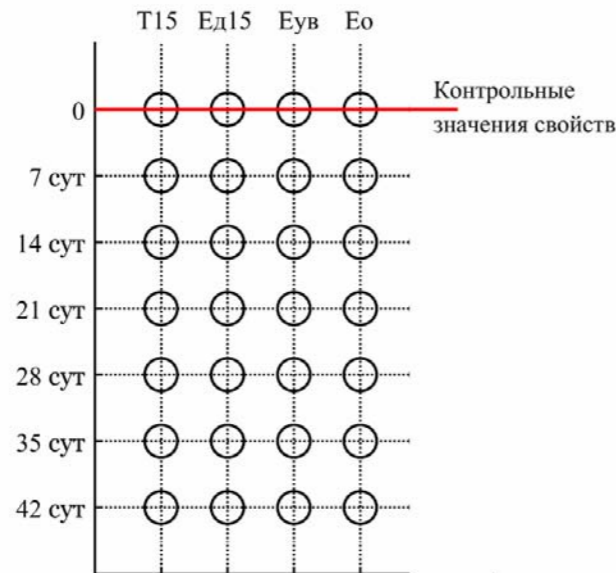
Методы исследования

Методика получения экспериментальных данных заключается в следующем [10]: термоциклические испытания образцов (цементных композитов) в лабораторной климатической камере проведены в два этапа; на первом этапе партия образцов испытана пятнадцатью термоциклами, на следующем этапе вторая партия образцов испытана тридцатью термоциклами. Один термоцикл включает четыре термосостояния:

1. Нагрев образцов от комнатной температуры (+23 °C) до +60 °C при влажности 98 % – около 5 мин.
2. Выдержка образцов при температуре +60 °C и влажности 98 % – 9 часов.
3. При выключенной камере естественное остывание образцов до комнатной температуры (+23 °C) при влажности 98 % – не менее пяти часов.
4. Выдержка образцов при комнатной температуре (+23 °C) при влажности 98 % – 9 часов.

В основе предлагаемого исследования и оценки качества цементных композитов различных составов лежит обработка двумерных числовых массивов, значения столбцов которых представляют собой экспериментальные значения таких показателей, как T15 – твердость композита, Eд15 – модуль деформации материала, Eув – равновесный модуль упругости, Eо – условно-мгновенный модуль упругости. Каждая строка соответствует времени экспонирования образцов, причем первая строка соответствует начальному, нулевому времени испытаний.

Пример виртуальной матрицы значений свойств исследуемых композитов приведен на рисунке.



Пример виртуальной матрицы значений свойств

Значения контрольных свойств (см. рисунок) будут использоваться в качестве опорных значений при определении коэффициентов ранговой корреляции Пирсона, которые сравнивают множества числовых значений [18, 19].

Результаты экспериментов сводятся в таблицу, которая в последующем будет рассматриваться как двумерный числовой массив условно с n числом строк и m столбцами. При этом такой массив рассматривается как коагулированная матрица, объединяющая в себе данные различных составов. Каждый из составов имеет одинаковое время испытаний, число строк, сумма которых равна n . Значения контрольных свойств исследуемых составов лежат в основе сравнения с остальными для расчета коэффициентов ранговой корреляции Пирсона. Множество расчетных коэффициентов ранговой корреляции Пирсона для каждого состава используется для расчета Hm – эвристической метрики оценки качества исследуемых составов цементных композитов. Алгоритм определения эвристической метрики H_s каждого исследуемого состава заключается в следующем:

- 1) фиксация данных контрольных свойств C_i образца, $\forall i$;
- 2) циклическое вычисление коэффициентов P_j ранговой корреляции Пирсона, где $j = 1, 2, \dots, k$ – отрезки времени экспонирования;
- 3) вычисление среднего арифметического значения $Paver$ коэффициентов P_j ;
- 4) вычисление минимального значения $Pmin$ коэффициентов P_j ;
- 5) определение эвристической метрики Hm по предлагаемой формуле:

$$\text{если все значения } Paver \geq 0, \text{ то } Hm = Paver \cdot Pmin, \\ \text{иначе } Hm = 0,5(1 - Paver) \cdot Pmin.$$

Последнее условие означает, что имеют место отрицательные коэффициенты ранговой корреляции, в связи с чем значения коэффициентов приводятся к диапазону $[0; 1]$. Сомножитель $Pmin$ представляет собой условный штраф на метрику состава, поскольку возможны заметные изменения того или иного свойства цементных композитов за время экспонирования. Сравнение всех метрик H_s , $s = 1, 2, \dots, N$, где N – число исследуемых цементных композитов, позволяет произвести ранжирование цементных композитов по величине их метрик.

Результаты исследования

Для исследования были приняты следующие составы композитов:

- состав №1 – цементный камень на основе теста нормальной густоты;
- состав №2 – цементный камень с высоким водоцементным отношением;
- состав №3 – цементный камень на основе теста нормальной густоты с добавкой гиперпластификатора типа «Melflux»;

- состав №5 – порошково-активированный бетон с микрокремнеземом, с каменной мукой и гиперпластификатором типа «Melflux»;
- состав №7 – песчаный бетон с гиперпластификатором типа «Melflux»;
- состав №8 – песчаный бетон нового поколения с гиперпластификатором типа «Хидетал 9γ».

Изменения свойств перечисленных составов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Результаты экспонирования цементных композитов

Состав	Время, сут	T15, МПа	Ед15, МПа	Еув, МПа	Ео, МПа
№1	0	4010,17	92914,38	144975,95	148001,57
	7	4192,05	99133,14	135171,28	138202,08
	14	4302,95	102922,51	128827,47	131878,71
	21	4315,57	103346,47	127109,14	130209,35
	28	4280,32	102129,08	127327,85	130505,75
	35	4207,72	99631,90	129204,65	132475,80
	42	4107,32	96183,68	132514,54	135881,20
№2	0	2065,24	34205,20	61323,24	62793,01
	7	2896,63	58326,01	84038,32	86260,67
	14	3452,41	74418,98	99489,31	102177,32
	21	3647,97	80004,42	105565,80	108328,07
	28	3710,11	81664,33	108449,69	111102,02
	35	3648,67	79709,00	108207,41	110602,96
	42	3468,84	74313,04	104775,74	106800,95
№3	0	7016,08	214592,64	285239,47	289017,40
	7	5746,41	162970,58	213710,65	219143,80
	14	4968,17	131235,84	168562,68	175038,23
	21	4868,47	126916,16	159225,89	165910,84
	28	5095,72	135724,73	166001,85	172519,21
	35	5579,75	154882,29	185969,04	192011,29
	42	6257,12	181883,65	216592,62	221912,73
№5	0	9746,86	354170,95	417368,27	418783,80
	7	7081,62	223887,28	278339,79	284068,45
	14	5618,22	153468,54	203931,05	212328,77
	21	5903,96	170726,19	224523,69	233349,58
	28	7183,77	238625,43	300512,93	308713,21
	35	9172,78	342326,11	415456,83	422190,80
	42	11599,34	467626,78	553591,10	558208,28
№7	0	1187,85	14949,93	32376,75	33658,51
	7	5064,74	151201,11	178344,00	179566,17
	14	7383,94	232701,91	265589,30	266751,78
	21	7523,98	237605,63	270648,35	271739,27
	28	6563,62	203825,12	234143,88	235137,04
	35	4762,76	140499,60	165920,80	166805,29
	42	2361,10	56057,83	75063,27	75843,91
№8	0	7488,59	250219,85	286890,30	291256,44
	7	4962,63	142069,54	177388,50	179788,42
	14	3248,36	68931,08	103091,63	104187,30
	21	2583,37	41172,13	74313,07	74974,07
	28	2280,03	29337,17	61242,31	61801,31
	35	2327,99	32785,81	63416,89	64175,61
	42	2731,28	51492,37	80998,36	82238,53

В соответствии с описанным выше алгоритмом в табл. 2 приведены ранжированные оценки качества исследованных составов цементных композитов.

Т а б л и ц а 2

Результаты оценки качества исследованных композитов

Состав	Метрика оценки качества H_m
№3	0,997236
№5	0,994704
№1	0,986571
№2	0,979679
№8	0,934719
№7	0,908120

Из анализа данных табл. 2 следует, что составы №3 и №5 по свойствам T15, Ед15, Еув, Ео являются более предпочтительными по сравнению с остальными исследованными составами цементных композитов.

Предпочтительные составы №3 и №5 имеют более высокие значения оценки их качества H_m , которые являются функциями коэффициента линейной ранговой корреляции Пирсона. В табл. 2 значения метрик качества отсортированы по величинам уменьшения качества исследованных составов.

Заключение

Проведенные исследования показали возможность применения предложенной оценки качества цементных композитов с контролируемыми свойствами T15, Ед15, Еув, Ео по результатам экспонирования в условиях повышенной влажности и переменных температур. Свойства T15, Ед15, Еув, Ео, или параметры качества цементных композитов, являются определяющими прочностными характеристиками цементных композитов. Техническое ограничение предложенного метода на основе коэффициента ранговой корреляции Пирсона связано с необходимостью иметь выборку данных не менее двух числовых значений. Программные реализации ранговой корреляции Пирсона поддерживает, например, система MATLAB.

Список литературы

1. Соловьёв, В.Г. Влияние минерального волокна на стойкость тяжелого бетона к статическим и циклическим нагрузкам / В.Г. Соловьёв, Е.А. Шувалова, В.В. Шаламов // Известия вузов. Строительство. – 2020. – №1. – С. 78–86. – DOI 10.32683/0536-1052-2020-733-1-78-86.
2. Калашников, В.И. Высокоэффективные самоуплотняющиеся порошково-активированные песчаные бетоны и фибробетоны / В.И. Калашников, В.М. Володин, И.В. Ерофеева, Д.А. Абрамов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №1–2. – С. 110.
3. Каблов, Е.Н. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников / Е.Н. Каблов, В.О. Старцев // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – №2. – С. 47–58.
4. Калашников, В.И. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов // Известия вузов. Строительство. – 2016. – №10–11 (694–695). – С. 120.
5. Шахова, Л.Д. Исследование факторов, влияющих на текучесть цементов / Л.Д. Шахова, Е.С. Черносотова, Л.С. Щелокова, Ю.В. Денисова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 11. – С. 8-16. – DOI:10.34031/2071-7318-2019-4-11-8-16.
6. Езерский, В.А. Методика сравнительной оценки качества многокомпонентных цементных композитов с использованием техногенных отходов / В.А. Езерский,

Н.В. Кузнецова, А.Д. Селезнев // Строительство и реконструкция. – 2018. – №3 (77). – С. 89–97.

7. Парфенов, А.А. Работа и разрушение бетона в условиях высокой и низкой температуры / А.А. Парфенов, О.А. Сивакова, О.А. Гусарь, В.В. Балакирева // Строительные материалы. – 2019. – № 3. – С. 64–66. – DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-64-66.

8. Ерофеев, В.Т. О конструкционных свойствах матричной фазы высокопрочных цементных композитов / В.Т. Ерофеев, Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 3. – С. 4–10. – DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.04-10.

9. Леснов, В.В. Исследование прочностных свойств наполненных пластифицированных цементных матриц предназначенных для каркасных композитов / В.В. Леснов, В.Т. Ерофеев, В.В. Афонин // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №4 (37). – С. 71–79.

10. Ерофеева, И.В. Исследования влияния повышенной влажности и переменных повышенных температур на демпфирующие свойства цементных композитов / И.В. Ерофеева, В.А. Федорцов, В.В. Афонин, Д.В. Емельянов, Н.Ю. Подживотов, В.В. Моисеев, А.Н. Кремчев // CHEMICAL BULLETIN. – 2018. – Т. 1, №3. – С. 62–71.

11. Семейных, Н.С. Оценка физико-механических свойств пористых заполнителей для легких бетонов / Н.С. Семейных, Г.В. Сопегин, А.В. Федосеев // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, вып. 2 (113). – С. 203–212. – DOI: 10.22227/1997-0935.2018.2.203-212.

12. Ерофеев, В.Т. Исследование стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов Черноморского побережья / В.Т. Ерофеев, И.В. Смирнов, П.В. Воронов, В.В. Афонин, Е.Н. Каблов, О.В. Старцев, В.О. Старцев, И.М. Медведев // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11–5. – С. 911–923.

13. Зоткина, М.М. Изменение декоративных свойств пигментированных цементных композитов в результате воздействия биологических агрессивных сред / М.М. Зоткина, В.Б. Зоткин, Д.В. Емельянов, Е.А. Захарова, Н.В. Черушова, И.В. Ерофеева, В.В. Афонин // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: сб. матер. Четырнадцатой Международной научно-технической конференции / Отв. ред. В.Т. Ерофеев. – 2015. – С. 221–224.

14. Максимова И.Н. Регрессионные взаимосвязи между параметрами качества структуры и конструкционной прочности цементного камня / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев // Региональная архитектура и строительство. 2021. – № 1 (46). – С. 28-34.

15. Меркулов, Д.А. Оптимизация гранулометрического состава кварцenaполненных полиэфирных композитов / Д.А. Меркулов, С.А. Коротаев, В.Т. Ерофеев // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2017. – № 5 (993). – С. 31–33.

16. Афонин, В.В. Эвристический подход к решению двухкритериальной задачи оптимизации композиционных материалов / В.В. Афонин, И.В. Ерофеева, В.А. Федорцов, Д.В. Емельянов, Н.Ю. Подживотов // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, вып. 11. – С. 1357–1366. – DOI: 10.22227/1997-0935.2018.11.1357-1366.

17. Димитриенко, Ю.И. Оптимизация многокомпонентных дисперсноармированных композитов на основе сплайн аппроксимации / Ю.И. Димитриенко, А.Н. Дроглоуб, Е.А. Губарева // Наука и образование. Электрон. журнал. – 2015. – № 02. – С. 216–233. – DOI: 10.7463/0215.0757079.

18. Gibbons, J.D. Nonparametric Statistical Inference: 4th. ed. / J.D. Gibbons, S. Chakraborti. – New York, Basel: Marcel Dekker. 2003. – 408 p.

19. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

1. Solovyov, V.G. Influence of mineral fiber on the resistance of heavy concrete to static and cyclic loads / V.G. Solovyov, E.A. Shuvalova, V.V. Shalamov // *Izvestiya vuzov. Construction*. – 2020. – No. 1. – P. 78–86. – DOI 10.32683/0536-1052-2020-733-1-78-86.
2. Kalashnikov, V.I. Highly efficient self-compacting powder-activated sand concretes and fiber concretes / V.I. Kalashnikov, V.M. Volodin, I.V. Erofeeva, D.A. Abramov // *Modern problems of science and education*. – 2015. – No. 1–2. – P. 110.
3. Kablov, E.N. System analysis of the climate influence on the mechanical properties of polymer composite materials according to the data of domestic and foreign sources / E.N. Kablov, V.O. Startsev // *Aviation materials and technologies*. – 2018. – No. 2. – P. 47–58.
4. Kalashnikov, V.I. Suspension-filled concrete mixtures for powder-activated concrete of a new generation / V.I. Kalashnikov, V.T. Erofeev, O. V. Cockroaches // *Izvestiya vuzov. Construction*. – 2016. – No. 10–11 (694–695). – P. 120.
5. Shakhova, L.D. Investigation of factors affecting the fluidity of cements / L.D. Shakhova, E.S. Chernositova, L.S. Shchelokova, Yu.V. Denisov // *Bulletin of BSTU im. V.G. Shukhov*. 2019. – No. 11. – P. 8–16. – DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-8-16.
6. Ezerskiy, V.A. Methodology for comparative assessment of the quality of multicomponent cement composites with the use of man-made waste / V.A. Ezerskiy, N.V. Kuznetsova, A.D. Seleznev // *Construction and reconstruction*. – 2018. – No. 3 (77). – P. 89–97.
7. Parfenov, A.A. Work and destruction of concrete in conditions of high and low temperatures / A.A. Parfenov, O.A. Sivakova, O.A. Gusar, V.V. Balakireva // *Building materials*. – 2019. – No. 3. – P. 64–66. – DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-64-66.
8. Erofeev, V.T. On the structural properties of the matrix phase of high-strength cement composites / V.T. Erofeev, N.I. Makridin, I.N. Maksimova // *Industrial and civil construction*. – 2019. – No. 3. – P. 4–10. – DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.04-10.
9. Lesnov, V.V. Investigation of the strength properties of filled plasticized cement matrices intended for frame composites / V.V. Lesnov, V.T. Erofeev, V.V. Afonin // *Regional architecture and engineering*. – 2018. – No. 4 (37). – P. 71–79.
10. Erofeeva, I.V. Research of the influence of increased humidity and variable elevated temperatures on the damping properties of cement composites / I.V. Erofeeva, V.A. Fedortsov, V.V. Afonin, D.V. Emelyanov, N.Yu. Podzhivotov, V.V. Moiseev, A.N. Kremcheev // *CHEMICAL BULLETIN*. – 2018. – Vol. 1, No. 3. – P. 62–71.
11. Semeinykh, N.S. Assessment of physical and mechanical properties of porous fillers for light concrete / N.S. Semeinykh, G.V. Sopegin, A.V. Fedoseev // *Bulletin of MGSU*. – 2018. – Vol. 13, Issue. 2 (113). – P. 203–212. – DOI: 10.22227/1997-0935.2018.2.203-212.
12. Erofeev, V.T. Investigation of the resistance of polymer coatings under the influence of climatic factors of the Black Sea coast / V.T. Erofeev, I. V. Smirnov, P.V. Voronov, V.V. Afonin, E.N. Kablov, O.V. Startsev, V.O. Startsev, I.M. Medvedev // *Fundamental Research*. – 2016. – No. 11–5. – P. 911–923.
13. Zotkina, M.M. Change of decorative properties of pigmented cement composites as a result of the impact of biological aggressive environments / M.M. Zotkin, V.B. Zotkin, D.V. Emelyanov, E.A. Zakharova, N.V. Cherushova, I.V. Erofeeva, V.V. Afonin // *Topical issues of architecture and construction: collection of materials of the Fourteenth International Scientific and Technical Conference / Executive editor V.T. Erofeev*. – 2015. – P. 221–224.
14. Maksimova, I.N. Regression relationships between the parameters of the quality of the structure and the structural strength of the cement stone / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev // *Regional architecture and engineering*. – 2021. – No. 1 (46). – P. 28–34.
15. Merkulov, D.A. Optimization of the particle size distribution of quartz-filled polyester composites / D.A. Merkulov, S.A. Korotaev, V.T. Erofeev // *BST: Bulletin of construction equipment*. – 2017. – No. 5 (993). – P. 31–33.
16. Afonin, V.V. A heuristic approach to solving a two-criterion problem of optimization of composite materials / V.V. Afonin, I. V. Erofeeva, V.A. Fedortsov,

- D.V. Emelyanov, N.Yu. Podzhivotov // *Bulletin of MGSU*. – 2018. – Vol. 13, Issue. 11. – P. 1357–1366. – DOI: 10.22227/1997-0935.2018.11.1357-1366.
17. Dimitrienko, Yu.I. Optimization of multicomponent dispersion-reinforced composites based on spline approximation / Yu.I. Dimitrienko, A.N. Drogozub, E.A. Gubareva // *Science and Education. Electron. magazine*. – 2015. – No. 02. – P. 216–233. – DOI: 10.7463/0215.0757079.
18. Gibbons, J.D. *Nonparametric Statistical Inference: 4th. ed.* / J.D. Gibbons, S. Chakraborti. – New York, Basel: Marcel Dekker. 2003. – 408 p.
19. Kobzar, A.I. *Applied Mathematical Statistics. For engineers and scientists* / A.I. Kobzar. – M.: FIZMATLIT, 2006. – 816 p.

УДК 691.327:539.4

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

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

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

Penza State University of Architecture
and Construction

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

Makridin Nikolai Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Technology of Building Materials
and Woodworking»

Maksimova Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Quality Management and
Construction Technologies»
E-mail: maksimovain@mail.ru

СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗЫ КЕРАМЗИТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ

Н.И. Макридин, И.Н. Максимова

Рассмотрены физико-химические основы материаловедения керамзитового заполнителя – состав, структура, свойства материала. На основе обобщения литературной информации и результатов собственных исследований выявлено оптимальное содержание кристаллической фазы для керамзитового гравия с насыпной плотностью 500 кг/м³ и более, которое составляет 50–60 % от общего объема твердой фазы керамзитового гравия и зависит от состава керамической массы, количества и химической активности плавней, газовой среды, температуры, длительности обжига и выдержки материала при максимальной температуре.

Ключевые слова: глинистые минералы; кристаллическая фаза; кристаллическая решетка; элементарная ячейка; центр, ось и плоскости симметрии; аллотропия; сингонии; структурная единица глинистых минералов

COMPOSITION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE CRYSTALLINE PHASE OF EXPANDED CLAY AGGREGATE

N.I. Makridin, I.N. Maksimova

Physical and chemical bases of materials science of expanded clay aggregate – composition, structure, and properties of the material are considered. Based on the generalization of scientific information and the results of our own research, an optimal content of the crystalline phase for expanded clay gravel with a bulk density of 500 kg/m³ or more is revealed, which is 50–60 % of the total volume of the solid phase of expanded clay gravel and depends on the composition of the ceramic mass, the amount and chemical activity of the melts, gas medium, temperature, duration of firing and curing the material at maximum temperature.

Keywords: clay minerals; crystal phase; crystal lattice; unit cell; center, axis and planes of symmetry; allotropy; syngonies; structural unit of clay minerals

Как известно, многие природные и искусственные каменные материалы, в том числе и керамзитовый заполнитель, в своем составе содержат и кристаллическую, и аморфную (стекловидную) фазы и являются достаточно сложными неравновесными системами. Соотношение между объемами кристаллической и аморфной фаз, а также их взаимное расположение оказывают огромное влияние на свойства материалов, имеющих такую структуру. Типичными представителями подобных материалов являются пористые заполнители, ситаллы, фарфор и др. керамические материалы.

Кристаллической фазе подобных материалов свойственно упорядоченное расположение частиц в строго определенных точках пространства, образующих кристаллическую решетку. Таким образом, *кристаллической решеткой* называется расположение частиц, характеризующееся периодической повторяемостью в трех измерениях. Точки, в которых находятся частицы, входящие в состав кристалла, называются *узлами кристаллической решетки*. Для кристаллов характерен *дальний порядок* в расположении атомов.

Так как кристаллическая решетка может быть представлена периодичностью, повторяемостью в трех измерениях, можно выделить ячейку, трансляцией которой в пространстве можно построить весь кристалл. *Элементарной ячейкой* называется наименьший объем, трансляцией которого в трех измерениях можно полностью воспроизвести структуру кристалла.

Если в кристалле провести три направления x, y, z , не лежащих в одной плоскости, то расстояние между частицами, расположенными по этим направлениям, в общем случае неодинаковы и, соответственно, равны a, b, c , а поэтому различны и свойства, отражающие *анизотропию* анализируемых кристаллических твердых тел.

Кристаллы характеризуются внешней симметрией в расположении частиц, которая выражается наличием трех элементов симметрии: центра, оси и плоскости симметрии. *Центр симметрии* – точка, делящая пополам все соединительные между внешними поверхностями кристалла прямые линии, проведенные через нее по любому направлению. *Ось симметрии* – это такая линия, при повороте вокруг которой на определенный угол получается полное совпадение нового положения с прежним. *Плоскость симметрии* делит кристалл на две части, относящиеся друг к другу, как предмет к своему зеркальному отражению. Чем больше элементов симметрии, тем выше внешняя симметрия кристалла. Идеально симметричной фигурой является шар.

Для описания элементарной ячейки кристаллической решетки используют шесть величин: три отрезка, равные расстояниям до ближайших элементарных частиц по осям координат a, b, c , и три угла между этими ближайшими осями. Соотношения между этими величинами определяют форму ячейки. По форме элементарных ячеек все кристаллы подразделяют на семь систем, или *сингоний* (табл. 1) [1–5].

Т а б л и ц а 1

Соотношение между сторонами и углами в кристаллах разных систем [2]

Система	Соотношение между сторонами и углами
Триклинная	$a \neq b \neq c; \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
Моноклинные	$a \neq b \neq c; \alpha = \beta = 90^\circ; \gamma \neq 90^\circ$
Ромбическая	$a \neq b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Ромбоэдрическая	$a = b = c; \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
Гексагональная	$a = b \neq c; \alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$
Тетрагональная	$a = b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Кубическая	$a = b = c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

Кристаллы низшей сингонии характеризуются меньшей симметрией, кристаллы более высокой категории сингонии имеют более совершенную форму кристаллической решетки и, следовательно, являются более устойчивыми в определенных условиях существования.

Математически можно доказать, что в трехмерном пространстве возможны в общей сложности четырнадцать различных типов решеток, хотя это число путем подходящего выбора непримитивных элементарных ячеек может быть сокращено до семи. По имени их первооткрывателя эти четырнадцать решеток были названы решетками Уильяма Брэгга [2, 4]. Им соответствуют семь встречающихся в природе

кристаллических систем, характеризующихся элементарными или более крупными ячейками.

Для многих веществ в кристаллическом состоянии характерен полиморфизм, т.е. способность вещества существовать в виде нескольких кристаллических структур с различными свойствами. Полиморфизм простых веществ называется *аллотропией*. Известны полиморфные модификации углерода (алмаз, графит), кварца (α -кварц, β -кварц), железа, вольфрама и др.

В общем случае кристаллическая фаза пористых заполнителей складывается из разрозненных кристаллов, часть которых относится к природным – первичным кристаллам, а часть – к новообразованиям, возникшим в период формирования пиропластической массы – сложного образования, состоящего из расплава и твердых включений (первичных кристаллов – кварца, некоторых полевых шпатов и вторичных – муллита, шпинелей и пр.), а также при охлаждении гранул (магнетита, гематита, волластонита и пр.).

В [6, 8, 9] отмечается, что для производства керамзита применяют исключительно глины монтмориллонитового или иллитового (гидролюдистого) составов. В последние годы для получения высокопрочного заполнителя применяют каолины и их смеси с иллитами и монтмориллонитами.

Рассмотрим структуру минералов этих глин более подробно.

Гидролюды (иллиты). Группа гидролюдов, или иллитов, включает мусковитовые минералы со структурной формулой $(K, H_3O)Al_2(OH)_2[AlSi_3O_{10}] \cdot nH_2O$, гидробиотитовые $(KH_3O)(MgFe)(OH)_3[AlSi_3O_{10}] \cdot nH_2O$.

Структурная единица слюды представляет собой сочетание двух наружных тетраэдрических кремнекислородных слоёв и одного октаэдрического, заключенного между ними. Вершины тетраэдров наружных кремнекислородных слоев этой структурной единицы повернуты к центру ее и связаны с октаэдрическим слоем в элементарный слой путем соответствующего замещения гидроксидов атомами водорода. В слюдах некоторая часть атомов кремния всегда замещена алюминием, в результате чего возникает отрицательный заряд, который уравнивается ионами калия, располагающимися между элементарными слоями в гексагональных пустотах поверхности кислородного слоя. Соседние слои накладываются один на другой таким образом, что ион калия отстоит на равном расстоянии от двенадцати атомов кислорода, по шесть в каждом слое. Межплоскостное расстояние слюды составляет приблизительно 10 Å.

В результате гидролиза слюды постепенно переходит в гидролюду, которая, выветриваясь, превращается к конечному счету в каолинит или монтмориллонит. Вследствие этих превращений образуется ряд гидролюдов: гидромусковит, гидропаргонит, вермикулит, глоуконит и гидробиотит. Гидролюды по своим структурным и физико-химическим свойствам как слоистые силикаты из трехэтажных слоев занимают промежуточное положение между слюдами и монтмориллонитом. Важным фактором, определяющим это промежуточное положение, является содержание в них калия и воды. Катионы калия располагаются между силикатными слоями.

Группа *монтмориллонита* включает ряд сходных по структуре набухающих минералов: монтмориллонит $Al_2(OH)_2[Si_4O_{10}] \cdot nH_2O$, бейделлит $(R_2H_3O) \cdot Al_2(OH)_2[AlSi_3O_{10}] \cdot nH_2O$, а также разновидности монтмориллонита: нонtronит, сапонит, медемонтит, гекторит, креолит. Среди минералов группы монтмориллонита известно около 20 различных наименований.

Согласно существующим представлениям, структура монтмориллонита складывается двумя тетраэдрическими кремнекислородными слоями, разделенными в центре октаэдрическим алюмокислородным слоем. Все вершины тетраэдров повернуты в одном направлении к центру слоя. Тетраэдрические и октаэдрические слои связаны так, что вершины тетраэдров каждого кремнекислородного слоя и один из гидроксильных слоев октаэдрического листа образуют общий слой. Общими для тетраэдрического и октаэдрического слоев являются атомы кислорода вместо гидроксидов. Эти слои бесконечны в направлениях *a* и *b*, и накладываются один на другой в направ-

лении *c*. В межслоевых промежутках монтмориллонитов содержится непостоянное количество воды. Этим обусловлен нестрогий период повторяемости слоев, близкий к 14 Å. Замещение обменных ионов, термическая обработка и насыщение многоатомными спиртами изменяют период повторяемости слоев от 10 до 28,4 Å.

Среди минералов монтмориллонитовой группы особое место занимает бейделлит. Бейделлиту свойственно максимальное изоморфное замещение кремния тетраэдрических слоев алюминием. На основании результатов рентгеновских исследований считают, что бейделлит состоит из двухэтажных каолинитовых и трехэтажных монтмориллонитовых слоев, связанных между собой водородными или молекулярными силами.

Нонtronит по составу изменяется от железосодержащего монтмориллонита до минерала, в котором Fe^{3+} является преобладающим компонентом в октаэдрической позиции кристаллической решетки. В монтмориллоните алюминий гидраргилитового слоя может замещаться Fe^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Li^+ , в результате чего образуется ряд разновидностей монтмориллонита.

Каолинит. Как и все глинистые минералы, каолинит – слоистый силикат, построенный из наложенных один на другой слоев. Каждый структурный слой каолинита состоит из двух элементарных слоев: кремнекислородного тетраэдрического и алюмокислородного октаэдрического, сочлененных в один слой так, что вершины октаэдров примыкают к вершинам тетраэдров. Каолинит характеризуется правильным чередованием слоев с периодом около 7 Å. На диаграммах дифракции рентгеновских лучей присутствуют сильные рефлексы 7,1 и 3,5 Å, исчезающие при температуре нагрева образца 450 °С.

Экспериментально установлено, что для каолинита характерны незначительные изоморфные замещения. Ион кремния может частично замещаться ионом алюминия, реже – ионом железа. Наблюдается также небольшая степень замещения алюминия железом или титаном. Кристалличность каолинита хорошо выражена в его габитусе в виде шестиугольных пластинок заметной толщины с углом между гранями 106–140°. У плохо окристаллизованного каолинита межплоскостное расстояние несколько больше – 7,15–7,2 Å, и соответствующий ему рефлекс хуже выражен по сравнению с хорошо окристаллизованным минералом, что позволяет предполагать существование некоторого количества межслоевой воды между силикатными слоями. Данные дегидратации подтверждают присутствие такой воды.

Некоторые важные свойства минералов (кристаллов), входящих в состав пористых заполнителей [7], представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Свойства минералов пористых заполнителей

Название и состав минерала	Сингония	Габитус, оптическая ориентировка	Окраска в шлифе	Твердость по Моосу
1	2	3	4	5
Оксиды				
Вюстит FeO	Кубическая	Зерна	Серая	5-6
Периклаз MgO	Кубическая	Кубы, октаэдры	Бесцветная	5,5
Известь CaO	Кубическая	Кубы, октаэдры	Бесцветная	6
Гематит Fe ₂ O ₃	Тригональная	Пластинки	Желтая	5-6
Кварц (β) SiO ₂	Тригональная	Зерна	Красный → коричневый	6
Кристобалит (β) SiO ₂	Тетрагональная	Сферолиты, дендриты	Дендритные кристаллы	7
Тридимит (β) SiO ₂	Ромбическая	Сферолиты	Сферолиты	6,5

1	2	3	4	5
Шпинели (группа)				
Магнезиальная $MgO \cdot Al_2O_3$	Кубическая	Октаэдры	Бесцветная	8
Герцинит $FeO \cdot Al_2O_3$	Кубическая	Зерна	Зеленый	7,5 – 8
Магнезиоферрит $MeO \cdot Fe_2O_3$	Кубическая	Октаэдры	Коричнево-то-черный	6-6,5
Магнетит $FeO \cdot Fe_2O_3$	Кубическая	Октаэдры	Серо-стальной	6
Силикаты островные и кольцевые 5-8				
Белит $\beta-2CaO \cdot SiO_2$	Моноклинная	Копьевидные кристаллы	Бесцветный	5-6
$\gamma-2CaO \cdot SiO_2$	Ромбическая	Призмы	Бесцветный	5-6
Мервинит $3CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$	Моноклинная	Таблички	Бесцветный	6
Монтчеллит $CaO \cdot MgO \cdot SiO_2$	Ромбическая	Призмы, таблички	Бесцветный	5-5,5
Железистый монтчеллит $CaO \cdot FeO \cdot SiO_2$	Ромбическая	Иглы и призмы	Желтый	5
Оливины (группа)				
Форстерит $2MgO \cdot SiO_2$	Ромбическая	Зерна	Бесцветный	6,5-7
Ранкинит $3CaO \cdot SiO_2$	Моноклинная	Зерна, призмы	Бесцветный	5-6
Куспидин $CaO \cdot 2SiO_2 \cdot CaF$	Моноклинная	Зерна	Бесцветный	5-6
Силикокарнотит $5CaO \cdot P_2O_5 \cdot SiO_2$	Ромбическая	Призмы, пластинки	Бесцветный	4-5
Кордиерит $2MeO \cdot 2Al_2O_3 \cdot SiO_2$	Гексогональные	Шестигранные призмы	Бесцветный	7
Мелилиты (группа)				
Геленит $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$	Тетрагональные	Призмы, пластинки	Бесцветный	5,5
Окерманит $2CaO \cdot MeO \cdot 2SiO_2$	Тетрагональные	Призмы и таблички	Бесцветный	5,5
Муллит $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	Ромбическая	Иглы, зерна	Бесцветный	6
Силикаты цепочечные				
Волластонит $\beta-CaO \cdot 3SiO_2$	Триклинные	Призмы, иглы	Бесцветный	5
Псевдоволластонит $\alpha-CaO \cdot 3SiO_2$	Триклинные	Призмы, иглы	Бесцветный	5
Пироксены ромбические (группа)				
Энстатит $MgO \cdot SiO_2$	Ромбическая	Таблички, призмы	Бесцветный	5-6
Гиперстен $MeO \cdot FeO \cdot 2SiO_2$	Ромбическая	Призмы, зерна	Светло-зеленый	5
Пироксены моноклинные				
Клннээнстатит $MeO \cdot SiO_2$	Ромбическая	Таблички, призмы	Бесцветный	6

1	2	3	4	5
Диопсид $CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$	Ромбическая	Призмы	Бесцветный	6-7
Геденбергит $CaO \cdot FeO \cdot 2SiO_2$	Ромбическая	Призмы	Светло-зеленый	5-6
Эгирин $Na_2O \cdot Fe_2O_3 \cdot 4SiO_2$	Ромбическая	Призмы, иглы	Зеленый	6,5
Авгит $CaO \cdot 2(Mg,Fe)O$	Ромбическая	Призмы и таблички	Зеленый	5,5
Силикаты листовые				
Мусковит $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$	Моноклинная	Пластинки и листочки	Бесцветный	2-2,5
Гидромусковит (состав непостоянный)	Моноклинная	Пластинки и листочки	Бесцветный	2-2,5
Флогопит $K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная	Пластинки и листочки	Бесцветный	2-2,5
Гидрофлогопит (состав непостоянный)	Моноклинная	Пластинки и листочки	Бесцветный	2-2,5
Биотит $K_2O \cdot 6FeO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная	Пластинки и листочки	Зеленый	2-2,5
Гидробиотит (состав непостоянный)	Моноклинная	Пластинки и листочки	Коричневый	2-2,5
Силикаты каркасные				
Лейцит $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$	Триклинная	Зерна	Бесцветный	5,5-6
Ортоглаз $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	Моноклинная	Зерна	Бесцветный	6
Плагиоглазы				
Альбит $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	Триклинная	Зерна	Бесцветный	6,5
Анортит $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	Триклинная	Призмы	Бесцветный	6

Легкие пористые заполнители с насыпной плотностью менее 300 кг/м³ получают из силикатного стекла (бой строительного и тарного стекла); топливных шлаков жидкого удаления определенного химического состава, при котором не происходит кристаллизация расплава и стекловидной фазы; из некоторых глин, преимущественно монтмориллонитового состава с небольшим содержанием кварцевых включений.

При обжиге монтмориллонитовых и иллитовых глин глинистая фракция практически полностью переходит в расплав.

Тонкодисперсные примеси (до 1 мкм) таких минералов, как слюды, продукты диссоциации карбонатов, кварц, полевой шпат, также переходят в расплав; более крупные частицы лишь частично растворяются в расплаве. У пылеватых зерен многих минералов размером от 10 до 50 мкм поверхностная зона расплавляется в силикатном расплаве. Некоторые остатки зерен, не перешедшие в расплав, вписываются в перегородки между пора́ми без ухудшения микроструктуры керамзита. Большая часть крупных зерен (более 10 мкм) либо разрывает стенки пор, делая структуру заполнителя с

крупными сообщающимися порами, либо способствует увеличению толщины межпоровой перегородки, благодаря чему они способны вписаться в нее.

Вспученная гранула пористого заполнителя плотностью менее $0,5 \text{ кг/дм}^3$ при температурах вспучивания подобна пене, являющейся, по существу, коллоидной системой, дисперсной фазой которой являются пузырьки газа, а дисперсионной средой – жидкость, в нашем случае – силикатный расплав. Пузырьки в пене прижаты друг к другу и разделены тонкими прослойками дисперсионной среды. Стенки, разделяющие поры, соединяются, образуя утолщения, называемые треугольниками Плато. Крупные зерна размером более 10 мкм, представленные обычно кварцем, при небольшом количестве могут располагаться в углах соприкосновения пор. Плато установил, что в одном месте соединяются всегда три пенные пленки (три стенки пузырьков), которые образуют углы около 120° . Вследствие этого возникает капиллярное давление, вызывающее отсос жидкости из пленок к утолщенным местам соединений, и пенные пленки постепенно утончаются. Поэтому через некоторое время, различное для жидкостей разной вязкости, пенные пленки достигают очень малой толщины. Пузырьки приобретают форму многостенных клеток-сот. В таком состоянии пена долго находиться не может. Наружные, наиболее тонкие пленки через некоторое время начинают рваться одна за другой, и пена постепенно разрушается.

Для образования и стабилизации пены в жидкость вводят поверхностно-активные вещества. Адсорбционные слои, образуемые поверхностно-активными веществами, стабилизируют пенную пленку и замедляют вытекание из нее жидкости. Вещества, стабилизирующие пены, называют пенообразователями или пеностабилизаторами. Они бывают двух типов: те, которые дают малоустойчивые пены со временем жизни до нескольких десятков секунд, и те, которые образуют стабильные пены, – их называют детергентами – со временем жизни порядка минут и часов. По данным [6], наилучшими пенообразователями для силикатного расплава являются (в порядке возрастания положительного эффекта): тонко измельченные антрацит, кокс, сажа.

Главный фактор, влияющий на устойчивость пены, – это концентрация стабилизатора на поверхности пленок. При очень малых концентрациях стабилизатора устойчивость пены невелика. С повышением концентрации стабилизатора устойчивость пены растет, достигая максимума при некоторой величине, специфической для каждого детергента. Последующее увеличение концентрации детергентов не ведет к повышению устойчивости пены.

Высказанные соображения помогают более четко понять механизм взаимодействия твердых включений разного качества с силикатным расплавом. Очевидно, что размер (диаметр) твердого включения не должен быть больше половины толщины разделительной стенки в наиболее тонком месте. Только в этом случае возможно беспрепятственное перемещение внутрисластинчатого расплава в пластинке. В том случае, когда диаметры твердых включений, внесенных в расплав, имеют большую величину, чем толщина стенки, они тормозят развитие элементов ячеек (уменьшают их вспучивание), поскольку возрастает необходимость дополнительных порций расплава на залечивание дефектов в стенках пузырей. Чем больше размер кристаллов и выше их концентрация, тем выше вероятность разрыва пленок, слияния пор. Структура пористого заполнителя получается рваной с сообщающимися порами. Заполнитель с такой структурой отличается высоким водопоглощением и низкой прочностью. При затвердевании расплава кристаллы, зафиксированные в стенках пор, являются концентраторами напряжений, и это также снижает прочность заполнителя.

Кристаллы кварца, муллита, шпинели, магнетита и пр. хорошо смачиваются расплавом, и поэтому они располагаются в стенках пузырей.

Частицы сажи, молотых антрацита и кокса плохо смачиваются и выдавливаются расплавом на внутреннюю поверхность газовых пузырьков, и, как было сказано выше, являясь детергентами, стабилизируют пену. Углерод в виде сажи, кокса или антрацита является главным пенообразователем (газообразователем) таких материалов, как стеклозит, шлакозит, керамзит.

Кристаллизация гематита на поверхности гранул, безусловно, увеличивает и толщину корочки, и плотность гранул, но образующаяся корочка предотвращает слипание гранул друг с другом. С этой точки зрения данное явление следует считать положительным, поскольку отпадает необходимость в применении специальных мер по предотвращению слипания гранул в процессе обжига, например метода «опудривания» гранул огнеупорным порошком.

Многочисленные исследования показывают, что устойчивая пленка из кристаллов гематита на поверхности гранул образуется при содержании оксидов железа в алюмосиликатном расплаве более 5 %.

Средняя толщина межпоровых стенок заполнителей с насыпной плотностью $700\text{--}800 \text{ кг/м}^3$ превышает 150 мкм, поэтому в стенках пор этих заполнителей размещаются практически все зерна кристаллических новообразований и кварца, которые могут находиться в глинах, отходах угледобычи и углеобогащения, шлаках и золах ТЭС.

Общее содержание кристаллической фазы зависит от состава керамической массы, количества и химической активности плавней, газовой среды, температуры, длительности обжига и выдержки материала при максимальной температуре. Достигая 40–70 % (оптимальное содержание 50–60 %) от общего объема твердой фазы, кристаллическая фаза оказывает существенное влияние на физико-технические свойства заполнителей.

Весьма активной составляющей кристаллической фазы является остаточный кварц. Содержание кварца в твердой фазе заполнителя высокой прочности изменяется от 20 до 26 %. Размер зерен кварца колеблется в среднем от 2–3 до 120–150 мкм, средний размер зерен кварца не превышает 10–25 мкм. Обычно поверхность зерен кварца оплавлена и разъедена полевошпатовым расплавом. При наличии активного полевошпатового расплава и достаточной температуре обжига ширина (толщина) каймы оплавления зерен остаточного кварца составляет 2–5 мкм. Зерна размером менее 2 мкм, как правило, переходят в расплав.

Установлено, что кварцевые зерна и стекловидная составляющая испытывают равномерное во всех направлениях растяжение: радиальные напряжения во всей области являются растягивающими; тангенциальные напряжения в стеклофазе на границе с кварцевым зерном являются сжимающими. Специальными исследованиями и обработкой результатов с помощью уравнений, характеризующих напряженное состояние и радиальные деформации, определены величина и распределение напряжений в кварцевой составляющей и окружающей стеклофазе. По мере удаления от кварца они уменьшаются, проходят через нуль и на границе области становятся растягивающими. Образующиеся микронапряжения прямо пропорциональны содержанию остаточного кварца. Эти напряжения пропорциональны общей поверхности всех зерен кварца в единице объема черепка и проявляются в наибольшей мере, когда радиус зерен кварца в три раза больше толщины растворенного слоя. Поэтому наиболее опасным местом является межфазная граница соприкосновения зерен кварца со стеклофазой.

Выше отмечалась способность кварца к модификационным превращениям в зависимости от температурных условий. При переходе из одной модификации в другую, например β -кварца в α -кварц, α -кварца в α -кристоболит, объемные изменения составляют 0,6–19,8 %.

Влияние остаточного кварца на показатели физико-технических свойств изделий велико и разносторонне. Оно зависит от количества кварца и размера его зерен. При содержании кварца 22–28 % он способствует повышению прочности заполнителей. В больших количествах кварц снижает прочность и особенно термическую стойкость, так как обладает более высоким коэффициентом термического расширения, чем стекловидная фаза.

Не только количество, но и размер зерен кварца оказывает влияние на свойства изделий. Так, при размере зерен кварца до 10 мкм напряжения между ними и стекловидной фазой составляют 10 МПа. С увеличением зерен кварца до 20 мкм за счет разности коэффициентов термического расширения стеклофазы и кварца напряжения между стекловидной фазой и кварцем возрастают до 30 МПа. Для сравнения отметим, что напряжения между стеклофазой и муллитом составляют всего

0,5–1,2 МПа. Зерна кварца размером более 10–30 мкм теряют частично прочность вследствие температурных превращений и растрескивания под действием напряжений, что уменьшает прочность заполнителей.

Отрицательное влияние на прочность заполнителя оказывают кристобалит и гематит. Образование кристобалита и гематита в процессе обжига снижает прочность заполнителя. При образовании кристобалита из аморфного кремнезема возникают крупные каналные проницаемые поры, значительно ослабляющие структуру керамических изделий. Согласно [10–12], превращение аморфного кремнезема, равно как и ввод в массу искусственно приготовленного кристобалита, уменьшает прочность керамических изделий. Микроскопические исследования обожженных при различных температурах образцов с добавкой аморфного кремнезема показали, что последний замещается кристобалитом, а между кристаллами образуются поры. С повышением температуры содержание кристобалита увеличивается, при этом увеличиваются и размеры пор. При вводе предварительно полученного кристобалита плотность и прочность изделий также снижаются. Особенность структуры образцов с добавкой кристобалита – наличие трещин. Зерна искусственно введенного кристобалита в керамическом материале окружены концентрическими трещинами, образовавшимися в результате его превращений, что обуславливает разрыхление структуры материала, снижение его плотности и прочности.

Список литературы

1. Петров, В.П. Пористые заполнители из отходов промышленности / В.П. Петров, С.А. Токарева // *Строительные материалы*. – 2011. – № 12. – С. 46–51.
2. Вайсмантель, Х. Высокочистые кристаллические материалы в природе и технике / Х. Вайсмантель // *Материалы будущего* / под ред. проф. А. Неймана; пер. с нем. под ред. В.Н. Красовского. – Л.: Химия, 1985. – С. 59–72.
3. Хюттер, А. Силикатное сырье и строительные материалы / А. Хюттер // *Материалы будущего* / под ред. проф. А. Неймана; пер. с нем. под ред. В.Н. Красовского. – Л.: Химия, 1985. – С. 107–136.
4. Мотт, Н. Твердое тело / Н. Мотт // *Современные материалы* / пер. с англ. В.М. Кардонского; под ред. В.И. Саррака. – М.: Мир, 1970. – С. 30–50.
5. Гилман, Дж.Д. Природа керамических материалов / Дж. Д. Гилман // *Современные материалы* / пер. с англ. В.М. Кардонского; под ред. В.И. Саррака. – М.: Мир, 1970. – С. 71–86.
6. Петров, В.П. Физико-химические основы и сырьевая база производства высокопрочных пористых заполнителей / В.П. Петров // *Строительные материалы*. – 2005. – № 8. – С. 28–30.
7. Виноградов, Б.Н. Петрография искусственных пористых заполнителей / Б.Н. Виноградов; под ред. М.П. Элинзона. – М.: Стройиздат, 1972. – 135 с.
8. Максимова, И.Н. Деформативные особенности керамзитового гравия при кратковременном силовом нагружении / И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Н.И. Макридин, Ю.В. Полубарова // *Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование*. – 2015. – № 1. – С. 10–16.
9. Макридин, Н.И. О структуре и свойствах керамзитового заполнителя для керамзитобетонных повышенной прочности / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Р.С. Ковалев // *Вестник гражданских инженеров*. – 2012. – № 4 (33). – С. 164–167.
10. Максимов, Б.А. Влияние кристаллизации на свойства шлакозита / Б.А. Максимов, С.Ф. Коренькова, В.П. Петров // *Известия вузов*. – 2004. – № 4. – С. 61–65.
11. Макридин, Н.И. Механическое поведение конструкционного керамзитобетона при осевом сжатии / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // *Строительные материалы*. – 2009. – № 1. – С. 51–54.
12. Макридин, Н.И. Структура и свойства аморфной фазы пористых заполнителей / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // *Региональная архитектура и строительство*. – 2021. – № 1 (46). – С. 35–40.

References

1. Petrov, V.P. Porous aggregates from industrial waste / V.P. Petrov, S.A. Tokareva // *Construction Materials*. – 2011. – No. 12. – P. 46–51.
2. Weissmantel, H. High-purity crystalline materials in nature and technology / H. Weissmantel // *Materials of the future* / edited by prof. A. Neumann; trans. from it. edited by V.N. Krasovsky. – L.: Chemistry, 1985. – P. 59–72.
3. Hutter, A. Silicate raw materials and building materials / A. Hutter // *Materials of the future* / edited by prof. A. Neumann; trans. from it. edited by V.N. Krasovsky. – L.: Chemistry, 1985. – P. 107–136.
4. Mott, N. Solid body / N. Mott // *Modern materials* / translated from the English by V.M. Cardonsky; edited by V.I. Sarrak. – M.: Mir, 1970. – P. 30–50.
5. Gilman, J.D. The nature of ceramic materials / J.D. Gilman // *Modern materials* / translated from the English by V.M. Cardonsky; edited by V.I. Sarrak. – M.: Mir, 1970. – P. 71–86.
6. Petrov, V.P. Physico-chemical bases and raw materials base for the production of high-strength porous aggregates / V.P. Petrov // *Building Materials*. – 2005. – No. 8. – P. 28–30.
7. Vinogradov, B.N. Petrography of artificial porous aggregates / B.N. Vinogradov; ed. by M. P. Elinzon. – M.: Stroyizdat, 1972. – 135 p.
8. Maksimova, I.N. Deformative features of expanded clay gravel under short-term force loading / I.N. Maksimova, V.T. Erofeev, N.I. Makridin, Yu.V. Polubarova // *Bulletin of PGUAS: construction, science and education*. – 2015. – No. 1. – P. 10–16.
9. Makridin, N.I. On the structure and properties of expanded clay aggregate for expanded clay concrete / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, R.S. Kovalev // *Bulletin of Civil Engineers*. – 2012. – No. 4 (33). – P. 164–167.
10. Maksimov, B.A. The influence of crystallization on the properties of schlagosite / B.A. Maksimov, S.F. Korenkova, V.P. Petrov // *Izvestiya vuzov*. – 2004. – No. 4. – P. 61–65.
11. Makridin, N.I. Mechanical behavior of structural expanded clay concrete under axial compression / N.I. Makridin, I.N. Maksimova // *Construction Materials*. – 2009. – No. 1. – P. 51–54.
12. Makridin, N.I. Structure and properties of the amorphous phase of porous fillers // N.I. Makridin, I.N. Maksimova // *Regional architecture and engineering*. – 2021. – No. 1 (46). – P. 35–40.

УДК 519.7:69

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

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

Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет
Россия, 190005, Санкт-Петербург,
2-я Красноармейская ул., д. 4

Королев Евгений Валерьевич,
доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе
E-mail: prorector_nr@spbgasu.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 Aleksander 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

Saint Petersburg State University of
Architecture and Civil Engineering
Russia, 190005, St. Petersburg,
4, 2nd Krasnoarmeyskaya St.

Korolev Evgenij Valerievich,
Doctor of Sciences, Professor,
Vice-rector for scientific work
E-mail: prorector_nr@spbgasu.ru

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ В УПРАВЛЕНИИ СВОЙСТВАМИ МАТЕРИАЛОВ

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

Рассматриваются методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза, идентификации и управления в сложных системах, формулируются принципы проектирования сложных систем. Свойства сложной системы определяются свойствами и характером взаимодействия между ее элементами (две системы с попарно одинаковыми элементами, но с различными взаимодействиями между ними рассматриваются как две разные системы). Выявление новых свойств и сущностей системы сопровождается построением обобщающих моделей или ограничивается наращиванием множества упрощенных моделей. Специальные методы идентификации и обработки экспериментальных данных позволяют оценивать неизвестные параметры посредством сравнения значений функциональных и структурных характеристик сложных систем, устанавливаемых экспериментально и в результате моделирования. Системный подход позволяет на основе определения поправок к первоначальным значениям параметров добиваться достаточной точности оценки неизвестных параметров методом последовательных приближений.

Ключевые слова: сложные системы, композиционные материалы, моделирование, концептуальные аспекты, идентификация, управление, методы

SYSTEM ANALYSIS IN CONTROL PROPERTIES OF MATERIALS

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

Methods and algorithms of structural-parametric synthesis, identification and control in complex systems are considered, the principles of designing complex systems are formulated. The properties of a complex system are determined by the properties and nature of the interaction between its elements (two systems with pairwise identical elements but with different interactions between them are considered as two different systems). Identification of new properties and entities of the system is

accompanied by the construction of generalizing models or is limited to building up a set of simplified models. Special methods for identification and processing of experimental data make it possible to estimate unknown parameters by comparing the values of the functional and structural characteristics of complex systems established experimentally and as a result of modeling. A systematic approach allows, based on the determination of corrections to the initial values of the parameters, to achieve sufficient accuracy in the estimation of unknown parameters by the method of successive approximations.

Keywords: complex systems, composite materials, modeling, conceptual aspects, identification, control, methods

1. Идентификация и управление свойствами материалов нового поколения

Материалы представляются как системы, что позволяет при их синтезе в полной мере использовать системный подход. Концептуальные аспекты моделирования рассматриваются с позиций идентификации, управления, использования информационно-вычислительной среды [1..4]. При идентификации, исходя из применения определенного математического аппарата (от степени его разработанности), осуществляется предварительный анализ априорной информации. Основные усилия направляются на структуризацию и абсолютную формализацию. Предполагается, человек имеет безусловный приоритет перед результатами анализа: полностью автоматические системы управления качеством не рассматриваются. Для управления качеством, регулирования структуры и свойств используются методы векторной оптимизации (лексикографическая задача; метод последовательных уступок; скаляризация критериев качества на основе свертки и введения контрольных показателей; построение множеств Парето и др.). По результатам решения сначала общей, а затем и частных задач идентификации по желаемым видам кинетических процессов формирования основных физико-механических характеристик композитов выбирается целевая функция (учитывалась возможность установления связи между строением композита и изменениями макроскопических характеристик). Методика управления выходными характеристиками материала определялась исходя из перекрестных связей (синергетика) между свойствами материала; уточнялись математические модели подсистем с последующей идентификацией параметров (для отдельных систем – из условий получения экстремумов целевых функций). Оказались эффективными принцип и диаграммы Парето (начальные 20 % определяют последующие 80 % времени выхода контролируемого параметра на эксплуатационное значение): облегчается разработка рецептуры с выделением элементов, определяющих, в основном, эксплуатационные характеристики материала. Так, для оксидных композиционных материалов для защиты от радиации прочность и плотность, в основном, определялись степенью наполнения и видом модификатора. Эффективен итеративный способ улучшения качества материала на основе последовательного построения на каждом этапе соответствующих диаграмм Парето. Предлагаемый подход к синтезу материалов на международных конференциях «Идентификация систем и задачи управления» отмечался в качестве прототипа нового метода идентификации.

2. Теория систем: композиционные материалы

Пока системный подход представлен мозаикой плохо скоординированных между собой направлений: целеустремленные системы (Р. Акофф), функциональные системы (П.К. Анохин), системы гомеостатического типа (Ю.Н. Горский), системы как триада «вещь–свойство–отношение» (А.И. Уемов), общая теория систем (Ю.А. Урманцев). К сожалению, ни одна версия системного подхода по стандартам научности пока не получила развития до ранга теории. Это относится и к системным исследованиям в области синтеза композиционных материалов. Есть только отдельные опыты применения системной методологии. Налицо потребность и демонстрация возможностей разработок в области синтеза систем. Основной проблемой при синтезе является усиливающаяся фрагментация знания: нужен аппарат синтеза, основанный на интеграции междисциплинарных категорий с его развитием до уровня математической теории

(в основе лежит идеальный объект, заданный в системе аксиом и способный выходить на уровень приложений в разных областях).

Результаты комплексных решений с позиций системного анализа научных и технических проблем, связанных с разработкой материалов специального назначения с заданным комплексом эксплуатационных свойств, а также с созданием базы компьютерного проектирования и управления технологией их производства, показали его высокую эффективность. Исследования включали: математическое моделирование, вычислительный эксперимент, разработку методов и алгоритмов структурно-параметрического синтеза и идентификации материалов как сложных систем.

При синтезе производились установление взаимосвязи состава, технологии производства, а также структуры и свойств материала. Композиционный материал рассматривался как сложная система, состоящая из элементов различного уровня детализации: от атомного до отдельного процесса. Так как сущность системы нельзя понять, рассматривая только свойства элементов, то изучаются как способы взаимодействия элементов, так и взаимодействие элементов и системы с окружающей средой. В частности, анализ отдельных стадий процесса без выявления взаимосвязи между ними и с окружающей средой не дает возможности судить обо всем технологическом процессе. Так, массоперенос вещества осуществляется на нескольких технологических переделах: при химической реакции взаимодействия вяжущего с активатором; при перемешивании компонентов; тепловой обработке и др. При создании радиационно-защитных композиционных материалов на основе анализа технологического процесса выделялись несколько уровней иерархии с отношениями подчиненности. Исходя из иерархической структуры критериев качества, строилась иерархическая структура композита. По существу, разработка методологических принципов синтеза композиционных материалов напрямую связана с разработкой указанных иерархических структур и последовательного решения ряда задач: структурная и параметрическая идентификация, разработка функционалов качества, определение интегративных свойств систем с использованием автономных исследований отдельных подсистем, введение настраиваемых эталонных моделей с одновременной децентрализацией модулей по входам, многокритериальный синтез, определение рецептурно-технологических параметров.

3. Когнитивное моделирование и управление качеством

В связи с междисциплинарностью системных исследований в материаловедении они пока мало используются («...когда внешней средой наука не востребована, то по этому свойству система изолирована или закрыта, и только тогда, когда появится потребитель во внешней среде, система откроется»). Определение понятия «структура» носит расплывчатый характер (возникают трудности классификации и установления параметров оптимальной структуры композита). При классификации структуры бетона с учетом его плотности рассматриваются четыре основных типа: плотная, с пористым заполнителем, ячеистая и зернистая; при масштабной классификации выделяются макро- и микроструктура; в некоторых случаях – пять масштабных уровней (субмикроскопический (атомно-молекулярный, $< 10^{-7}$ см), микроскопический (коллоидно-дисперсный, $10^{-7} \dots 10^{-5}$ см), мезоскопический (пылевидные фракции, $10^{-5} \dots 0,014$ см), макроскопический (песчаная фракция, $0,014 \dots 0,5$ см), мегаскопический (гравийно-щебенчатая фракция, $> 0,5$ см)). Управление технологией изготовления до сих пор производилось исходя из полиструктурной теории В.И. Соломатова с возможностью раздельного формирования отдельных структур уникальных композитов на мало- или несовмещающихся компонентах. Оптимизация каждого структурного уровня осуществлялась на основе выделенных критериев (управление свойствами субмикроструктуры – на атомарном или молекулярном уровне; для композитов на основе вяжущих веществ, не содержащих дисперсных фаз, выделялся уровень микроструктуры; для каркасных бетонов дополнительно рассматривался уровень каркаса, а также мезоструктура (пропиточная композиция) и макроуровень (бетон)). На каждом последующем структурном уровне (новый материал) оптимизированные

рецептура и технология предыдущего уровня уточнялись. Последовательное совмещение уровней (от микро- до макроструктуры) осуществлялось на основе критериев (свойств), обеспечивающих получение качественного композиционного материала на уровне макроструктуры (продукта технологии). Оказалось возможным выделение для радиационно-защитных композитов различных уровней и типов взаимосвязей между ними с последовательным включением систем более низкого уровня в системы более высокого уровня (строение системы – структурированное, иерархическое). Использовалась аналогия структур систем (изоморфизм и гомоморфизм). Для качественного анализа рассматриваемых композитов как систем строился знаковый взвешенный ориентированный граф (в силу громоздкости здесь не приводится). Построение оргграфа позволило установить элементарные рецептурные факторы (количество, удельная поверхность, химический состав и др.) для управления технологией изготовления материала [5...7].

4. Модель деструкции композиционных материалов

В общей теории искусственных композиционных конгломератов под долговечностью понимается способность материала сохранять на допустимом уровне достаточно продолжительное время структурные параметры, хотя оценка долговечности материалов по изменению его свойств и не является безупречной. Срок службы материала делят на три последовательных этапа: упрочнение структуры и улучшение свойств КМ; интервал относительной стабильности показателей; деструкция материала.

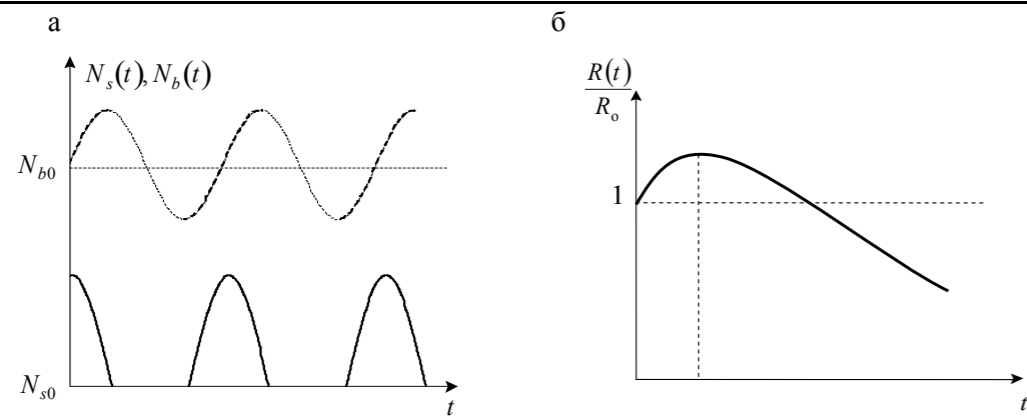
Под структурой понимается совокупность устойчивых связей объекта, обеспечивающих его целостность, то есть сохранение основных свойств при различных внешних и внутренних изменениях. На основе длительного опыта разработки композиционных материалов специального назначения (для защиты от ионизирующего излучения, химически стойких и т.д.) в модели деструкции композиционных материалов учитывались N_s связи, характеризующие общий уровень внутренних напряжений, а также N_b разорванные связи. Снижение величины внутренних напряжений приводит к улучшению свойств материала, а увеличение числа разорванных связей – к снижению показателей качества. Баланс между количеством напряженных и разорванных связей и определяет этапы процесса деструкции материала.

Разрыв напряженных связей способствует не только снижению внутренних напряжений, но и появлению новых напряженных связей вследствие перераспределения внешней нагрузки. Предполагается, скорость роста N_b увеличивается пропорционально N_s , а скорость роста N_s уменьшается пропорционально N_b . Совместное изменение N_s и N_b определяется как решение задачи Коши:

$$\begin{aligned} \frac{dN_b}{dt} &= \alpha N_b N_s, \\ \frac{dN_s}{dt} &= (\beta - \alpha N_b) N_s; \\ N_b(0) &= N_{b0}, \quad N_s(0) = N_{s0}, \end{aligned}$$

α, β – энергетические константы.

Рассматриваемая система уравнений по форме совпадает с уравнениями Lotka – Volterra (здесь в правой части первого уравнения системы содержится дополнительное постоянное слагаемое). Параметрическая идентификация осуществляется исходя из экспериментальных значений прочности $R(t)$ на сжатие. Вид функций N_s и N_b приводятся на рис. 1а (прямой физический смысл имеют лишь восходящие участки $N_b(t)$ – жирный пунктир). Наблюдается повышение показателей качества материала в начальный период эксплуатации; дальнейшее накопление N_b приводит к постепенному снижению качества материала (см. рисунок б).

Вид функций N_s и N_b

Эффективность использования модели подтвердилась при разработке серных сверхтяжелых бетонов для защиты от радиации [7].

Выводы

Разработаны подходы к синтезу композитов с позиций системного анализа, прошедшие апробацию при разработке ряда материалов специального назначения.

Список литературы

1. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Academia / Е.В. Королев // Архитектура и строительство. – 2020. – № 3. – С. 143–159.
2. Королев, Е.В. Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Айзенштадт // Строительные материалы. – 2020. – № 9. – С. 54–61.
3. Соколова, Ю.В. Оценка влияния рецептурных факторов на структурообразование полимер-органического связующего / Ю.В. Соколова, А.М. Айзенштадт, Е.В. Королев, А.А. Чибисов // Строительные материалы. – 2020. – № 9. – С. 27–36.
4. Бudyлина, Е.А. Концептуальные подходы к системному проектированию композиционных материалов / Е.А. Бudyлина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 41–45.
5. Данилов, А.М. Методология проектирования сложных систем при разработке материалов специального назначения / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 1 (625). – С. 80–85.
6. Гарькина, И.А. Из опыта разработки материалов специального назначения / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, В.О. Петренко // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 235.
7. Гарькина, И.А. Проектирование и оптимизация свойств сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 4 (37). – С. 5–11.

References

1. Korolev, E.V. Prospects for the development of building materials science / E.V. Korolev // Academia. Architecture and construction. – 2020. – № 3. – P. 143–159.
2. Korolev, E.V. Analysis of the structure formation of composites using fractal dimension / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenshtadt // Building materials. – 2020. – №9. – P. 54–61
3. Sokolova, Yu.V. Assessment of the influence of prescription factors on the structure formation of the polymer-organic binder / Yu.V. Sokolova, A.M. Aizenshtadt, E.V. Korolev, A.A. Chibisov // Building materials. – 2020. – № 9. – P. 27–36.

4. Budylyna, E.A. Conceptual approaches to system design of composite materials / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 1 (46). – P. 41–45.
5. Danilov, A.M. Methodology for the design of complex systems in the development of special-purpose materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Bulletin of higher educational institutions. Building. – 2011. – № 1 (625). – P. 80–85.
6. Garkina, I.A. From the experience of developing special-purpose materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.O. Petrenko // Modern problems of science and education. – 2014. – № 5. – P. 235.
7. Garkina, I.A. Design and optimization of properties of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering. – 2018. – №4 (37). – P. 5–11.

УДК 691.5

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

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

Учаева Татьяна Владимировна,
кандидат экономических наук,
доцент кафедры «Экономика, организация
и управление производством»
E-mail: uchaevatv@mail.ru

Зайцева Мария Владимировна,
аспирант кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»

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

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

Uchaeva Tatiana Vladimirovna,
Candidate of Economic Sciences, Associate
Professor of the department «Economics,
Organization and Management»
E-mail: uchaevatv@mail.ru

Zaitseva Maria Vladimirovna,
Postgraduate of the department «Quality
Management and Construction Technologies»

ОЦЕНКА ЗАТРАТ НА ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

В.И. Логанина, Т.В. Учаева, М.В. Зайцева

Приведены сведения о модели затрат, связанных с повышением качества продукции. На примере сухих строительных смесей рассмотрены вопросы статистического управления качеством. Модель затрат предусматривает учет затрат на уменьшение систематической ошибки и дисперсии сырья.

Ключевые слова: сухие строительные смеси, затраты на качество, дисперсия показателей качества продукции и сырья

ESTIMATING THE COST FOR QUALITY IMPROVING IN DRY BUILDING MIXTURES PRODUCTION

V.I. Loganina, T.V. Uchaeva, M.V. Zaitseva

The article provides information about the cost model associated with improving product quality. On the example of dry building mixtures, the issues of statistical quality management are considered. The cost model takes into account the cost of reducing a systematic error and of raw materials dispersion.

Keywords: dry building mixtures, quality costs, dispersion of quality indicators of products and raw materials

Методология статистического управления направлена на улучшение качества продукции за счет уменьшения отклонений показателей качества в процессе производства. Проведенные ранее исследования показали, что имеется функциональная связь между вариативностью показателей качества сухих строительных смесей (ССС) и вариативностью показателей качества входных переменных (сырья). Это позволит, зная необходимые значения дисперсии показателя качества продукта, определить оптимальные дисперсии входных переменных. Для СССР CemPlast зависимость среднеквадратического отклонения показателя (СКО) прочности при сжатии от СКО показателя активности цемента, модуля крупности песка имеет вид

$$Y = a + bx + cx^2. \quad (1)$$

Пользуясь предлагаемыми моделями, можно уточнить требования к СКО показателям качества сырья. Конечная цель стратегии статистического управления – минимизировать общие затраты как для производителя, так и для потребителя, или стоимость всей системы. Затраты для потребителя связаны с ожидаемой потерей качества выходной переменной и вызваны отклонением от целевого значения. Затраты для производителя связаны с изменяющимся распределением вероятностей входных переменных.

Рассмотрим модель затрат на повышение качества продукции, заключающуюся в учете средних значений и значений дисперсии показателей качества. Ожидаемая потеря качества для потребителя состоит из двух частей: систематической ошибки процесса и отклонения процесса. Стратегия уменьшения смещения состоит в настройке технологического процесса до состояния, когда математическое ожидание показателя качества совпадает с целевым значением. Чтобы уменьшить дисперсию показателя Y , разработчик должен уменьшить дисперсию входных переменных, что также увеличит стоимость. Проблема состоит в том, чтобы сбалансировать уменьшенную ожидаемую потерю качества с увеличением затрат на уменьшение систематической ошибки и дисперсии входных переменных.

Обозначим стоимость управления дисперсией для i -й входной переменной X_i как $\sum_{i=1}^n C_i(\sigma_i^2)$, а стоимость управления для i -й входной переменной X_i как $D_i(\mu_i)$.

Общая модель имеет вид:

$$TC = \sum_{i=1}^n C_i(\sigma_i^2) + \sum_{i=1}^n D_i(\mu_i) + k[\sigma_y^2 + (\mu_i - y_0)^2], \quad (2)$$

где $k[\sigma_y^2 + (\mu_i - y_0)^2]$ – это ожидаемая потеря качества для потребителя; k – константа в функции потери качества; Y_0 – целевое значение Y .

В уравнении (2) первые два члена $\sum_{i=1}^n C_i(\sigma_i^2)$ и $\sum_{i=1}^n D_i(\mu_i)$ являются затратами на дисперсии и средними значениями входных переменных или стоимостью для производителя.

Рассмотрим затраты производителя СССР. Если среднее значение активности цемента не соответствует целевому значению Y_0 и среднеквадратическое отклонение σ не обеспечивает низкую вариативность показателя качества СССР, то производитель СССР не в состоянии что-либо изменить в регулировании качества цемента, поэтому следует сменить поставщика цемента на другого, поставляющего цемент с более низкой вариативностью. В данном случае производитель СССР не несет дополнительных затрат.

Песок для СССР должен соответствовать ГОСТ 8736-93 «Песок для строительных работ. Технические условия». Как правило, для СССР применяют фракционированный песок. Если вариативность песка не устраивает производителя СССР с точки зрения вариативности качества СССР, то затраты производителя будут обусловлены либо покупкой классификатора, позволяющего получать две-три фракции песка, либо покупкой фракционированного песка. Так, в Европе имеется возможность покупать сухой фракционированный песок с доставкой его на завод. В России существуют поставщики сухого фракционированного песка. Это компании «Метробетон», «Петроперлит», «РЕМИКС» и другие (Санкт-Петербург). Однако если поставщиков сухого песка рядом нет, сушка и классификация этого компонента становятся заботой изготовителя СССР.

Рассмотрим затраты, связанные с классификацией песка, а именно со стоимостью $\sum_{i=1}^n C_i(\sigma_i^2)$ и $\sum_{i=1}^n D_i(\mu_i)$ (уравнение (2)). По данным компании New MIX (Пензенская область), производство сухих строительных смесей осуществляется с применением

двух фракций кварцевого песка Махалинского месторождения. Результаты статистической обработки данных свидетельствуют, что значения среднеквадратического отклонения прочности при сжатии ССС CemPlast составляют $\sigma=(1,1-2,3)$ МПа в зависимости от значений среднеквадратического отклонения по модулю крупности песка $\sigma=0,16-0,28$. С целью снижения вариативности показателей качества ССС и повышения качества продукции предлагается покупка дополнительной сетки для получения трех фракций песка. Стоимость сетки составляет 160 тыс. руб. Цена ССС составляет 150 руб. (1 мешок по 25 кг). Предприятие выпускает 500 т/сутки. Выручка за сутки составляет 3 млн руб. при условии 95 %-й продажи ССС (5 % объема производства на брак). Чистая прибыль с учетом налогов остается в распоряжении предприятия в размере 300 тыс. руб. Срок окупаемости (рис. 1) дополнительных затрат, связанных с покупкой и монтажом сетки, составляет 2 дня (при прямом методе расчета срока окупаемости).

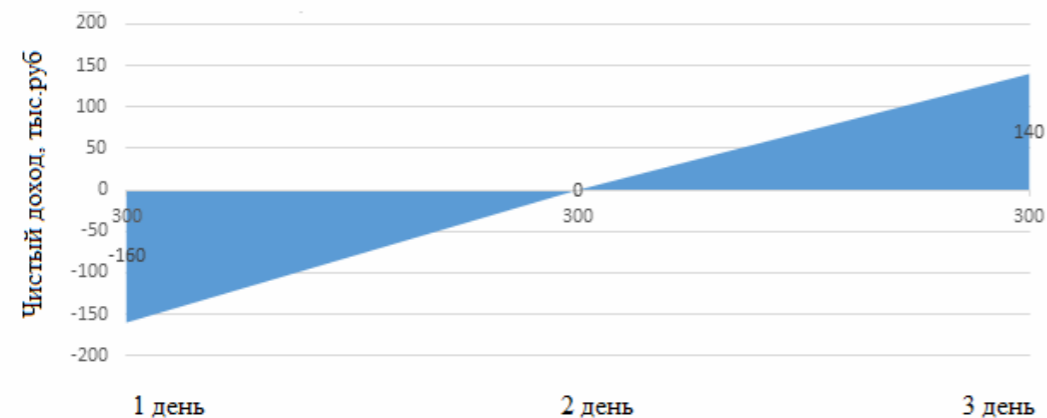


Рис. 1. Срок окупаемости дополнительной сетки

Как видно из рисунка, при ежедневной чистой прибыли предприятия в 300 тыс. руб. срок окупаемости наступает на 2-й день (точка безубыточности) и на 3-й день производства предприятие имеет чистый доход в 140 тыс. руб.

Для более точного расчета дохода предприятия от влияния покупки сетки для песка был рассчитан чистый доход с учетом дисконтирования.

Результаты расчета показывают, что чистый дисконтированный доход (ЧДД) за два дня производства при 100 %-й продаже (уровень дефектности 0,27 %) равен 335,49 тыс. руб. (рис. 2, 3).

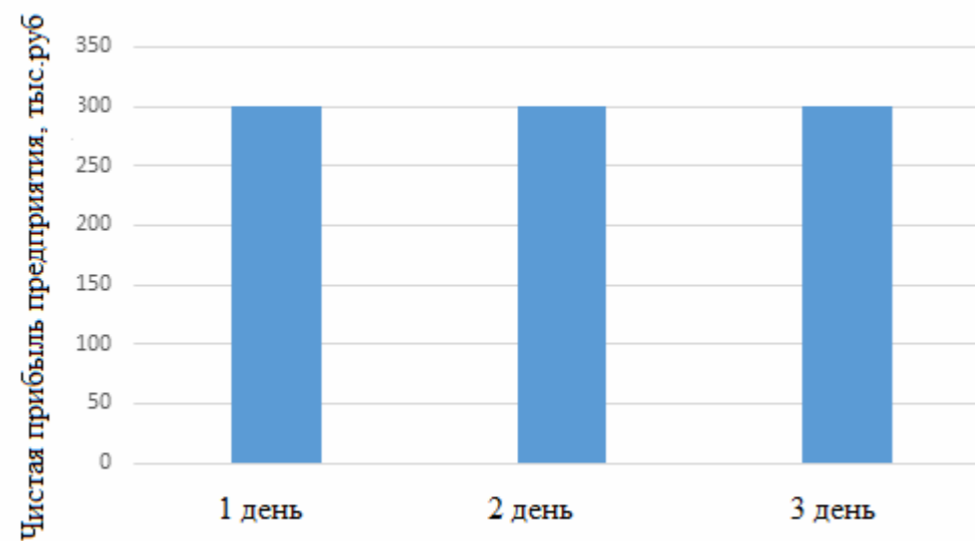


Рис. 2. Ежедневная чистая прибыль предприятия при условии 95 %-й продажи

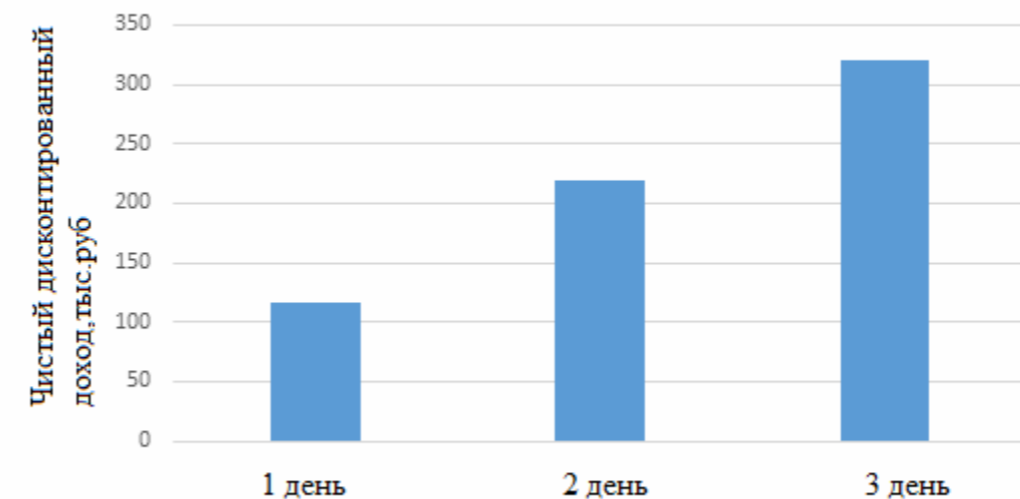


Рис. 3. Чистый дисконтированный доход предприятия при условии 100 %-й продажи

Как видно из рис. 3, чистый доход предприятия растет, и на 3-й день производства (при условии применения сетки) он равен 320,9 тыс. руб., что больше чистой ежедневной прибыли предприятия (см. рис. 2) без применения сетки. Следовательно, покупка данной классификационной сетки экономически эффективна с учетом всех затрат предприятия.

Список литературы

1. Козлов, В.В. Сухие строительные смеси / В.В. Козлов. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 96 с.
2. Логанина, В.И. Штукатурные смеси для реставрационных работ с применением окрашенных наполнителей / В.И. Логанина, Л.В. Макарова // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – № 1. – С. 38–40.
3. Логанина, В.И. Известковые отделочные составы с применением синтезированных алюмосиликатов / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, И.В. Жерновский, М.А. Садовникова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 2. – С. 55–57.
4. Большаков, Э.Л. Сухие смеси для отделочных работ / Э.Л. Большаков // Строительные материалы. – 1997. – №7. – С. 8–9.
5. Логанина, В.И. Статистическая оценка риска причинения вреда при несоответствии качества лакокрасочных покрытий / В.И. Логанина, Т.В. Учаева // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14, вып. 11. – С.1449–1455.
6. Шиндловский, Э. Статистические методы управления качеством / Э. Шиндловский, О. Щюрц. – М.: Мир, 1976. – 598 с.
7. Адлер, Ю.П. Оперативное статистическое управление качеством / Ю.П. Адлер, Б.Л. Розовский. – М.: Знание, 1984. – 102 с.
8. Song, P.S. Assessment of statistical variations in impact resistance of high-strength concrete and high-strength steel fiber-reinforced concrete. / P.S. Song, C. WuJ, S. Hwang, B.C. Sheu // Cement and Concrete Research. – 2005. – 35(2). – P. 393–399.
9. Taguchi, G. Mahalanobis-Taguchi Strategy. A Pattern Technology System / G. Taguchi, R. Jugulum. – New York: John Wiley & Sons, 2002.

1. Kozlov, V.V. Dry construction mixtures / V.V. Kozlov. – M.: Publishing house ASV, 2000. – 96 p.
2. Loganina, V.I. Plaster mixes for restoration work using colored fillers / V.I. Loganina, L.V. Makarova // Regional architecture and construction. – 2009. – No. 1. – P. 38–40.
3. Loganina, V.I. Lime finishing compositions using synthesized aluminosilicates / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, I.V. Zhernovsky, M.A. Sadovnikova // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after I.I. V.G. Shukhov. – 2014. – No. 2. – P. 55–57.
4. Bolshakov, E.L. Dry mixtures for finishing works / E.L. Bolshakov // Building materials. – 1997. – No. 7. – P. 8–9.
5. Loganina, V.I. Statistical assessment of the risk of harm when the quality of paint and varnish coatings does not match / V.I. Loganina, T.V. Uchaeva // Vestnik MGSU. – 2019. – Vol. 14, Issue. 11. – P.1449–1455
6. Shindlovsky, E. Statistical methods of quality management / E. Shindlovsky, O. Shchurts. – M: Mir, 1976. – 598 p.
7. Adler, Yu. P. Operational statistical quality management / Yu.P. Adler, B.L. Rozovsky. – M.: Knowledge, 1984. – 102 p.
8. Song, P.S. Assessment of statistical variations in impact resistance of high-strength concrete and high-strength steel fiber-reinforced concrete. / P.S. Song, C. WuJ, S. Hwang, B.C. Sheu // Cement and Concrete Research. – 2005. – 35(2). – P. 393–399.
9. Taguchi, G. Mahalanobis-Taguchi Strategy. A Pattern Technology System / G. Taguchi, R. Jugulum. – New York: John Wiley & Sons, 2002.

УДК 691.005.5

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

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

Куимова Елена Ивановна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Математика и математическое
моделирование»
E-mail: lena-kui@mail.ru

Зайцева Мария Владимировна,
аспирант кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
Восточно-Казахстанский технический
университет им. Д.Серикбаева
Респ. Казахстан, 070004,
г. Усть-Каменогорск,
ул. Протазанова А.К., д.69

Галкина Дарья Камилевна,
доцент школы архитектуры, строительства
и дизайна
E-mail: darjagalkina@mail.ru

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

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

Kuimova Elena Ivanovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Mathematics and
Mathematical Modeling»
E-mail: lena-kui@mail.ru

Zaitseva Maria Vladimirovna,
Postgraduate of the department «Quality
Management and Construction Technologies»
D. Serikbayev East Kazakhstan Technical
University
Rep. Kazakhstan, 070004, Ust-Kamenogorsk,
69, Protazanov A.K. St.,

Galkina Daria Kamilievna,
Associate Professor of the School of
Architecture, Construction and Design
E-mail: darjagalkina@mail.ru

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ С УЧЕТОМ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЫРЬЯ

В.И. Логанина, Е.И. Куимова, М.В. Зайцева, Д.К. Галкина

Приведены сведения о результатах контроля качества сухих строительных смесей в зависимости от вида применяемого цемента. Установлено, что при применении Сенгилеевского цемента, характеризующегося меньшим значением вариабельности показателей качества, значение среднеквадратического отклонения показателей качества сухих строительных смесей меньше по сравнению с цементом Хальденберг. Выявлено, что значения вероятности появления дефектной продукции при применении Сенгилеевского цемента меньше.

Ключевые слова: контроль, допуск, вероятность, вариабельность

ASSESSMENT OF DRY BUILDING MIXTURES QUALITY TAKING INTO ACCOUNT THE VARIABILITY OF RAW MATERIALS

V.I. Loganina, E.I. Kuimova, M.V. Zaitseva, D.K. Galkina

Information on the results of quality control of dry building mixtures depending on the type of the used cement is given. It is found that the use of Sengileevsky cement, which is characterized by a lower variability of quality indicators, the value of the standard deviation of the quality indicators of dry building mixtures is less than that of the Haldenberg cement. It is revealed that the values of the probability of defective products when using Sengileevsky cement are less.

Keywords: control, tolerance, probability, variability

Важным элементом управления качеством выпускаемой продукции является измерительный контроль. В процессе контроля осуществляется сопоставление фактически достигнутых результатов показателей качества с данными нормативных документов. Любой процесс измерения связан с вариациями его параметров, вызванными большим количеством воздействующих на него факторов. Это, несомненно, оказывает влияние на показатели качества конечной продукции [1–4].

Известно, что изменчивость свойств строительных материалов подчиняется нормальному закону распределения. При нормальном законе распределения вероятность того, что отклонение по абсолютной величине будет меньше утроенного среднеквадратического отклонения, равна 0,9973, т.е. несоответствия возможны лишь в 0,27 % случаев. Допустим, качество продукции характеризуется m свойствами. Тогда вероятность того, что продукция будет годной по всем показателям, определяется как [5]

$$P = (1 - q) = (1 - q_1) \cdot (1 - q_2) \cdot \dots \cdot (1 - q_m), \quad (1)$$

где q_1, q_2, \dots, q_m – доли некачественной продукции по каждому свойству; q – доля некачественной продукции по всем свойствам.

При числе показателей $m=3$ вероятность получения качественной продукции составляет 0,9919. Однако, учитывая, что со временем даже хорошо отрегулированный процесс может давать сдвиги в среднем до 1,5 сигма, актуальным является применение статистических методов при контроле качества продукции [6, 7].

Анализ рынка строительных материалов показывает увеличение доли сухих строительных смесей (ССС) различного функционального назначения [8, 9]. В связи с возросшей конкуренцией производителей ССС вопросы их качества приобретают особую актуальность. На наш взгляд, при производстве ССС значительное внимание следует уделять выбору сырья, характеризующегося малой вариабельностью и обеспечивающего производство качественной продукции.

Нами были проанализированы сухие строительные смеси компании New MIX (Пензенская область) в зависимости от применяемого сырья. Были рассчитаны вероятности несоответствия требованиям нормативной документации ССС (вероятность появления брака) (СемПласт, Бундес Короед Б2, Бундес Короед С3) в зависимости от вида цемента. Показатели качества сырья и показатели качества конечной продукции были взяты на заводе компании New MIX. Для изготовления ССС применялись цементы Сенгилеевский ЦЕМ I 42,5Б («Евроцементгрупп»), Хальденберг ЦЕМ I 42,5Н («ХайдельбергЦемент Волга»). В качестве наполнителя использовался кварцевый песок Махалинского месторождения. Значения среднеквадратического отклонения рассчитывались для показателей прочности при сжатии, влажности сухой смеси и водоудерживающей способности. Вычислялись среднее значение показателя качества и стандартное отклонение по результатам 50 испытаний. ССС СемПласт должна соответствовать требованиям ГОСТ 33083-2014, ССС Бундес

Короед Б2 и Бундес Короед С3 – ГОСТ 54358-2017. Вероятность соответствия требованиям нормативной документации рассчитывалась с применением функции Лапласа

$$P\left(\frac{ВД - \bar{x}}{\sigma}\right) = 2\Phi(t) = \gamma; \quad (2)$$

$$P\left(\frac{\bar{x} - НД}{\sigma}\right) = 2\Phi(t) = \gamma,$$

где σ – среднеквадратического отклонение; ВД, НД – верхний и нижний допуски.

Результаты приведены в табл. 1, 2.

Вероятность соответствия требованиям нормативной документации свойств ССС

Вид ССС	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение	Вероятность соответствия требованиям нормативной документации
Влажность, %			
Сем Пласт	0,173375/0,174	0,008757/0,0098	0,999999/0,999999
Бундес Короед Б2	0,168/0,171	0,014142/0,0165	0,999999/0,999999
Бундес Короед С3	0,0875/0,089	0,00494975/0,0057	0,999999/0,999999
Прочность при сжатии, МПа			
Сем Пласт	14,45625/14,3	1,8/2,1	0,999928/0,99931
Бундес Короед Б2	13,175/12,9	2,3688/2,6	0,9099/0,8665
Бундес Короед С3	11,025/11,03	2,156675/2,2	0,83056/0,8212
Водоудерживающая способность, %			
Сем Пласт	98,05/98,04	0,75/0,82	0,999999/0,999999
Бундес Короед Б2	99,02/98,9	0,6272/0,71	0,999999/0,999999
Бундес Короед С3	98,04/98,03	0,65/0,7	0,999999/0,999999

Примечание. Над чертой приведены значения показателей качества при применении Сенгилеевского цемента, под чертой – цемента Хальденберг.

В табл. 2 приведены значения вероятности появления дефектной продукции ССС.

Вероятность появления дефектной продукции

Вид ССС	Вероятность появления дефектной продукции
Сем Пласт	0,00007/0,00069
Бундес Короед Б2	0,09011/0,13351
Бундес Короед С3	0,1615/0,17881

Примечание. Над чертой приведены значения вероятности появления дефектной продукции ССС при применении Сенгилеевского цемента, под чертой – цемента Хальденберг.

Результаты исследований, приведенные в табл. 2, показывают, что значения вероятности получения качественных ССС зависят от вида цемента. Так, при применении Сенгилеевского цемента значение среднеквадратического отклонения (СКО) прочности при сжатии образцов ССС СемПласт составляло 1,8 МПа, а при применении цемента Хальденберг – 2,1 МПа. Такое различие, на наш взгляд, обусловлено различной вариативностью цемента. Так, значения среднеквадратического отклонения активности Сенгилеевского цемента составляют $\sigma = 4,1-5,2$ МПа, а цемента Хальденберг – 4,5–5,7 МПа.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, свидетельствует, что при применении цемента Хальденберг ЦЕМ I 42,5Н компании «ХайдельбергЦемент Волга» вероятность появления дефектной продукции увеличивается. Так, вероятность появления

дефектных ССС Бундес Короед Б2 составляет 0,09011 и 0,13351 при применении соответственно Сенгилеевского цемента и цемента Хальденберг. Аналогичные закономерности характерны и для ССС Бундес Короед С3 и Cem Plast.

Таким образом, выбор вида цемента, а также других компонентов рецептуры ССС должен проведен с учетом изменчивости показателей, характеризующих их качество.

Список литературы

1. Логанина, В.И. Организация статистического приемочного контроля качества строительных изделий и конструкций / В.И. Логанина // Строительные материалы. – 2008. – № 8. – С. 98–99.
2. Логанина, В.И. Управление качеством на предприятиях стройиндустрии / В.И. Логанина, О.В. Карпова, Л.В. Макарова. – М., 2008.
3. Логанина, В.И. Достоверность контроля качества строительных материалов и изделий / В.И. Логанина, А.Н. Круглова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 2. – С. 16–18.
4. Рубичев, Н.А. Достоверность допускового контроля качества / Н.А. Рубичев, В.Д. Фрумкин. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 172 с.
5. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Юрайт, 2020. – 479 с.
6. Адлер, Ю.П. Оперативное статистическое управление качеством / Ю.П. Адлер, Б.Л. Розовский. – М.: Знание, 1984. – 102 с.
7. Шиндловский, Э. Статистические методы управления качеством / Э. Шиндловский, О. Щюрц. – М.: Мир, 1976. – 598 с.
8. Логанина, В.И. Перспективы изготовления органо-минеральной добавки на основе отечественного сырья / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, В.Н. Горбунов, Т.Н. Дмитриева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 9 (609). – С. 36–39.
9. Логанина, В.И. Реологические свойства композиционного известкового вяжущего с применением синтетических цеолитов / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Л.В. Макарова, М.А. Садовникова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – №4. – С.37–42.

References

1. Loganina, V.I. Organization of statistical acceptance control of the quality of building products and structures / V.I. Loganina // Building materials. – 2008. – No. 8. – P. 98–99
2. Loganina, V.I. Quality management at construction industry enterprises / V.I. Loganina, O.V. Karpova, L.V. Makarova. – M., 2008
3. Loganina, V.I. Reliability of quality control of building materials and products / V.I. Loganina, A.N. Kruglova // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. – 2014. – No. 2. – P. 16–18.
4. Rubichev, N.A. Reliability of tolerance quality control / N.A. Rubichev, V.D. Frumkin. – M.: Publishing house of standards, 1990. – 172 p.
5. Gmurman, V.E. Probability theory and mathematical statistics / V.E. Gmurman. – M.: Yurayt, 2020. – 479 p.
6. Adler, Yu.P. Operational statistical quality management / Yu.P. Adler, B.L. Rozovsky. – M.: Knowledge, 1984 –102p.
7. Shindlovsky, E. Statistical methods of quality management / E. Shindlovsky, O. Shchurts. – M.: Mir, 1976. – 598 p.
8. Loganina, V.I. Prospects for the manufacture of organo-mineral additives based on domestic raw materials / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, V.N. Gorbunov, T.N. Dmitrieva // News of higher educational institutions. Building. – 2009. – No. 9 (609). – P. 36–39.
9. Loganina, V.I. Rheological properties of a composite lime binder using synthetic zeolites / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, L.V. Makarova, M.A. Sadovnikova // News of higher educational institutions. Construction. – 2013. – No. 4. – P. 37–42.

УДК 691

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

Зайцева Мария Владимировна,
аспирант кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Zaitseva Maria Vladimirovna,
Postgraduate of the department «Quality
Management and Construction Technologies»

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ ОТДЕЛОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ

М.В. Зайцева

Приведены сведения о применении вероятностного подхода к проектированию отделочных покрытий. Показана взаимосвязь между надежностью и запасом прочности отделочных покрытий. Выявлено, что установленные в нормативных документах значения прочности сцепления обеспечивают стойкость покрытий к отслаиванию.

Ключевые слова: отделочный штукатурный слой, отслаивание, надежность, проектирование

QUALITY MANAGEMENT OF THE PROCESSES OF CEMENT CONCRETE FINISHING COATINGS PRODUCTION

M.V. Zaytseva

The information on the application of the probabilistic approach to the design of finishing coatings is given. The relationship between reliability and safety margin of finishing coatings is shown. It is revealed that the values of adhesion strength established in regulatory documents ensure the resistance of coatings to peeling.

Keywords: finishing plaster layer, peeling, reliability, design

Для отделки фасадов зданий широкое применение находят сухие строительные смеси [1–3]. Чтобы гарантировать качество отделочных покрытий, действия по обеспечению надежности должны начинаться на ранней стадии цикла разработки продукта. Для достижения желаемого уровня надежности можно использовать различные методологии и инструменты обеспечения надежности на протяжении всего жизненного цикла продукта – от ранних стадий планирования до проектирования, разработки, производства, полевых испытаний и использования клиентами.

В статье представлен вероятностный подход к проектированию и описана взаимосвязь между надежностью и запасом прочности отделочных покрытий. Отслаивание отделочного слоя происходит, когда внутренние касательные напряжения достигнут значения прочности сцепления на сдвиг, т.е.

$$\tau = R_{\text{сд}}, \quad (1)$$

где τ – внутренние касательные напряжения; $R_{\text{сд}}$ – прочность сцепления.

Существует четыре основных способа повышения надежности покрытия:

1. Увеличить прочность сцепления.
2. Уменьшить напряжение.
3. Уменьшить вариации напряжения.
4. Уменьшить вариацию прочности сцепления.

Процесс отверждения отделочного слоя характеризуется нарастанием внутренних напряжений. Коэффициент запаса прочности n представляет собой соотношение прочности Y и напряжения X . Поскольку Y и X являются случайными величинами, одним из определений коэффициента безопасности является

$$n = \frac{R_{\text{сд}}}{\tau} \quad (2)$$

Пусть $F(x)$ и $G(y)$ будут кумулятивными функциями распределения для случайных величин X и Y соответственно. Тогда надежность R изделия для рассматриваемого режима отказа в предположении, что напряжение и прочность являются независимыми случайными величинами, определяется выражением

$$R = P\{Y > X\} = \int_{-x}^x f(x) \left\{ \int_{-x}^y f(y) dy \right\} dx = \int_{-x}^x f(y) F(y) dy = \int_{-x}^x f(x) \left\{ \int_{-x}^x f(y) dy \right\} dx = \int_{-x}^x f(x) \{1 - G(x)\} dx \quad (3)$$

Рассмотрим отделочный слой, в котором напряжение и прочность распределяются по нормальному закону распределения. Случайная величина напряжения X нормально распределена со средним значением μ_x и стандартным отклонением σ_x . Аналогичным образом обычно распределяется случайная величина Y со средним значением μ_y и стандартным отклонением σ_y . Надежность R может быть определена следующим образом:

$$R = P[Y > X] = P[(Y - X) > 0] \quad (4)$$

Известно, что $U = (Y - X)$ также нормально распределено с $\mu_U = \mu_Y - \mu_X$ и $\sigma_u^2 = \sigma_y^2 + \sigma_x^2$.

Следовательно,

$$R = \Phi \left[\frac{\mu_y - \mu_x}{\sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_x^2}} \right] \quad (5)$$

Изменчивость любой случайной величины можно количественно оценить с помощью ее коэффициента вариации, который представляет собой отношение стандартного отклонения и среднего значения. Используем допуск $\pm 3\sigma$. Тогда уравнение (5) можно переписать как (разделив числитель и знаменатель на μ_Y)

$$R = \Phi \left[\frac{n-1}{\sqrt{Cv_y^2 n^2 + Cv_x^2}} \right] \quad (6)$$

Указанные выше соотношения (5) и (6) могут быть использованы для связи надежности, запаса прочности, коэффициента вариации для случайной величины напряжения и коэффициента вариации для случайной величины прочности сцепления.

В соответствии с ГОСТ 33083-2014 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем для штукатурных работ» прочность сцепления отделочного слоя должна быть не менее 0,3 МПа, а в соответствии с ГОСТ Р 54358-2011 «Составы декоративные штукатурные на цементном вяжущем для фасадных теплоизоляционных композиционных систем с наружными штукатурными слоями» в зависимости от класса – не менее 0,25–0,65 МПа. DIN EN 12004 регламентирует прочность сцепления не менее 0,5 МПа.

Однако в приведенных нормативных документах не указана обеспеченность стойкости отделочного слоя к отслаиванию. Нами проведены расчеты обеспеченности стойкости к отслаиванию отделочного слоя (см. таблицу). В качестве образца был взят известковый отделочный состав [4]. Значения внутренних напряжений, варибельности показателей определяли в соответствии с методикой, изложенной в [5–7].

Т а б л и ц а 1

Вероятность отслаивания отделочного слоя

Наименование показателей	Значения
ГОСТ 33083-2014	
Прочность сцепления $R_{\text{сд}}$, МПа	0,3
Среднеквадратическое отклонение σ_R , МПа	0,0381
Коэффициент вариации, %	12,7
Касательные напряжения τ , МПа	0,096
Среднеквадратическое отклонение σ_τ , МПа	0,0144
Коэффициент вариации, %	15
Коэффициент запаса	3,125
Обеспеченность стойкости к отслаиванию	0,99998
ГОСТ Р 54358-2011	
Прочность сцепления $R_{\text{сд}}$, МПа	0,25
Среднеквадратическое отклонение σ_R , МПа	0,03175
Коэффициент вариации, %	12,7
Касательные напряжения τ , МПа	0,096
Среднеквадратическое отклонение σ_τ , МПа	0,0144
Коэффициент вариации, %	15
Коэффициент запаса	2,6
Обеспеченность стойкости к отслаиванию	0,99998
DIN EN 12004	
Прочность сцепления $R_{\text{сд}}$, МПа	0,5
Среднеквадратическое отклонение σ_R , МПа	0,0635
Коэффициент вариации, %	15
Касательные напряжения τ , МПа	0,096
Среднеквадратическое отклонение σ_τ , МПа	0,0144
Коэффициент вариации, %	15
Коэффициент запаса	5,2
Обеспеченность стойкости к отслаиванию	0,99998

Анализ данных, приведенных в таблице, свидетельствует, что установленные в нормативных документах предельные значения прочности сцепления при данных значениях варибельности прочности сцепления и касательных напряжений обеспечивают стойкость к отслаиванию отделочного слоя. Обеспеченность стойкости к отслаиванию составляет 0,99998.

Таким образом, разработка рецептуры штукатурных составов должна проводиться с учетом обеспеченности к отслаиванию отделочного слоя.

Список литературы

1. Логанина, В.И. Перспективы изготовления органо-минеральной добавки на основе отечественного сырья / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, В.Н. Горбунов, Т.Н. Дмитриева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 9 (609). – С. 36–39.
2. Логанина, В.И. Реологические свойства композиционного известкового вяжущего с применением синтетических цеолитов / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына,

Л.В. Макарова, М.А. Садовникова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 4 (652). – С. 37–42.

3. Логанина, В.И. Известковые отделочные составы с применением синтезированных алюмосиликатов / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, И.В. Жерновский, М.А. Садовникова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 2. – С. 55–57.

4. Loganina, V.I. Application of activated diatomite for dry lime mixes / V.I. Loganina, E.E. Simonov, W. Jezierski, D. Małaszkiwicz // Construction and Building Materials. – 2014. – Vol. 65. – P. 29–37.

5. Горчаков, Г.И. Состав, структура и свойства цементных бетонов / Г.И. Горчаков, Л.П. Орендликер, В.И. Савин [и др.]. – М.: Стройиздат, 1976. – 115 с.

6. Саката, Сиро. Практическое руководство по управлению качеством / Саката Сиро; пер. с 4-го японского издания С.И. Мышкиной; под ред. В.И. Гостяева. – М.: Машиностроение, 1980. – 215 с.

7. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – 6-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 1998.

References

1. Loganina, V.I. Prospects for the manufacture of organo-mineral additives based on domestic raw materials / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, V.N. Gorbunov, T.N. Dmitrieva // News of higher educational institutions. Building. – 2009. – No. 9 (609). – P. 36–39.

2. Loganina, V.I. Rheological properties of a composite lime binder with the use of synthetic zeolites / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, L.V. Makarova, M.A. Sadovnikova // News of higher educational institutions. Building. – 2013. – No. 4 (652). – P. 37–42.

3. Loganina, V.I. Lime finishing compositions with the use of synthesized aluminosilicates / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, I.V. Zhernovsky, M.A. Sadovnikova // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. – 2014. – No. 2. – P. 55–57.

4. Loganina, V.I. Application of activated diatomite for dry lime mixes / V.I. Loganina, E.E. Simonov, W. Jezierski, D. Małaszkiwicz // Construction and Building Materials. – 2014. – Vol. 65. – P. 29–37.

5. Gorchakov, G.I. Composition, structure and properties of cement concretes / G.I. Gorchakov, L.P. Orendlikher, V.I. Savin [et al.]. – М.: Stroyizdat, 1976. – 115 p.

6. Sakata, Shiro. Practical Guide to Quality Management / Sakata Shiro; per. from the 4th Japanese edition S.I. Myshkina; ed. IN AND. Gostyaeva. – М.: Mechanical Engineering, 1980. – 215 p.

7. Gmurman, V.E. Probability theory and mathematical statistics / V.E. Gmurman. – 6th ed., revised. – М.: Higher school, 1998.

УДК 691.175.2

Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева

Россия, 430005, Саранск,
ул. Большевикская, д. 68

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

Тюрин Михаил Владимирович,
аспирант 4 года обучения направления
подготовки 08.06.01 «Техника и технология
строительства»
E-mail: mikh-tyu@mail.ru

Mordovian State University
named after N.P. Ogarev

Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.

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

Tyurin Mikhail Vladimirovich,
Postgraduate student 4 years of study areas of
study 08.06.01 «Engineering and construction
technology»
E-mail: mikh-tyu@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ НА ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПВА

В.Д. Черкасов, М.В. Тюрин

Проведены исследования по получению эффективной вибропоглощающей мастики на основе поливинилацетата. На основе матрицы планирования выявили оптимальный состав рабочей матрицы. Рабочую матрицу модифицировали эпоксидными смолами. Было установлено, что введение эпоксидной смолы УП-563 в количестве 10 % от массы рабочей матрицы приводит к увеличению коэффициента потерь на 35 %.

Ключевые слова: композит, поливинилацетат, смола, дибутилфталат, демпфирующие свойства

EFFECTS OF EPOXY RESIN ON THE DAMPING PROPERTIES OF A PVA-BASED MATERIAL

V.D. Cherkasov, M.V. Tyurin

Some studies have been conducted to obtain an effective vibration-absorbing mastic based on polyvinyl acetate. Based on the planning matrix, an optimal composition of the working matrix is identified. The working matrix is modified with epoxy resins. It is found that introduction of UP-563 epoxy resin in an amount of 10 % of the working matrix mass leads to an increase of the loss coefficient by 35 %.

Keywords: composite, polyvinyl acetate, resin, dibutyl phthalate, damping properties

С быстрым развитием современной промышленности и транспортной системы проблема вибро- и шумового загрязнения, наносящего вред промышленной безопасности, здоровью человека и окружающей среде, становится все более серьезной [1–4].

Материалы и методы исследований

Для гашения вибрации в машинах и механизмах широко используют вибропоглощающие покрытия (ВПП). Существуют три вида вибропоглощающих покрытий: мягкие, жесткие, армированные. Из всех трех видов покрытий наиболее просты в изготовлении мягкие покрытия. Мягкие вибропоглощающие покрытия представляют собой слой мягкой пластмассы, наносимой на демпфируемую конструкцию [5].

Коэффициент потерь изгибно-колеблющейся пластины определяется следующим выражением [5]:

$$\eta = \frac{\eta_2 \alpha_2 \beta_2 (\alpha_2^2 + 12\alpha_{21}^2)}{1 + \alpha_2 \beta_2 (\alpha_2^2 + 12\alpha_{21}^2)}, \quad (1)$$

где η_2 – коэффициент потерь материала покрытия; $\alpha_2 = \frac{h_2}{h_1}$; $\beta_2 = \frac{E_2}{E_1}$;

$$\alpha_2 = \frac{h_{21}}{h_1} = \frac{1 + \alpha_2}{2};$$

E_1, E_2 – модуль Юнга демпфируемой пластины и вибропоглощающего покрытия; h_1, h_2 – толщины демпфируемой пластины и вибропоглощающего покрытия; h_{21} – расстояние между нейтральными плоскостями пластины и слоя покрытия.

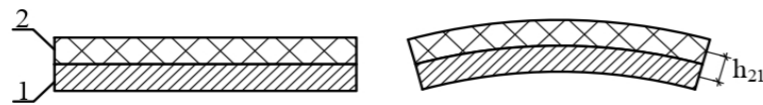


Рис. 1. Конструкция мягкого вибропоглощающего покрытия и характер его деформации: 1 – деформируемая пластина; 2 – вибропоглощающий материал

На рис. 2 представлена зависимость диссипативных свойств конструкции η с мягким ВПП от отношения толщины покрытия и пластины α_2 , построенная для различных значений β_2 .

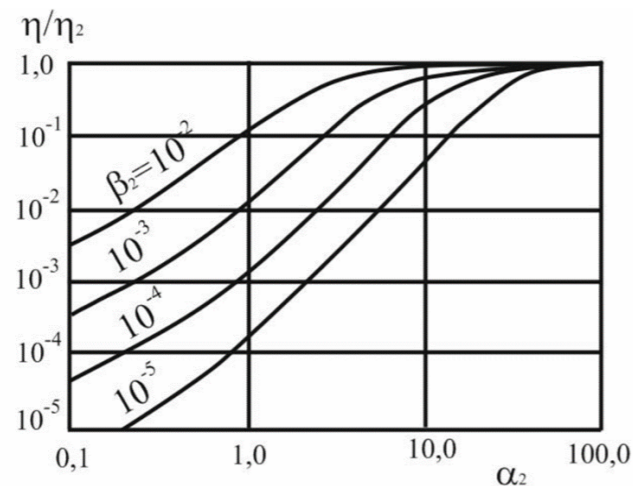


Рис. 2. Зависимость коэффициента потерь конструкции с мягким ВПП от толщины пластины и покрытия α_2 при различных значениях β_2 [5]

Принимая для некоторой пластины h_1 и E_1 неизменными (const), из анализа рис. 2 получаем:

- по мере увеличения толщины вибропоглощающего покрытия ($0,1 < \alpha_2 < 10$) коэффициент потерь конструкции η растет, асимптотически приближаясь к значению коэффициента потерь покрытия η_2 . При дальнейшем росте ($\alpha_2 \rightarrow 100$) увеличение η прекращается. Это объясняется смещением нейтральной плоскости составной пластины в сторону покрытия и соответственно уменьшением деформации растяжения последнего и поглощения энергии в нем. На практике целесообразно принимать коэффициент α_2 равным 1,5–2;

- при изменении коэффициента α_2 в диапазоне 1–5 изменение жесткости покрытия на несколько порядков симметрично увеличивает вибропоглощающие свойства конструкции.

Установлено, что диссипативные свойства вибропоглощающего покрытия зависят от диссипативных свойств полимерного слоя, толщины слоев и соотношения модулей упругости материалов слоев. Однако в современных условиях применение чистых полимеров в качестве вязкоупругого слоя ВПП очень дорого и нетехнологично.

Следовательно, необходимо установить закономерности влияния наполнителя на диссипативные свойства ВПП [6].

Результаты исследований и обсуждение

Для установления влияния количества наполнителя и пластификатора на демпфирующие свойства полимерного композита использовали метод планирования эксперимента. В качестве матрицы планирования применили план Коно, состоящий из 9 опытов. Варьируемыми факторами служили: X_1 – содержание графита, X_2 – содержание дибутилфталата. Матрица планирования, рабочая матрица и результаты испытания приведены в таблице.

Матрица планирования и результаты испытания

№ состава	Матрица планирования		Рабочая матрица		Коэффициент потерь, $\eta_{\text{ср}}$
	X_1 графит	X_2 ДБФ	Графит, %	ДБФ, %	
1	+1	+1	50	10	0,085
2	0	+1	40	10	0,090
3	-1	+1	30	10	0,155
4	+1	0	50	6,5	0,125
5	0	0	40	6,5	0,105
6	-1	0	30	6,5	0,100
7	+1	-1	50	3	0,100
8	0	-1	40	3	0,030
9	-1	-1	30	3	0,030

После проведения испытаний и статистической обработки результатов эксперимента получены следующие уравнения регрессии, связывающие зависимости коэффициента потерь испытанных композитов от рассматриваемых факторов:

$$K_1 = 0,105 - 0,012 \cdot X_1 - 0,03 \cdot X_2 + 0,008 \cdot X_1^2 - 0,035 \cdot X_1 X_2 - 0,045 \cdot X_2^2 - 0,002 \cdot X_1^2 X_2 - 0,012 \cdot X_1 X_2^2 + 0,025 \cdot X_1^2 X_2^2. \quad (1)$$

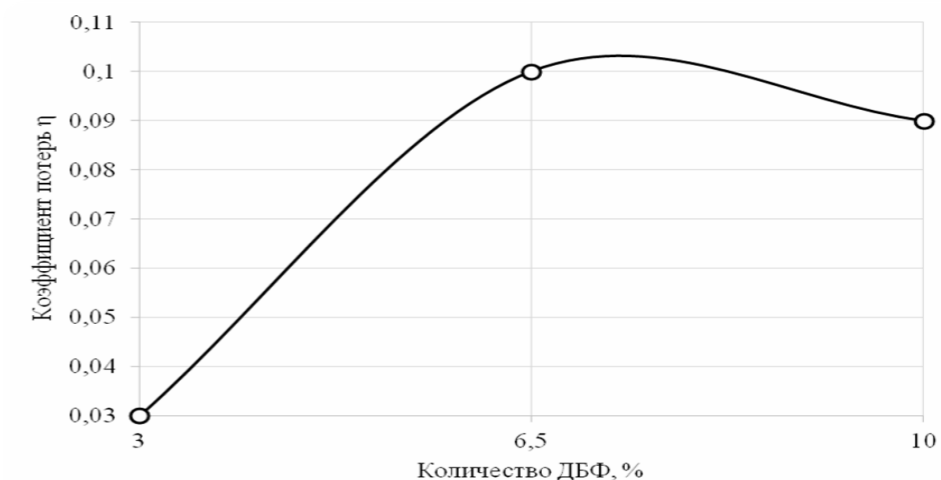


Рис. 3. Влияние ДБФ на коэффициент потерь

Для установления влияния наполнителя на демпфирующие свойства полимерных композиционных материалов проведены исследования на составах рабочей матрицы, которая представляет собой поливинилацетат (ПВА), наполнитель графит и дибутилфталат (ДБФ). Составы наносили на стальную пластину толщиной 1,2 мм, шириной 20 мм и длиной 240 мм (см. рис. 1).

Коэффициент потерь материала определяли резонансным методом по ГОСТ 19873-74 на установке Briel & Kjaer 08-13-10. Сущность метода заключается в возбуждении у образца поперечных (изгибных) колебаний основной гармонике. По частотам резонансных колебаний находим модуль упругости, а по ширине резонансных пиков – коэффициент потерь.

Из рабочей матрицы мы видим, что 3-й состав показал хороший результат. Для его модификации будем добавлять такие материалы, как смола эпоксидная УП-563 (ТУ 2225-336-09201208-94), смола эпоксидная УП-631 (ТУ 2225-020-00203306-96), компаунд силлагерм 2111 термостойкий марки А (ТУ 2513-002-01296014-2015).

Эпоксидная смола является одним из наиболее широко используемых полимеров в области покрытий, клеев и конструкционных материалов, более того, армированные волокнами эпоксидные композиты обычно применяются в качестве высокоэффективных конструкционных материалов в авиационной и аэрокосмической промышленности благодаря их низкой плотности и хорошим механическим характеристикам [7, 8].

Результаты исследования представлены на рис. 4. Как видно из рис. 4, положительное влияние на вибропоглощающие свойства оказывает эпоксидная смола УП-563.

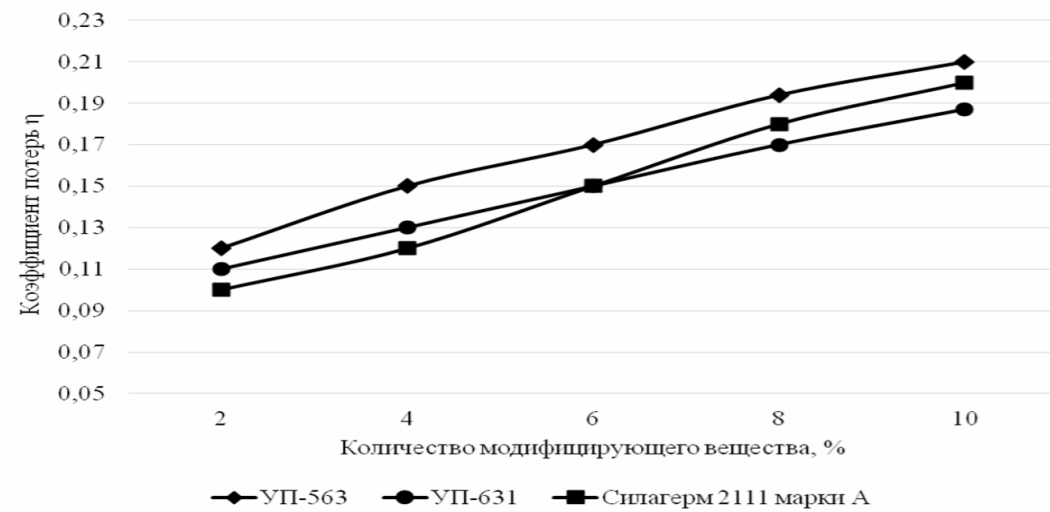


Рис. 4. Влияние модифицирующего вещества на вибропоглощающие свойства мастики

Введение эпоксидной смолы приводит к увеличению коэффициента потерь. Экспериментальное исследование показало, что введение эпоксидной смолы УП-563 увеличивает коэффициент потерь на 35 %.

Список литературы

1. Ni, N.; Wen, Y.; He, D.; Yi, X.; Wang, C.; Xu, Y. Synergistic reinforcement effect of aramid nonwoven fabrics and PVDF on mechanical and damping properties of bismaleimide matrix composites. *Compos. Part A Appl. Sci.* 2015, 79, 176–182.
2. Li, Q.; Jiang, G.; Dong, J.; Hou, J.; He, G. Damping behavior and energy absorption capability of porous magnesium. *J. Alloys Compd.* 2016, 680, 522–530.
3. Wu, J.; Li, C.; Wang, D.; Gui, M. Damping and sound absorption properties of particle reinforced Al matrix composite foams. *Compos. Sci. Technol.* 2003, 63, 569–574.
4. Jones, R. *Mechanics of Composite Materials*; McGraw-Hill: New York City, NY, USA, 1975; ISBN 0-07-032790-4-0.
5. Никифоров, А.С. Вибропоглощение на судах / А.С. Никифоров. – Л.: Судостроение, 1979. – 184 с.
6. Авдонин, В.В. Вибропоглощающие композиционные покрытия: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Авдонин Валерий Викторович. – Саранск, 2015. – 123 с.

7. Allaoui, A.; Hoa, S.V.; Pugh, M.D. The electronic transport properties and microstructure of carbon nanofiber/ epoxy composites. *Compos. Sci. Technol.* 2008, 68, 410–416.

8. Carter, J.T.; Emmerson, G.T.; Lo Faro, C.; McGrail, P.T.; Moore, D.R. The development of a low temperature cure modified epoxy resin system for aerospace composites. *Compos. Part. A Appl. Sci.* 2003, 80, 83–91.

References

1. Ni, N.; Wen, Y.; He, D.; Yi, X.; Wang, C.; Xu, Y. Synergistic reinforcement effect of aramid nonwoven fabrics and PVDF on mechanical and damping properties of bismaleimide matrix composites. *Compos. Part A Appl. Sci.* 2015, 79, 176–182.
2. Li, Q.; Jiang, G.; Dong, J.; Hou, J.; He, G. Damping behavior and energy absorption capability of porous magnesium. *J. Alloys Compd.* 2016, 680, 522–530.
3. Wu, J.; Li, C.; Wang, D.; Gui, M. Damping and sound absorption properties of particle reinforced Al matrix composite foams. *Compos. Sci. Technol.* 2003, 63, 569–574.
4. Jones, R. *Mechanics of Composite Materials*; McGraw-Hill: New York City, NY, USA, 1975; ISBN 0-07-032790-4-0.
5. Nikiforov, A.S. *Vibration absorption on ships* / A.S. Nikiforov. – L.: Sudostroenie, 1979. – 184 p.
6. Avdonin, V.V. *Vibration-absorbing composite coatings: dis. ... cand. of Sciences: 05.23.05* / Avdonin Valery Viktorovich. – Saransk, 2015. – 123 p.
7. Allaoui, A.; Hoa, S.V.; Pugh, M.D. The electronic transport properties and microstructure of carbon nanofiber/ epoxy composites. *Compos. Sci. Technol.* 2008, 68, 410–416.
8. Carter, J.T.; Emmerson, G.T.; Lo Faro, C.; McGrail, P.T.; Moore, D.R. The development of a low temperature cure modified epoxy resin system for aerospace composites. *Compos. Part. A Appl. Sci.* 2003, 80, 83–91.

УДК 691

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

Тараканов Олег Вячеславович,
доктор технических наук, профессор,
декан факультета «Управление
территориями»
E-mail: tarov60@mail.ru

Белякова Елена Александровна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Кадастр недвижимости и право»
E-mail: var_lena@mail.ru

Кагина Анна Алексеевна,
студент факультета «Управление
территориями»
E-mail: zigk@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

Tarakanov Oleg Vyacheslavovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Dean of the faculty «Territory Management»
E-mail: tarov60@mail.ru

Belyakova Elena Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Real Estate Cadastre and
Law»
E-mail: var_lena@mail.ru

Kagina Anna Alekseevna,
Student of the Faculty of Territory
Management
E-mail: zigk@pguas.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД В БЕТОНАХ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

О.В. Тараканов, Е.А. Белякова, А.А. Кагина

Выполнен анализ применения тонкодисперсных микронаполнителей в цементных системах. Проанализированы возможные механизмы влияния кальцита на формирование микроstructures цементных материалов. Проведены исследования влияния кальцита на формирование начальной структуры и фазовый состав продуктов гидратации цементного камня. Установлено, что тонкодисперсный кальцит уплотняет структуру и способствует активации формирования гидратных фаз и твердых растворов, повышающих прочность цементных материалов. Выполнены исследования влияния карбонатного микронаполнителя на прочность цементно-песчаных растворов и бетонов.

Ключевые слова: бетоны нового поколения, тонкодисперсные микронаполнители, кальцит, молотый песок, реологически активная матрица, водосодержание, эффективность суперпластификаторов, зарядовое состояние поверхности, пластическая прочность, микроструктура, рентгеносрезовой анализ, гидросиликаты кальция, гидроалюминаты кальция, прочность цементно-песчаных растворов и бетонов

PROSPECTS OF CARBONATE ROCKS APPLICATION IN NEW GENERATION CONCRETE

O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova, A.A. Kagina

The analysis of the use of finely dispersed microfillers in cement systems has been carried out. Possible mechanisms of the influence of calcite on the formation of the microstructure of cement materials are analyzed. Investigations of the influence of calcite on the formation of the initial structure and phase composition of the products of hydration of cement stone have been carried out. It is found that finely dispersed calcite densifies the structure and promotes the activation of the formation of hydrate phases and solid solutions, which increase the strength of cement materials. Investigations of the effect of carbonate micro-filler on the strength of cement-sand mortars and concretes have been carried out.

Keywords: new generation concretes, finely dispersed micro-fillers, calcite, ground sand, rheologically active matrix, water content, effectiveness of superplasticizers, surface charge state,

plastic strength, microstructure, X-ray shear analysis, calcium hydrosilicates, calcium hydroaluminates, strength of cement-sand mortars and concretes

Высокопрочные бетоны нового поколения (БНП) в настоящее время все более широко внедряются в строительное производство. Современный бетон – это многокомпонентный композиционный строительный материал, в состав которого в отличие от традиционных бетонов входят не только цемент, песок, щебень и вода, но также микронаполнители и химические модификаторы различного функционального назначения.

Наиболее часто в составе бетонов используются комплексные химические модифицирующие добавки, главным образом на основе супер- и гиперпластификаторов (СП и ГП), а также минеральные микронаполнители различной дисперсности. В качестве микронаполнителей применяются микрокремнеземы, метакаолины, некоторые зола тепловых электростанций, металлургические шлаки, минеральные шламы на основе вторичного сырья и др. Традиционно считается, что гидратационно активные добавки связывают гидроксид кальция, выделяющийся при гидратации цемента, в гидросиликаты кальция различной основности, являющиеся основными носителями прочности цементных бетонов. Вместе с тем в работах В.И. Калашникова [1–5] показано, что минеральные тонкодисперсные порошки выполняют роль не только гидратационно активных добавок, но главным образом увеличивают объем реологической матрицы, что, в свою очередь, позволяет повысить эффективность СП и ГП в бетонах, получать смеси значительно более пластичные, с низким водосодержанием и, следовательно, бетоны, обладающие высокой прочностью и долговечностью.

Новым направлением в теории и практике бетонов нового поколения является применение в порошковых бетонах тонкомолотого песка и кремнесодержащих пород, таких, как кремень, базальт, андезит, халцедон, дацит, вулканические стёкла, пеплы, трассы, молотый гравий и т.д.

В отличие от микрокремнезема, являющегося нанодисперсным, подобные породы необходимо размалывать. Вместе с тем следует отметить, что тонкомолотые кремнесодержащие породы имеют большие перспективы применения в будущем, поскольку ресурсы микрокремнезема ограничены. В исследованиях последних лет [6] отмечается высокая эффективность использования тонкодисперсных карбонатных пород в технологиях БНП. Карбонатные породы часто встречаются в земной коре, и характерно, что одной из отличительных особенностей подобных пород является близость кристаллических решеток к структурам гидратированных минералов цементного камня.

В модифицированных цементных системах в процессе роста частиц и кристаллизации большую вероятность встраивания в структуру гидратов имеют молекулы и ассоциаты вещества, близкого к ним по кристаллохимическому строению. В полиминеральном цементном вяжущем, наполненном тонкодисперсным кальцитом, эта возможность является избирательной, поскольку лишь некоторые гидратные фазы ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, C_2AH_8 , $\text{C}_4\text{AH}_{13-19}$, C_4FH_{13} и некоторые другие) имеют параметры кристаллических ячеек, близкие к кальциту. Например, у портландита параметр элементарной гексогональной ячейки $c=0,4909$ нм является близким к параметру гексогональной структуры кальцита: $a=0,4969$ нм. Элементарные ячейки всех AFm-фаз основаны на гексогональных структурных элементах с параметром 0,57–0,59 нм. В связи с этим в процессе гидратации цемента возможны два механизма действия кальцита:

- встраивание молекул CaCO_3 в структуру гидратов, близких по кристаллохимическому строению;
- структурообразующее влияние поверхности кальцита как подложки для ориентированной кристаллизации новообразований.

Многообразие габитусов кристаллов кальцита и значительное пересыщение в системе в начальный период кристаллизации позволяют предполагать возможность протекания этих процессов как индивидуально, так и параллельно. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что наибольшая эффективность применения карбонатных микронаполнителей обеспечивается не в «тощих» смесях, а в составах со

средним расходом цемента. Это объясняется тем, что одним из возможных механизмов активирующего действия кальцита является эпитаксиальное наращивание гидратных новообразований на его частицах, как на затравках кристаллизации. Недостаток цементной матрицы в составах с малым расходом вяжущего снижает эффективность кальцита как подложки для формирования эпитаксиальных контактов срастания.

В процессе роста кристаллов молекулы, адсорбирующиеся на поверхности, располагаются таким образом, чтобы атомы имели максимальное число связей с атомами кристалла. Это способствует образованию и разрастанию в адсорбционном слое двухмерных кластеров, поскольку закрепившиеся на поверхности молекулы способствуют увеличению количества адсорбционных центров и вовлечению новых молекул в структуру кристалла. Образование двухмерных кластеров характерно для частиц, имеющих различные размеры (от нескольких нанометров до микроскопических) и природу вещества. Разрастание кластеров происходит значительно быстрее, чем их зарождение. В конечном счете это приводит к последовательному отложению мономолекулярных слоёв на поверхности кристалла.

В тонкозернистых бесщебеночных реакционно-порошковых бетонах нового поколения объёмная концентрация твердой фазы без песка достигает 55–65 %, а вместе с песком – 75–78 % и практически не уступает концентрации твёрдой фазы в тяжёлых бетонах с СП и ГП ($C_1=0,80-0,85$). Таким образом, в бетонах нового поколения высокая прочность достигается не только за счёт реакционно-активных компонентов, но в большей степени за счёт реологически активной матрицы, позволяющей в присутствии СП и ГП значительно снижать водосодержание бетонных смесей.

Известно, что цемент в контакте с водой является гидратирующейся нестабильной системой, в которой с первых секунд после затворения образуются суперколлоидные частицы, способствующие загустеванию. В отличие от цемента частицы большинства горных пород при контакте с водой не гидратируются и не видоизменяются в течение сотен и даже тысяч лет. Известно, что коллоидные частицы слабо поддаются разжиженности в присутствии СП и ГП. Таким образом, несмотря на то что все СП и ГП создаются для цементных систем, эти же системы не позволяют достичь высокой эффективности действия в них СП и ГП.

Процесс гидратации цемента в присутствии СП и ГП осложняется еще и тем, что, начиная с 0,1 сек после водозатворения, в цементной системе образуются метастабильные гидроалюминаты кальция, содержащие в своей структуре большое количество воды (эттрингит, C_2AH_8 , C_4AH_{13-19} и т.д.). Кроме того, эти гидраты стабилизируются в присутствии практически всех пластифицирующих добавок, что способствует замедлению их перехода в наиболее термодинамически устойчивые структуры (например, моногидросульфаталюминат кальция, C_3AH_6 , CAH_{10}). Всё это способствует быстрому загустеванию пластифицированных цементных систем и снижению эффективности действия СП и ГП. В пластичных бетонных смесях с каменной мукой существенно снижается замедляющее влияние СП и ГП на формирование ранней прочности бетона по сравнению с бетоном без каменной муки.

Ранее установлено [1], что практически все СП и ГП значительно лучше разжижают минеральные порошки или цементно-минеральные системы по сравнению с чистым цементом. Задачей исследований являлось изучение характера влияния пластифицирующих добавок на разжижение цементных и минеральных паст, анализ кинетики начального структурообразования и формирования гидратных фаз цементных систем с карбонатным микронаполнителем и в конечном счете оценка влияния карбонатного микронаполнителя на прочность цементно-песчаных растворов и бетона нового поколения.

Проводились исследования по оценке пластифицирующего влияния добавок Melflux 2651F и Полипласт СП-1 на цементные и минеральные суспензии (табл. 1). Дозировка добавок составляла 1,5 % от массы цемента. Установлено, что карбонатные микронаполнители в значительно большей степени разжижаются в присутствии добавки СП-1 в отличие от цемента и молотой опоки. Добавка на поликарбонатной основе Melflux 2651F оказалась более эффективной для цемента, а также карбонатных

суспензий. Таким образом, минеральные добавки на основе карбонатных пород целесообразно применять в цементных системах для повышения эффективности СП и ГП.

Т а б л и ц а 1

Влияние добавок суперпластификаторов на разжижение цементных и минеральных суспензий

Вид цемента/каменной муки	Диаметр расплыва (%) по отношению к цементу	
	с добавкой Melflux 2651F	с добавкой СП-1 «Полипласт»
Портландцемент Цем I 42,5Н	100	100
Портландцемент Цем I 42,5Н с добавкой СП (1,5 %)	210	140
Молотая опока	100	100
Молотая опока с добавкой СП (1,5 %)	180	162
Молотый доломит	100	100
Молотый доломит с добавкой СП (1,5 %)	220	250
Молотый кальцит	100	100
Молотый кальцит с добавкой СП (1,5 %)	190	188

В традиционных бетонах реологической матрицей на микроуровне служит цементно-песчаный раствор, в то время как для песка реологической матрицей, ответственной за растекаемость смесей, является цементно-водная суспензия. Поэтому для получения высокого уровня пластификации необходимо увеличение тонкодисперсной составляющей. Увеличение количества цемента может дать положительный результат, однако это приводит к его перерасходу и повышению удельного расхода цемента на единицу прочности. Таким образом, для получения высокопластифицированных бетонов необходимо вводить в состав бетона до 70–100 % от массы цемента тонкомолотой каменной муки, увеличивающей долю водно-дисперсной составляющей; чем меньшим является расход цемента, тем большее количество необходимо вводить каменной муки.

Вполне естественно возникает вопрос: муку каких горных пород следует использовать?

Например, в наших исследованиях растекаемости цементно-песчаных смесей с тонкомолотым диатомитом было получено снижение растекаемости смесей вследствие высокой пористости диатомитового порошка, хотя эта минеральная добавка является гидратационно активной. Поэтому для получения высокопластифицированных саморастекающихся бетонов следует использовать каменную муку плотных и прочных горных пород.

Другой важный аспект – зарядовое состояние поверхности частиц каменной муки, которое для большинства горных пород является знакопеременным. Исследования физико-химическими методами характера распределения зарядов достаточно сложны и, очевидно, в заводских лабораторных условиях предприятий ЖБИ маловероятны. Поэтому оценить характер влияния СП и ГП на растекаемость минеральных порошков можно простым практическим тестированием.

Поверхность кальцита заряжена в целом положительно, в то время как поверхность кварца имеет отрицательный заряд. Очевидно, этим можно объяснить большую растекаемость тонкомолотых карбонатных порошков в присутствии СП и ГП в отличие от микрокремнезема, молотого песка и опоки.

На свежесформированной поверхности кварца находятся главным образом силоксановые группы. При контакте с парами воды или водными растворами силоксановые группы, обладающие двойными связями, оказываются неустойчивыми и присоединяют молекулу воды с образованием силанольной группы. При контакте поверхности

кварца с водными растворами силанольные группы диссоциируют с отщеплением иона H^+ . Степень диссоциации зависит от температуры и pH среды. При $pH > 2,5$ на поверхности кварца образуются диссоциированные силанольные группы, которые создают отрицательный поверхностный заряд.

Однако установлено [7–9], что в бетонах нового поколения, полученных на тонкомолотых песках, достигается высокая эффективность СП и ГП, позволяющая получать смеси с низким водосодержанием. Одной из причин подобного поведения молотого песка, возможно, является изменение заряда поверхности его частиц в присутствии формирующихся на ранних стадиях гидратации цемента гидратов $Ca(OH)_2$ и АFm-фаз. При гидратации силикатных минералов цемента ионы Ca^{2+} находятся в системе в виде аквакомплексов $[Ca(H_2O)_6]^{2+}$. Возможно, что силанольные группы поверхности кварца могут взаимодействовать с подобными аквакомплексами с изменением поверхностного заряда. Кроме того, в присутствии цемента, выделяющего при гидратации гидроксид кальция и другие гидраты, имеющие также различные зарядовые состояния, возможно изменение заряда поверхности частиц минеральных микронаполнителей и, следовательно, изменение реологической активности цементно-минеральных систем.

Таким образом, на процессы гидратации, структурообразования и твердения цементно-минеральных систем оказывает влияние множество факторов, воздействующих в последующем на прочность и долговечность бетона. Известно, например, что в процессе длительного твердения прочность бетона изменяется по так называемому «пилообразному профилю», иначе говоря, возможны периодические спады и рост прочности [10]. Это может происходить под воздействием внешних факторов вследствие перекристаллизации этtringита и гидроалюминатов с высвобождением молекул воды, протеканием вторичной гидратации и разуплотнением структуры вследствие формирования гидратов с более высокой плотностью. Перекристаллизация гидроалюминатов вызывает уменьшение объёма твёрдой фазы и, соответственно, увеличение пористости структуры, что может привести к временному снижению прочности. Например, плотность метастабильных гидроалюминатов составляет: CAH_{10} – 1730 кг/м³; C_2AH_8 – 1950 кг/м³, а плотность наиболее стабильной гидратной фазы C_3AH_6 составляет 2530 кг/м³.

Для прогнозирования процессов гидратации, возможности перекристаллизации, а также характера структурообразования в присутствии микронаполнителей и химических модификаторов необходимо исследовать их влияние на процессы формирования гидратных фаз, поскольку в конечном счете микроструктура гидратированного цементного камня во многом определяет эксплуатационные свойства и долговечность бетона. Проведенный анализ показал, что карбонатные породы и кварцевый песок являются горными породами, открывающими широкие возможности их применения в бетонах нового поколения.

С целью определения характера влияния тонкодисперсного кальцита на формирование начальной структуры цементных систем в присутствии СП и без него была выполнена серия экспериментов по оценке характера изменения пластической прочности цементных паст, определяющей кинетику начального структурообразования.

Пластометрические исследования цементно-песчаных растворов 1:2 с добавлением различного количества тонкодисперсного кальцита показали, что с увеличением количества добавки от 10 % и более пластическая прочность возрастает. Это может быть объяснено двумя основными причинами:

- интенсификацией образования гидратов Аft-фазы (метастабильных гидроалюминатов кальция). Однако это возможно только при избытке гипса;
- уплотнением структуры за счёт равномерного распределения тонкодисперсного кальцита в межзерновом пространстве.

С целью определения характера влияния тонкодисперсного кальцита на фазовый состав цементного камня, были выполнены рентгенофазовые исследования образцов чистого цементного камня и цементного камня, гидратированного с добавкой кальцита в количестве 20 % от массы цемента (табл. 2 и 3).

Расчетные данные рентгенограммы образца, гидратированного без добавки цементного камня

2θ	d, Å	I, %	I, мм	Фаза
12,47	7,0981	40	100	ксонотлит $6CaO \times 6SiO_2 \times H_2O$
23,10	3,8502	9	22	гиролит $2CaO \times 3SiO_2 \times 2,5H_2O$
29,47	3,0309	100	250	$CaCO_3$
31,55	2,8356	2	6	трускотит $CaO \times 2SiO_2 \times 0,67H_2O$ гиролит $2CaO \times 3SiO_2 \times 2,5H_2O$
32,33	2,7690	4	10	алит
32,84	2,7271	1	2	алит
36,03	2,4927	12	30	$CaCO_3$
39,47	2,2830	15	38	$CaCO_3$
43,25	2,0918	15	38	ГСАК-1
47,33	1,9206	5	16	$Ca(OH)_2$
47,61	1,9099	14	35	$Ca(OH)_2$
48,50	1,8770	14	35	ГСАК-1
56,60	1,6261	2	4	$CaCO_3$
57,50	1,6027	2	5	CAH_{10}

Расчетные данные рентгенограммы образца цементного камня, гидратированного с добавкой тонкодисперсного кальцита (20 % от массы цемента)

2θ	d, Å	I, %	I, мм	Фаза
8,85	9,9917	1	3	гиролит $2CaO \times 3SiO_2 \times 2,5H_2O$
12,46	7,1038	56	140	ксонотлит $6CaO \times 6SiO_2 \times H_2O$
21,50	4,1330	4	10	трускотит $CaO \times 2SiO_2 \times 0,67H_2O$
23,12	3,8469	9	23	гиролит $2CaO \times 3SiO_2 \times 2,5H_2O$
24,95	3,5688	4	10	CAH_{10}
26,74	3,3338	1	3	гиролит $2CaO \times 3SiO_2 \times 2,5H_2O$
27,15	3,2844	2	4	ксонотлит $6CaO \times 6SiO_2 \times H_2O$
29,47	3,0309	100	250	$CaCO_3$
31,55	2,8356	3	7	трускотит $CaO \times 2SiO_2 \times 0,67H_2O$ гиролит $2CaO \times 3SiO_2 \times 2,5H_2O$
32,85	2,7263	1	2	алит
33,90	2,6443	1	2	$Ca(OH)_2$
36,05	2,4913	10	25	$CaCO_3$
39,00	2,3094	15	37	$CaCO_3$
43,24	2,0923	12	30	ГСАК-1
43,95	2,0601	2	4	ГСАК-1
47,18	1,9263	6	15	$Ca(OH)_2$
47,56	1,9118	18	45	$Ca(OH)_2$
48,59	1,8737	17	42	$CaCO_3$
57,50	1,6027	4	10	CAH_{10}
59,90	1,5441	1	2	

По данным выполненного анализа установлено, что в присутствии кальцита образуется большее количество дисперсных метастабильных химически активных гидратных фаз, уплотняющих структуру и способствующих формированию кристаллизационных контактов срастания. Формирование многоступенчатых пиков на рентгенограммах свидетельствует о возможности образования твёрдых растворов гидратных фаз сложного химического состава. Например, в области малых углов ($2\theta = 8-12^\circ$) на

рентгенограмме образца с добавкой CaCO_3 зафиксированы слабокристаллические фазы с параметрами $d=9,9917 \text{ \AA}$. Подобные отражения могут быть отнесены к фазе С-S-H(II) ($d=9,8 \text{ \AA}$) и к фазе гиролита $2\text{CaO}_3\text{SiO}_2 \times 2,5\text{H}_2\text{O}$. Можно предположить, что эти отражения относятся к твёрдому раствору 2-х и более фаз, поскольку известно, что гиролит является одной из промежуточных фаз, на основе которых могут образовываться гидросиликатные структуры, близкие к трукотиту.

Характерной особенностью расчётных данных РФА с добавкой CaCO_3 является образование гидросиликатов кальция, близких по структуре к ксонотлиту ($7,09-7,10 \text{ \AA}$ и $3,26-3,28 \text{ \AA}$). Это возможно, поскольку через различные промежутки времени тоберморитовые фазы могут трансформироваться в ксонотлит. Условия перехода тоберморитовых фаз в ксонотлит и гиролитовых фаз в трукотит во многом зависят от количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в системе, поскольку $\text{Ca}(\text{OH})_2$ более активно участвует в химических процессах, чем SiO_2 . Интенсивность отражений алита несколько выше в контрольном образце, что связано с активацией гидратации силикатных фаз цемента в присутствии кальцита. Об этом также свидетельствуют некоторые увеличения отражений извести ($1,93$ и $2,63 \text{ \AA}$) в образце с добавкой. Отражения, характерные для кальцита ($3,029$; 249 ; $2,277 \text{ \AA}$), в обоих образцах примерно равны, что свидетельствует о возможности встраивания молекул кальцита в структуру гидратных фаз, например скаутита $\text{Ca}_7[\text{Si}_6\text{O}_{18}] \times \text{CO}_3 \times \text{H}_2\text{O}$, для которого основой является ксонотлит. Характерно, что отражения гидросиликатов кальция, близких по структуре к ксонотлиту, несколько выше в образце с добавкой кальцита. Поэтому образование скаутита вполне вероятно.

Таким образом, при гидратации цемента в присутствии тонкодисперсного кальцита одной из основных причин повышения прочности является активация формирования гидросиликатных фаз сложного состава и, возможно, скаутита.

Следующим этапом исследований являлась оценка влияния карбонатных и смешанных микронаполнителей на прочность цементных материалов. Результаты влияния микронаполнителей на прочность цементно-песчаных растворов и высокопрочных бетонов представлены в табл. 4, 5 и 6.

Т а б л и ц а 4

Влияние карбонатного микронаполнителя на прочность цементно-песчаных растворов

Состав	Количество добавки (%) от массы цемента	Прочность при сжатии, МПа	
		14 сут	28 сут
ЦП раствор 1:3 ЦЕМ I 42,5Н В/Ц = 0,53 без добавки	-	16,2	17,0
ЦП раствор 1:3 В/Ц = 0,53 с добавкой тонкодисперсного кальцита	5	23,1	28,4
		143	167
ЦП раствор 1:3 В/Ц = 0,53 с добавкой тонкодисперсного кальцита	10	21,1	29,7
		130	175
ЦП раствор 1:3 В/Ц = 0,53 с добавкой тонкодисперсного кальцита	20	19,6	29,9
		121	176
ЦП раствор 1:3 В/Ц = 0,57 с добавкой тонкодисперсного кальцита + С-3	10	21,6	30,7
		0,5	133
ЦП раствор 1:3 В/Ц = 0,57 с добавкой тонкодисперсного кальцита + С-3	20	18,7	24,3
		0,5	115

Примечание. В таблице в знаменателе прирост прочности в % к контрольному составу.

Показано, что добавка тонкодисперсного кальцита в количестве до 20 % от массы цемента, в том числе совместно с суперпластификатором С-3, способствует стабильному повышению прочности в среднем в пределах 20-75 %. При использовании бинарных микронаполнителей эффективность добавок несколько повышается по сравнению с однокомпонентными (табл. 5); поэтому применение бинарных систем является более перспективным, поскольку подобные добавки могут обеспечить достижение синергетических эффектов и в определенной степени нивелировать негативное влияние отдельных компонентов добавок.

Т а б л и ц а 5

Влияние микронаполнителей на прочность цементно-песчаных растворов

Состав	Количество добавки (%) от массы цемента	Прочность при сжатии, МПа		
		7 сут	14 сут	28 сут
ЦП раствор 1:4 В/Ц = 0,65 без добавки	-	14,4	16,6	21,0
ЦП раствор 1:4 В/Ц = 0,65 с добавкой тонкодисперсного кальцита + С-3	5	16,0	18,8	23,4
		0,5	111	113
ЦП раствор 1:4 В/Ц = 0,65 с добавкой тонкодисперсного кальцита + С-3	10	18,0	20,8	27,2
		0,5	125	129
ЦП раствор 1:4 В/Ц = 0,65 с добавкой тонкодисперсного кальцита + тонкодисперсная опока + С-3	5	19,6	23,4	28,6
		0,5	13	140

Примечание. В таблице в знаменателе прирост прочности в % к контрольному составу.

Исследования, выполненные на бетонах нового поколения, показали, что использование известняковой каменной муки и малопрочного известнякового щебня позволяет получать эффективные бетоны нового поколения прочностью до 50 МПа (табл. 6).

Т а б л и ц а 6

Прочность бетона нового поколения с карбонатными наполнителями

Состав бетона	Масса, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа		
		1 сут	7 сут	28 сут
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	180	20,0	37,3	48,5
Каменная мука (известняк)	223			
Песок 0,63 мм (известняк)	526			
Песок 0,63-5 мм (известняк)	446			
Щебень 5-10 мм (известняк)	825			
Суперпластификатор Хидетал 9 γ 1 % от массы цемента	-			

Выполненные исследования показали, что применение тонкомолотых карбонатных микронаполнителей и молотого песка открывает широкие возможности получения высокоэффективных (в том числе малоцементных) бетонов нового поколения. Увеличение в цементных бетонах водно-цементно-минеральной реологически активной матрицы позволяет повысить эффективность СП и ГП, снизить водосодержание бетонных смесей и получить бетоны высокой прочности и долговечности.

Количество минеральных добавок в бетонах целесообразно вводить от 100 % и более, в зависимости от расхода цемента. В малоцементных бетонах количество добавок (в том числе и бинарных) может быть увеличено до 150-170 % от массы цемента. Карбонатные микронаполнители позволяют повышать прочность бетона вследствие формирования дисперсных метастабильных гидратных фаз и твердых растворов, уплотняющих структуру и способствующих повышению прочности. В

бетонах с повышенным расходом цемента карбонатные микронаполнители являются более эффективными.

Список литературы

1. Калашников, В.И. Основы пластифицирования минеральных дисперсных систем для производства строительных материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.И. Калашников. – Воронеж, 1999. – 90 с.
2. Калашников, В.И. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 4 (688). – С. 30–37.
3. Калашников, В.И. Высокопрочные бетоны нового поколения / В.И. Калашников, И.В. Ерофеева // Sciencewithoutborders. – 2016. – Vol. 20. – P. 82–85.
4. Калашников, В.И. Изучение реологической активности известняковой муки для получения эффективных бетонов / В.И. Калашников, О.В. Тараканов, И.В. Ерофеева // Найновите постижения на европейската наука. – 2015. – Т. 13. – С. 88–90.
5. Калашников, В.И. Через рациональную реологию – в будущее бетонов / В.И. Калашников // Технология бетонов. – 2007. – №5. – С. 8–10; 2007. – №6. – С. 8–11.
6. Ерофеев, В.Т. Исследование прочности композитов, наполненных порошками карбонатных пород / В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов, И.В. Ерофеева, С.А. Коротаев, Д.В. Емельянов, Э.М. Балатханова // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №1. – С. 5–13.
7. Калашников, В.И. Высокоэффективные порошково-активированные бетоны различного функционального назначения с использованием суперпластификаторов / В.И. Калашников, Е.В. Гуляева, Д.М. Валиев, В.М. Володин, А.В. Хвастунов // Строительные материалы. – 2011. – №11. – С. 44–47.
8. Калашников, В.И. Что такое порошково-активированный бетон нового поколения / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2012. – №10. – С. 70–71.
9. Калашников, В.И. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей / В.И. Калашников, О.В. Тараканов, Ю.С. Кузнецов, В.М. Володин, Е.А. Белякова // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – №8(34). – С. 47–53.
10. Миронов, С.А. Теория и методы зимнего бетонирования / С.А. Миронов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1975. – 700 с.

References

1. Kalashnikov, V.I. Fundamentals of plasticizing mineral dispersed systems for the production of building materials: abstract of dis. ... doc. of Sciences / V.I. Kalashnikov. – Voronezh, 1999. – 90 p.
2. Kalashnikov, V.I. Suspension-filled concrete mixtures for powder-activated concrete of a new generation / V.I. Kalashnikov, V.T. Erofeev, O.V. Cockroaches // News of higher educational institutions. Building. – 2016. – No. 4 (688). – P. 30–37.
3. Kalashnikov, V.I. High-strength concrete of a new generation / V.I. Kalashnikov, I.V. Erofeeva // Sciencewithoutborders – 2016. – Vol. 20. – P. 82–85.
4. Kalashnikov, V.I. Study of the rheological activity of limestone flour for obtaining effective concrete / V.I. Kalashnikov, O.V. Tarakanov, I.V. Erofeeva // Find the comprehension of the European science. – 2015. – Vol. 13. – P. 88–90.
5. Kalashnikov, V.I. Through rational rheology – to the future of concrete / V.I. Kalashnikov // Technology of concrete. – 2007. – No. 5. – P. 8–10; 2007. – No. 6. – P. 8–11.
6. Erofeev, V.T. Investigation of the strength of composites filled with carbonate rock powders / V.T. Erofeev, O. V. Tarakanov, I.V. Erofeeva, S.A. Korotaev, D.V. Emelyanov, E.M. Balatkhanova // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 1. – P. 5–13.

7. Kalashnikov, V.I. Highly efficient powder-activated concretes for various functional purposes using superplasticizers / V.I. Kalashnikov, E.V. Gulyaeva, D.M. Valiev, V.M. Volodin, A.V. Khvastunov // Stroitelnye materialy. – 2011. – No. 11. – P. 44–47.
8. Kalashnikov, V.I. What is a new generation of powder-activated concrete / V.I. Kalashnikov // Building materials. – 2012. – No. 10. – P. 70–71.
9. Kalashnikov, V.I. generation concretes based on dry fine-grained powder mixtures / V.I. Kalashnikov, O.V. Tarakanov, Yu.S. Kuznetsov, V.M. Volodin, E.A. Belyakova // Engineering and construction journal. – 2012. – №8 (34). – P. 47–53.
10. Mironov, S.A. Theory and methods of winter concreting / S.A. Mironov. – 3rd edition, revised and enlarged. – М.: Stroyizdat, 1975. – 700 p.

УДК 519.7:378.1

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ИННОВАЦИОННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СМЕНА ПАРАДИГМ, ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.А. Будылина, А.М. Данилов, Г.А. Фокин

Приводятся базовые модельные представления композиционных материалов как неструктурированной среды, а также при использовании структурного подхода. Определяются содержательные части парадигм как набор концептуальных, методологических, теоретических и экспериментальных положений. Указываются подходы к разработке композитов с позиций смены парадигм на различных этапах развития строительного материаловедения. Композит рассматривается как сложная система с соответствующими системными атрибутами. Обобщенная модель состоит из совокупности частных моделей для каждого из элементов, входящих в иерархическую структуру композита, построенную в соответствии с иерархической структурой его критериев качества. Предполагается систематизация исследований по структурообразованию композитов, что позволит обеспечить фундаментализацию строительного материаловедения на основе использования аналитических методов. Рассматривается решение основной проблемы строительного материаловедения: как по отдельным частным наблюдениям выявить и описать общую закономерность. Анализируются три основных типа конечных прикладных целей исследований: наличие статистически значимой связи между переменными; выявление и прогноз причинных связей, частичное управление выходных переменных путём регулирования управляющими факторами. Показывается, что правильным определением структуры модели определяется план исследования, структура математической модели и интерпретация результатов.

Ключевые слова: композиционные материалы, разработка, методологические принципы, неструктурированная среда, структура, материаловедение, парадигма, смена парадигм

INNOVATIVE DESIGN, CHANGE OF PARADIGMS, TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF BUILDING MATERIALS

E.A. Budylna, A.M. Danilov, G.A. Fokin

Basic model representations of composite materials as an unstructured medium, as well as when using the structural approach, are presented. The content parts of paradigms are defined as a set of conceptual, methodological, theoretical and experimental provisions. Approaches to the development of composites from the standpoint of changing paradigms at various stages of the development of building materials science are indicated. A composite is viewed as a complex system with appropriate system attributes. The generalized model consists of a set of particular models for each of the elements included in the hierarchical structure of the composite, built in accordance with the hierarchical structure of its quality criteria. It is proposed to systematize studies on the structure formation of composites, which will ensure the fundamentalization of building materials science based on the use of analytical methods. The solution to the main problem of building materials science is considered: how to identify and describe a general pattern based on individual private observations. Three main types of final applied research goals are analyzed: the presence of a statistically significant relationship between variables; identification and prediction of causal relationships, partial control of output variables by regulation of control factors. It is shown that the correct definition of the structure of the model determines the research plan, the structure of the mathematical model and the interpretation of the results.

Keywords: composite materials, development, methodological principles, unstructured environment, structure, materials science, paradigm, paradigm shift

Введение

Главным объединяющим началом в материаловедении является присущий материаловедам единый стиль мышления и признания ими определенных фундаментальных теорий и методов (*парадигма* как совокупность знаний, методов, образцов решения задач материаловедения). Парадигма базируется на прошлых достижениях (теориях), считающихся образцом решения научных проблем; ее содержательную часть составляет система научных взглядов, основанных на базовых модельных представлениях, определяющих весь набор методологических, теоретических и экспериментальных положений. В настоящее время происходит формирование *новой парадигмы* для решения задач, связанных с архитектурно-строительным комплексом: увеличение *полифункциональности* и срока службы *строительных материалов и конструкций*, снижение затрат на создание комфортных условий проживания при снижении негативного влияния на окружающую среду и т.д.; предполагается широкое использование ВМ-технологий и 3D-строительства.

По Т.Куну, развитие науки – *скачкообразный, революционный процесс, состоящий в смене парадигм; однонаправленный и необратимый процесс*. Научное познание после формирования парадигмы – научная теория; существующие в рамках различных парадигм теории несопоставимы. С ростом количества *аномалий* (принципиальная невозможность парадигмы решить проблему; накопление аномалий ведет к падению доверия к парадигме) в *допарадигмальном периоде* развития науки появляются новые *альтернативные теории*. Происходит соперничество научных школ при отсутствии общепринятых концепций исследований; споры о правомерности методов и проблем; наконец, происходит победа одной из школ с исчезновением расхождений. В дальнейшем *формируется новая парадигма* (в итоге – учебники, раскрывающие новую парадигмальную теорию). *На этапе нормальной науки* работа осуществляется в жестких рамках парадигмы: выделяются наиболее показательные с точки зрения парадигмы факты; уточняются теории; разрабатывается более сложная и тонкая аппаратура; осуществляется поиск факторов, подтверждающих новую парадигму; совершенствуется собственно парадигма (не является сразу совершенной); устанавливается необходимость новой парадигмы в связи с невозможностью объяснения ряда фактов в рамках действующей парадигмы. Наконец, происходит *кризис старой парадигмы, революция в науке*, поиск и оформление новой парадигмы; происходит проверка и отсеив конкурирующих теорий. Упраздняются принятые правила, кроме подходящих к новой парадигме (*реконструкция предписаний*: не просто отрицание правил, а сохра-

нение положительного опыта, подходящего новой парадигме). Важно отметить, *новая парадигма не включает старую*. При смене парадигм *нет преемственности теорий*. Она предполагает формирование другой системы взглядов, основанных на принципиально новых базовых моделях и смене принципа управления начальным структурообразованием: *не формирование структуры материала с параметрами, обеспечивающими «начальное» качество (после изготовления), а получение структуры (организация), обеспечивающей качество во времени (в период эксплуатации); допустимое снижение показателей качества*. В частности, нанотехнологии – лишь инструмент для управления параметрами структуры и/или придания дополнительных свойств. При использовании идеологии неструктурированной среды (оценивается усредненными показателями температуры, влажности, давления, в которой находятся предметы, имеющие разную плотность, прочность, теплопроводность, термическое расширение и др.) *реальность растворяется в средних показателях качества*. В моделях структурного материаловедения предполагается существование определенных иерархических структур объектов, рассматриваемых как системы, которые являются основой формирования новых идеологических научных установок. Выбор модели определяется целями структурного описания объекта, границами масштабного уровня, выделенного приоритетного ряда элементов структуры, исходя из целевого назначения объекта анализа; процессы на каждом уровне подчиняются закономерностям именно данного уровня. Налицо сдвиг парадигм, основанных на базовых моделях сплошной саморазвивающейся среды в сторону парадигм, базирующихся на моделях структурированной саморазвивающейся среды, основанной на идеях и методах системного подхода и синергетики [1, 2]. Структурная организация материала предопределяет структурное оформление изделия или конструкции и в значительной степени определяет функциональные свойства всей системы. Проектирование системы в целом базируется на иерархической структуре ее критериев качества (каждое индивидуальное свойство можно получить при разных наборах структурных составляющих) [3...6]. На наш взгляд, систематизация исследований, направленная на построение обобщенных моделей структурообразования строительных композитов, классифицированных по виду компонента, обеспечивающего формирование искусственного камня, и обеспечит фундаментальное развитие строительного материаловедения и создание новых технологий.

1. Системный подход: обобщенные модели, частные наблюдения, общие закономерности

Методы исследования реальной действительности отличаются *циклическостью*. Факты, завершающие один цикл, являются началом и основой следующего цикла. Если наблюдения не подтверждают справедливость предсказаний, ведется поиск более совершенной теории. Наибольшими возможностями обладает математическое моделирование, позволяющее исследовать процессы, имеющие различное физическое содержание, но описываемые одинаковыми математическими соотношениями. Правда, исследователь вынужден руководствоваться лишь собственной интуицией, опирающейся на постановку прикладной задачи и понимание природы процессов функционирования системы. В прикладном математическом анализе, связанном с задачами строительного материаловедения, центральное место занимает решение основной проблемы: *как по отдельным частным наблюдениям выявить и описать общую закономерность* [3]. Именно от неё существенно зависит план исследования, выбор структуры математической модели, интерпретация получаемых результатов. Существуют *три основных типа конечных прикладных целей исследований*: установление самого факта наличия (или отсутствия) *статистически значимой связи между y и x* ; прогноз (восстановление) y по x (здесь интересуют лишь значения $f(x)$, но не структура самой функции); *выявление причинных связей между x и y , частичное управление у путём регулирования x* . Почти всегда на первый план выходит задача *правильного определения структуры модели выбора общего вида функции $f(x)$* . К

сожалению, не существует стандартных приёмов и методов для решения этой задачи. Ниже дается приложение указанного подхода к решению ряда частных задач строительного материаловедения.

2. Некоторые аспекты разработки и изготовления материалов

Первый этап в разработке материала – зарождение новой технологии. Этому периоду соответствует начальное накопление данных, опыта и навыков производства нового материала. Здесь доминирует *рецептурный подход*, а в исследованиях – *метод проб и ошибок*. Управление технологическим процессом имеет *интуитивный характер*, основанный *только на опыте* технолога. *Второй этап* – становление новой технологии. На этом этапе развитие технологии основывается на обобщении накопленных данных, выявлении закономерностей влияния различных факторов на свойства материала. Исследования проводятся уже с привлечением *фундаментальных наук*. Формируются представления о влиянии управляющих факторов на *структуру материала и ее взаимосвязи со свойствами*. Проводится классификация управляющих факторов; выделяются доминирующие. На этом этапе в материаловедении и возникла *полиструктурная теория*. В ней изучение материала происходит по схеме: *«рецептурно-технологические факторы – состав, структура – свойства»*. И на этом этапе пока знания о технологии имеют, в основном, *эмпирический характер*; не содержат обобщающих закономерностей, основанных на фундаментальных законах природы. Главную функцию в принятии решения имеет человек – оператор. *Третий этап* – получение строительного материала с заданным уровнем качества (разработка эффективной технологии). Понятие качества расширяется: включаются не только требования по изготовлению материала (технологическому процессу), но и его соответствие условиям эксплуатации изделия (эксплуатационные свойства и долговечность). В технологии рассматриваются два взаимосвязанных цикла: *технологический и эксплуатационный*. На каждом из циклов проводится оценка влияния *управляющих воздействий* на качество материала. При их отклонении от заданных параметров принимается решение об изменении *рецептуры и условий изготовления материала* (условия структурообразования).

Эффективность управления технологическим процессом зависит от степени изученности материала (адекватности его модели) и процессов, уровня техники и доли ручного труда, организации системы сбора информации на технологических переделах, технического контроля и оперативности принятия управленческих решений. Важно владеть в деталях *знаниями* как о технологическом процессе, так и о процессе структурообразования под действием эксплуатационных факторов. Естественно, возникает задача *идентификации* технологического процесса и построения адекватной модели системы «рецептурно-технологические факторы – структура – качество материала».

В рамках *полиструктурной теории* для каждого масштабного уровня указываются закономерности формирования свойств композитов от структурообразующих факторов. *Микроструктура* (связующее) образуется при совмещении низковязких вяжущих веществ и наполнителей (тонкомолотых дисперсных фаз). На этом масштабном уровне преобладающее влияние на структуру и свойства композита оказывают поверхностные явления, протекающие на границе раздела фаз «вяжущее вещество – наполнитель», которые зависят от физико-химической активности поверхности, дисперсности и количества наполнителя (величина общей поверхности раздела фаз $S_f = C_f S_{уд}$; C_f – количество наполнителя, кг; $S_{уд}$ – удельная поверхность наполнителя, м²/кг). Так, при оптимизации микроструктуры серных композитов, исходя из деформативности, эксплуатационной стойкости и других физико-технических свойств (по каждому в отдельности), были получены близкие значения точек экстремума (подтвердилось «правило створа»); при этом точки экстремума по подвижности смеси с указанными не совпали. *Макроструктура* композиционных материалов (бетонов) формируется при совмещении связующего (связующие в строительстве

самостоятельно применяют в виде клеев, мастик, замазок, композиций для различных покрытий и инъекций) с природными или искусственными заполнителями. При этом микроструктура является только одним из компонентов бетона. Прочность макро-структуры меньше прочности связующего.

Основой создания *каркасных бетонов*, получаемых пропиткой связующим подготовленного каркаса из крупного заполнителя, является полиструктурная теория. Такая технология позволяет уже на стадии проектирования материала определить критерии для оптимизации структуры каркаса и связующего для получения композитов с заданными свойствами на основе различных вяжущих, в том числе мало совместимых. Налицо возможность регулирования физико-технических свойств композиционных материалов изменением свойств поверхности заполнителей и введением эластичных слоев по их поверхности, выбором режимов уплотнения смесей (реологические свойства микро- и макроструктуры различны). Такой подход широко использовался при разработке сверхтяжелых бетонов для защиты от радиации [7...9].

3. Статистический анализ связей между свойствами материалов

Связь между двумя качественными признаками системы, когда каждый из этих признаков допускает лишь относительное сравнение различных объектов («лучше» – «хуже») без указания численных значений признаков обычно устанавливается методами ранговой корреляции. Если выборка объектов $O^{(i)}, i = \overline{1, n}$ сравнивается по каждому из $p + 1$ признаков $y = x_0; x_1, x_2, \dots, x_p$ (порядковых переменных), то результатом измерения каждой из порядковых переменных является приписывание каждому из обследованных объектов некоторой *условной числовой метки*, обозначающей место объекта в ряду из всех n анализируемых объектов, *упорядоченном по убыванию степени проявления* в них k -го ($k = \overline{0, p}$) изучаемого свойства. Если в *совокупности упорядоченных*

$$X_k = (x_k^{(1)}, x_k^{(2)}, \dots, x_k^{(n)})^T, k = \overline{0, p}$$

точки x_k разбросаны равномерно по всей области их возможных значений $1 \leq x_k^{(i)} \leq n$ ($i = \overline{1, n}$), то можно говорить об отсутствии связи или согласованности между ранжировками. При наличии сгустка (ядра) близко лежащих друг от друга точек – о согласованности переменных. При наличии нескольких ядер можно говорить о наличии нескольких подмножеств переменных с высокой степенью взаимосвязей между входящими в ядра переменными. Согласованность мнений группы экспертов определяется *коэффициентом конкордации* для различных комбинаций переменных. Теснота связи между ранжировками определяется по *коэффициенту корреляции К.Спирмена*

$$\hat{\tau}_{kj}^{(s)} = 1 - \frac{6}{n^3 - n} \sum_{i=1}^n (x_k^{(i)} - x_j^{(i)})^2.$$

При *совпадающих ранжировках* $(1, 2, \dots, n)^T, (1, 2, \dots, n)^T$, то есть при $x_k^{(i)} = x_j^{(i)} \forall i = \overline{1, n}$, справедливо $\hat{\tau}_{kj}^{(s)} = 1$; при *противоположных ранжировках* $(1, 2, \dots, n)^T, (n, (n-1), \dots, 1)^T$, то есть при $x_k^{(i)} = (n+1) - x_j^{(i)} \forall i = \overline{1, n}$ – $\hat{\tau}_{kj}^{(s)} = -1$. Здесь предполагается отсутствие объединённых рангов в ранжировках X_k, X_j . В общем случае для анализа парных ранговых статистических связей используется ранговый коэффициент корреляции Спирмена

$$\hat{\tau}_{kj}^{(s)} = \frac{\frac{1}{6}(n^3 - n) - \sum_{i=1}^n (x_k^{(i)} - x_j^{(i)})^2 - (T_k + T_j)}{\sqrt{\left[\frac{1}{6}(n^3 - n) - 2T_k\right] \left[\frac{1}{6}(n^3 - n) - 2T_j\right]}}, T_k = \frac{1}{12} \sum_{q=1}^{m_k} \left[(n_q^k)^3 - n_q^k \right].$$

Здесь ранжировка осуществляется по признаку x_k ; имеется m_k групп с неразличимыми рангами; n_q^k – число элементов в q -й группе, $q = \overline{1, m_k}$. Если T_k и T_j малы по сравнению с $\frac{1}{6}(n^3 - n)$, то справедлива приближённая формула

$$\hat{\tau}_{kj}^{(s)} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_k^{(i)} - x_j^{(i)})^2}{\frac{1}{6}(n^3 - n) - (T_k + T_j)}$$

(точно при $T_k = T_j$). Указанные нами методы широко использовались при когнитивном моделировании эпоксидных композитов по экспериментальным значениям прочности при сжатии и твердости (объединённые ранги отсутствовали); коэффициент ранговой корреляции Спирмена оказался равным 0,988 (*можно ограничиться экспериментальным определением лишь одного показателя из указанных двух*). Устанавливалась связь между коэффициентом структуры (x_{13}) и коэффициентом энергоёмкости (x_{14}). При ранжировке по признаку x_{13} была одна группа с неразличимыми рангами 5,5; $T_{13} = \frac{1}{12}(2^3 - 2) = 0,5$. Аналогично $T_{14} = 0,5$; $\hat{\tau}_{13,14}^{(s)} = 0,59$. Как видим, *коэффициенты структуры и энергоёмкости должны определяться по экспериментальным данным самостоятельно*.

При анализе парных ранговых статистических связей между ранжировками использовался и *ранговый коэффициент корреляции Кендалла*

$$\hat{\tau}_{k,j}^{(k)} = \frac{\hat{\tau}_{k,j}^{(k)} - \frac{2(u_k + u_j)}{n(n-1)}}{\sqrt{\left(1 - \frac{2u_k}{n(n-1)}\right) \left(1 - \frac{2u_j}{n(n-1)}\right)}}; u_k = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^{m_k} n_q^k (n_q^k - 1), u_j = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^{m_j} n_q^j (n_q^j - 1).$$

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена и Кендалла связаны между собой и являются линейными функциями от числа инверсий в перестановке.

4. Согласованность мнений экспертов

При когнитивном моделировании серных радиационно-защитных композитов производилось упорядочивание шести образцов четырьмя экспертами. Результаты экспертной оценки приводятся в таблице.

Эксперт	Объект					
	1	2	3	4	5	6
1	5	4	1	6	3	2
2	2	3	1	5	6	4
3	4	1	6	3	2	5
4	4	3	2	5	1	6
Сумма рангов $\sum_{i=1}^4 x_{ij}$	15	11	10	19	12	17

Методами ранговой корреляции определялись коэффициенты корреляции между рангами каждого двух экспертов (всего $C_4^2 = 6$ коэффициентов корреляции), а далее и

общая мера согласованности мнений внутри группы экспертов – коэффициент согласованности или коэффициент конкордации

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m x_{ij} - \bar{x}_{\Sigma} \right)^2}{m^2 (n^3 - n)},$$

x_{ij} – ранг i -го объекта, установленный j -м экспертом; $\bar{x}_{\Sigma} = \frac{m(n+1)}{2}$ – средняя сумма рангов каждого объекта; n – число объектов; m – число экспертов. Имеем:
 $\bar{x}_{\Sigma} = \frac{1}{2} 4(6+1) = 14$;

$$W = \frac{12 \left[(15-14)^2 + (11-14)^2 + (10-14)^2 + (19-14)^2 + (12-14)^2 + (17-14)^2 \right]}{4^2 (6^3 - 6)} = 0,229.$$

Таким образом, можно считать, что мнения экспертов не являются согласованными, так как W существенно отличается от 1 ($W = 1$, если мнения всех экспертов совпадают). Отметим, если некоторые последовательности рангов содержат связи,

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m x_{ij} - \bar{x}_{\Sigma} \right)^2}{\frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) - m \sum_{k=1}^n T_k}, \quad T_k = \frac{1}{12} \sum_{q=1}^{m_k} \left[\binom{n}{q}^3 - n_q \right].$$

По коэффициенту конкордации определялась согласованность между всей совокупностью свойств материала. А именно коэффициент конкордации, определяющий согласованность свойств,

$$W = \frac{12 [81 + 100 + 72,25 + 240,25 + 156,25 + 25 + 56,25 + 1 + 256 + 1]}{14^2 (10^3 - 10)} = 0,006;$$

средняя сумма рангов каждого объекта $\bar{x}_{\Sigma} = \frac{14}{2} (10+1) = 77$. Как видим, согласованность между всеми свойствами одновременно отсутствует, хотя отчетливо прослеживалась их парная согласованность (например, между прочностью при сжатии и твердостью). Определялась и согласованность мнений трех экспертов по последовательности рангов для десяти образцов эпоксидных композитов. Коэффициент конкордации

$$W = \frac{591}{\frac{1}{12} 3^2 (10^3 - 10) - 3(1+1,5+7)} = 0,828.$$

Последовательно вычисленный коэффициент конкордации обладает статистической существенностью (близок к 1). Поэтому можно полагать, что между оценками экспертов существует некоторая согласованность.

Целесообразность использования методов ранговой корреляции при качественном анализе систем в процессе когнитивного моделирования стала очевидной.

Выводы

Даны методологические принципы определения общих закономерностей функционирования систем по отдельным частным наблюдениям. Анализируются наличие статистически значимой связи и причинных связей между переменными, возможность частичного управления целевой функцией путём регулирования управляющими факторами. Показывается, что от правильного определения структуры модели существенно зависит план исследования, выбор структуры математической модели и интерпретация результатов.

Список литературы

1. Гарькина, И.А. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королёв // Строительные материалы. – 2018. – №1–2. – С.60–63.
2. Королёв, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королёв // Academia. Архитектура и строительство. – 2020. – № 3. – С. 143–159.
3. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королёв. – М.: МГСУ: Библиотека научных разработок и проектов, 2012. – 432 с.
4. Гарькина, И.А. Основы системных исследований в материаловедении / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 2 (39). – С. 80–85.
5. Будылина, Е.А. Проблемы реализации системного подхода в строительной отрасли / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 3 (44). – С. 140–145.
6. Будылина, Е.А. Концептуальные подходы к системному проектированию композиционных материалов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 41–45.
7. Данилов, А.М. Радиационно-защитные композиты на эпоксидном вяжущем: модификация, моделирование, оптимизация структуры и свойств / А.М. Данилов, А.Н. Круглова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 31–2 (50). – С. 105–111.
8. Иноземцев, А.С. Структурная модель течения пластифицированных цементно-минеральных смесей / А.С. Иноземцев, Е.В. Королёв, Т.К. Доунг // Строительные материалы. – 2020. – № 4–5. – С. 90–96.
9. Королёв, Е.В. Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности / Е.В. Королёв, А.Н. Гришина, А.М. Айзенштадт // Строительные материалы. – 2020. – № 9. – С. 54–61.

References

1. Garkina, I.A. Evolution of ideas about composite materials from the standpoint of paradigm change / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Building materials. – 2018. – №1–2. – P.60–63.
2. Korolev, E.V. Prospects for the development of building materials science / E.V. Korolev // Academia. Architecture and construction. – 2020. – № 3. – P. 143–159.
3. Bazhenov, Yu.M. System analysis in building materials science: monograph / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – M.: MGSU: Library of scientific developments and projects, 2012. – 432 p.
4. Garkina, I.A. Fundamentals of Systems Research in Materials Science / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2019. – № 2 (39). – P. 80–85.
5. Budylnina, E.A. Problems of implementing a systematic approach in the construction industry / E.A. Budylnina, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2020. – № 3 (44). – P. 140–145.

6. Budylna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. Conceptual approaches to system design of composite materials / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Regional architecture and engineering*. – 2021. – №1 (46). – P. 41–45.

7. Danilov, A.M. Radiation-protective composites on epoxy binder: modification, modeling, optimization of structure and properties / A.M. Danilov, A.N. Kruglova // *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and architecture*. – 2013. – № 31–2 (50). – P. 105–111.

8. Inozemtsev, A.S. Structural model of the flow of plasticized cement-mineral mixtures / A.S. Inozemtsev, E.V. Korolev, T.K. Doung // *Building materials*. – 2020. – № 4–5. – P. 90–96.

9. Korolev, E.V. Analysis of the structure formation of composites using fractal dimension / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenshtadt // *Building materials*. – 2020. – № 9. – P. 54–61.

УДК 519.7:69

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

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

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

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

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

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

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В КОНСТРУИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Е.А. Будылина, И.А. Гарькина

Анализируется современное состояние проектирования сложных систем с позиций системного анализа. Отмечается междисциплинарность исследований больших систем в рамках системного анализа. В качестве иллюстрации указываются методы синтеза композиционных материалов как сложных систем с системными атрибутами. Определены процедуры формирования системной модели как обобщенной на основе частных. Особо указывается важная роль модельных исследований для определения новых свойств и закономерностей функционирования объекта как системы. На основе изучения эволюции представлений о композиционных материалах определяются современная парадигма и принципы их моделирования как сложных систем. Даются приложения к проектированию динамических сложных систем различного назначения.

Ключевые слова: системы, междисциплинарность, большие и сложные системы, синтез, композиционные материалы, конструирование

INTERDISCIPLINARY RESEARCH IN DESIGN OF COMPLEX SYSTEMS

E.A. Budylna, I.A. Garkina

The current state of the design of complex systems is analyzed from the standpoint of systems analysis. The interdisciplinarity of studies of large systems within the framework of systems analysis is noted. As an illustration, methods of synthesis of composite materials as complex systems with systemic attributes are indicated. The procedures for the formation of the system model as generalized on the basis of particulars are determined. The important role of model studies for determining new properties and regularities of the functioning of an object as a system is especially pointed out. Based on the study of the evolution of ideas about composite materials, the modern paradigm and the principles of their modeling as complex systems are determined. Applications to the design of dynamic complex systems for various purposes are given.

Keywords: systems, interdisciplinarity, large and complex systems, synthesis, composite materials, design

В основе синтеза материала лежит *иерархическая структура критериев* эффективности материала.

Декомпозиция системы (материала) в рамках этой иерархии продолжается до получения на нижнем уровне элементов, принадлежащих разработанным типам, или формулируются технические задачи создания необходимых элементов.

При применении каждого критерия в отдельных задачах, возникающих на рассматриваемом этапе разработки материала, определяются характеризующие его количественные показатели (расчетные, экспериментальные, экспертные), единицы и способы измерения.

Зависимости между критериями выявляются методами факторного анализа и математической статистики и др.; представляют эмпирические закономерности или получаются на основе процедур оценки гипотез и взвешивания факторов.

В соответствии с введенной иерархией критериев и выделенными комплексами решаемых частных задач строится *иерархическая структура системы с оценками её элементов*, которая и служит основой перспективного планирования всего комплекса разработок и отдельных систем. В частности, для части, относящейся к структуре радиационно-защитного материала, на ее первом уровне будут макроструктура (крупность заполнителя, соотношение диаметров зерен заполнителя, высота рельефа поверхности заполнителя, размер и концентрация макропор, капилляров, трещин, пустот); микроструктура (дисперсность наполнителя, толщина прослойки связующего, размеры и концентрация микротрещин, мезо- и микропор, толщина контактной зоны); субмикроструктура (размер характерного структурного элемента, вид и концентрация фазовых контактов и дефектов); в скобках – критерии второго уровня и т.д. При синтезе указанных систем, связанных с выбором рецептуры, технологии и способов управления качеством, используются различные способы оптимизации параметров системы, в том числе *векторной*.

Связанная с проблемой многокритериальности неопределенность целей нами преодолевалась с использованием линейной свертки (глобального критерия качества), введением контрольных показателей для частных критериев и выделением основного критерия (например, ограничения по стоимости, температурной и радиационной стойкости, энергопотреблению, безопасности технологии и т.д.), построением множеств Парето.

1. Большие и сложные системы

В период становления комплексных исследований широко использовалось понятие «*большая система*», основными признаками которой, по Н.П. Бусленко, служили иерархическая структура (сужает класс отображающих систему структур); большие потоки информации в системе; число алгоритмов ее переработки; эргатичность (трудно формализуемое взаимодействие технологических и человеческих факторов). Другой особенностью большой системы считалась невозможность уменьшения числа показателей без утраты качественной определенности системы без изменения ее свойств. Позднее вместо *большой системы* стали использовать понятие *сложной системы*, которая определялась как составной объект, части которого рассматриваются как системы, объединенные в соответствии с определенными принципами в единое целое. Систему можно расчленить (*не обязательно единственным образом*) на конечное число подсистем; каждую подсистему – на конечное число более мелких подсистем и т. д., вплоть до получения подсистем первого уровня. Свойства сложной системы определяются не только свойствами элементов, но и характером взаимодействия между ними. Сложность проявляется в слабой предсказуемости поведения системы (нелинейность, большое число степеней свободы, наличие памяти и др.). Две системы с попарно одинаковыми элементами, но с различными взаимодействиями между ними, естественно, рассматриваются как две разные. По Н.Н. Моисееву, *основное различие между большой и сложной системами состоит в характере*

моделирования: большая система может быть описана на одном языке, с помощью единого метода моделирования, хотя и по частям, по подсистемам; модели же подсистем сложных систем разрабатываются и изучаются в рамках различных дисциплин. Системный подход предполагает междисциплинарные исследования. Многими авторами понятия «большая система» и «сложная система», несмотря на различия между ними, используются как синонимы.

2. Композиционные материалы как сложные системы с системными атрибутами

Спроектированная с нуля сложная система является результатом модернизации более простой системы, полученной на основе интеграции междисциплинарных исследований до уровня математической теории. При конструировании используется *системный подход* с выделением в сложной противоречивой системе функциональных подсистем при четкой *формулировке целей по уровням* (количество целей не ограничивается [1...3], проводится их детализация с указанием взаимосвязей: принцип деления сложной проблемы на более мелкие). Иерархические структуры являются многоуровневыми как набор типологизированных элементов и их связей. Переход с одного уровня на другой производится на основе выделения *макроскопических элементов* (подструктуры; элементы более низкого уровня рассматриваются как *микроскопические*).

Формирование основных физико-механических характеристик композиционных материалов нами изучалось на основе ретроспективной идентификации динамических систем [4]. Изучение *флокуляции в дисперсной системе* производилось на основе ее представления как системы частиц, движущихся под действием сил гравитационного и парного взаимодействий, взаимодействия с границами и дисперсионной средой [5]. Эффективный *подбор вида и количества модифицирующей добавки*, например для получения серного связующего с высокими показателями прочности и стойкости радиационно-защитного композита в различных агрессивных средах, осуществлялся по влиянию модификатора на свойства серы [6, 7] и т.д. Система рассматривалась как комплекс *избирательно* вовлеченных компонентов, взаимодействие и взаимоотношения которых имели характер *взаимного содействия компонентов* для получения необходимого результата.

3. Системный подход, обобщенная модель

Теоретическое значение системного подхода состоит в определении общих закономерностей, изоморфных для различных классов; наиболее важным является изоморфность системообразующего фактора. Эффективность 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 важных системообразующих факторов. Сложная система определяется путем наращивания множества упрощенных моделей, что позволяет выявить новые свойства часто и без построения обобщенной модели. Создание полной модели практически невозможно, ибо она будет столь же сложной, как сама система. Качество подсистем определяется частными критериями, которые не должны противоречить критерию качества всей системы; качество сложной системы как целого определяется векторным критерием, а приближенно – некоторым обобщенным функционалом [8, 9]. Как видим, проектирование сложной системы фактически сводится к построению ее обобщенной модели: реализация проекта системы осуществляется с учетом частных, взаимосвязанных, взаимообусловленных моделей; сложная модель отражает интересующие свойства будущей реальной системы. Выбор рационального проектного решения для достижения целей проектирования производится на основе показателя, обобщенно характеризующего степень достижения цели. При проектировании системы с длительным периодом эксплуатации следует учитывать не только сегодняшнее состояние среды, но и прогнозируемые изменения. Необходимо предусмотреть и возможные

отказы (*нарушение работоспособности*) подсистем, так как изменения параметров любого из компонентов сложной системы вызывают изменение работы всей системы и ее выходных параметров (*резервирование и дублирование подсистем*). Отсутствие *абсолютной уверенности* в прогнозировании функционирования проектируемой системы приводит к необходимости предусмотреть и возможность ее различных *модификаций*. Более того, взамен эйфории в силу множества нерешенных проблем системного анализа, по В.П. Сизикову, В.И. Разумову и др., по-существу, наметился кризис системной методологии в синтезе систем.

4. Модельные исследования: новые свойства и закономерности функционирования системы

Модель системы, построенная в терминах паттернов проектирования, является структурированным выделением значимых элементов и связей. Для систем, сформированных по *модульному принципу*, возможна декомпозиция на *сепаратные подсистемы*, обладающие определенной степенью автономности (*интегративные свойства систем приближенно определяются на основе автономных исследований сепаратных подсистем с применением настраиваемых эталонных моделей для устранения межсистемных связей*) [10...12].

Выбор метода идентификации целостной системы определяется неоднозначно, ибо в самой постановке задачи заранее предполагается неопределенность (неполнота знаний об объекте, ограничения в наблюдениях объекта во времени, неточность измерения сигналов на входе и на выходе объекта и т.п.). При любом методе идентификации очень важным является *знание размерности вектора состояния и природы внутренних связей или нелинейностей*. Существенным является число входных воздействий. Создание адекватной модели возможно лишь в случае, когда свойства и взаимосвязи моделируемого объекта в достаточной степени изучены. *Модель не обосновывается, а постулируется на основе эмпирических сведений, которыми располагает исследователь. Адекватность системной модели объекту изучения нельзя доказать; системная модель всегда будет отличаться от оригинала*; можно говорить лишь об асимптотическом приближении к нему при выполнении определенных условий для каждой практической задачи. Асимптотическая сходимость обеспечивается тем, что объектом моделирования является конкретная система с присущими только ей *автономными законами функционирования*. Адекватность достигается сужением сферы использования данной системной модели, ограниченностью ее практической применимости. Процесс моделирования позволяет глубже проникнуть в существо объекта-оригинала, а модельные исследования – *открыть новые свойства и закономерности функционирования изучаемой системы*.

5. Современная парадигма и принципы моделирования

Исходная концептуальная схема, модель постановки проблем и их решения определяется исходя из совокупности современных ценностей, методов, подходов, технических навыков и средств, принятых в научном сообществе в рамках устоявшейся научной *парадигмы* [13, 14]. Модель можно рассматривать как некий объект-заместитель, воспроизводящий интересующие свойства и характеристики оригинала, с существенными преимуществами и удобствами перед ним. При построении модели исходными являются принципы многомодельности, декомпозиции, иерархического строения модели, минимизации размерности критериального пространства, итерационного принципа проектирования, унификации (минимизация числа вновь разрабатываемых моделей).

Исходя из приведенных принципов, в *общую схему проектирования системы* следует включить:

- структурный синтез на каждом этапе (уже начальный вариант структуры объекта проектирования обычно оценивается исходя из удовлетворения требованиям технического задания);
- составление математической модели;

- анализ математической модели;
- оптимизацию параметров математической модели;
- статистический анализ.

На каждом этапе исходными данными являются требуемые параметры объекта проектирования. Если значения выходных параметров не удовлетворяют требованиям технического задания, то осуществляется параметрическая оптимизация, изменение структуры объекта проектирования или корректировка ТЗ (требуется согласие заказчика). При достижении требований к выходным параметрам проводится статистический анализ результатов реализации системы.

6. Некоторые приложения к проектированию сложных систем

Указанный нами подход к проектированию сложных систем эффективно использовался при разработке и управлении качеством материалов со специальными свойствами [4], разработке тренажеров для подготовки операторов [15], определении экологической опасности от деятельности объектов по хранению и уничтожению химического оружия [16]. Декомпозиция системы всегда продолжалась до получения на нижнем уровне элементов, принадлежащих разработанным типам, или формулировались задачи создания необходимых элементов. Зависимости между критериями выявлялись методами факторного анализа и математической статистики (эмпирические закономерности или процедуры оценки гипотез и взвешивания факторов). Иерархические структуры систем с оценками её элементов строились в соответствии с введенной иерархией критериев и выделенными комплексами решаемых частных задач (основа перспективного планирования всего комплекса разработок и отдельных систем).

Всегда исходили из подчиненности системы надсистеме, а подсистем системе; в структуре системы предусматривалась иерархия подсистем. Цели элементов нижнего уровня подчинялись целям более высокого уровня. Вся сложная иерархическая система функционировала как единое целое.

Иерархическое строение имело место также для отношений и связей в системе. Для любой системы они разлагались на более элементарные. На их основе формировалась система более низкого уровня. Система выступала как сложное иерархическое образование (структурированные системы), в котором выделяются различные уровни, разные типы взаимосвязей между различными уровнями.

Только в составе системы отдельно взятые элементы вместе со всей совокупностью элементов приобретали интегративное системное качество, которым они не обладали вне системы. Система сохраняется, если интегративные параметры находятся в некоторых допустимых пределах (гомеостазис системы).

Системообразующие связи и отношения были главными среди любых связей и отношений. Именно они выражали целостные интегративные свойства системы (являются внутренними для системы), определяли ее специфику. Так, *отсутствие адгезионных взаимодействий превращает строительный материал в смесь компонентов*.

Свойства композиционного материала в значительной степени определяются пространственным расположением контактов и энергией взаимодействия между компонентами (адгезия) и самих компонентов (когезия). Свойства элементов, связанные с процессами сохранения и развития целостности (существование системы), можно рассматривать как *организацию системы*. При формировании межэлементных связей некоторые свойства подавляются, а другие усиливаются и приобретают более отчетливое выражение. Однако степень подавления системообразующих свойств элементов, как правило, является частичной, неполной, поэтому при формировании системы возникают не только полезные функции, положительно влияющие на функционирование системы и обеспечивающие сохранение системой её качественной особенности, но и функции, негативно влияющие на ее функционирование. Основной системной характеристикой является и совместимость на элементном уровне: внешнее воздействие разрушает систему, если его сила становится больше силы внутренних связей

системы. Системный подход и системное мышление базируются на целостном видении объектов, явлений и процессов. При системном подходе к синтезу систем даже с преобладанием фактора интуиции могут использоваться методы как дедуктивного мышления (сначала определяются системные проблемы, а затем находятся решения этих проблем), так и индуктивного (сначала находится новая идея – прорывное решение, а затем это решение применяется для решения возникшей проблемы).

Выводы

Дан анализ современного состояния по конструированию сложных систем различного назначения с позиций системного анализа.

В качестве отличительных признаков больших и сложных систем отмечается междисциплинарность исследований сложных систем.

Предложены методы синтеза композиционных материалов как сложных систем с системными атрибутами с формированием системной модели как обобщенной на основе частных.

Даются приложения к конструированию ряда сложных динамических систем.

Список литературы

1. Данилов, А.М. Разработка строительных материалов как сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 2 (27). – С. 50–54.
2. Будылина, Е.А. Концептуальные подходы к системному проектированию композиционных материалов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 41–45.
3. Гарькина, И.А. Методы системного анализа в проектировании композитов / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 1 (42). – С. 63–68.
4. Данилов, А.М. Методология проектирования сложных систем при разработке материалов специального назначения / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 1 (625). – С. 80–85.
5. 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. 344–346.
6. Гладких, В.А. Исследование вязкости серобитумных вяжущих / В.А. Гладких, Е.В. Королёв, А.И. Альбакасов // Промышленное и гражданское строительство. – 2017. – № 11. – С. 72–76.
7. Иноземцев, А.С. Высокопрочный легкий бетон как инструмент для развития строительной отрасли / А.С. Иноземцев, Е.В. Королёв // Бетон и железобетон. – 2017. – № 1 (16). – С. 14–16.
8. Будылина, Е.А. Основы качественной и количественной оценки качества сложных систем иерархической структуры / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 77–85.
9. Гарькина, И.А. Опыт разработки композиционных материалов: некоторые аспекты математического моделирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 8 (656). – С. 28–33.
10. Гарькина, И.А. Сложные системы модульной структуры: композиты, автономные исследования сепаратных подсистем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.И. Ермолаева, А.М. Зарецкий // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – № 1 (15). – С. 152–156.
11. Черкасов, В.Д. Структурообразование цементных композитов с добавкой модифицированного диатомита / В.Д. Черкасов, В.И. Бузулуков, О.В. Тараканов, А.И. Емельянов // Строительные материалы. – 2015. – № 11. – С. 75–77.
12. Низина, Т.А. Количественный анализ кинетики накопления повреждений в структуре полимерных материалов при растяжении / Т.А. Низина, В.П. Селяев,

Д.Р. Низин, Н.С. Канаева // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 2 (88). – С. 77–89.

13. Гарькина, И.А. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королёв // Строительные материалы. – 2018. – № 1–2. – С. 60–62.

14. Королёв, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королёв // Academia. Архитектура и строительство. – 2020. – № 3. – С. 143–159.

15. Будылина, Е.А. Приближенные методы декомпозиции при настройке имитаторов динамических систем / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 150–156.

16. Голованов, О.А. Математическое моделирование процесса развития и исхода противотеррористической операции на базах хранения боеприпасов и средств поражения / О.А. Голованов, Ю.Г. Яшин, А.М. Данилов, С.А. Курков // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2006. – № 2. – С. 37.

References

1. Danilov, A.M. Development of building materials as complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2016. – № 2 (27) – P. 50–54.
2. Budylna, E.A. Conceptual approaches to system design of composite materials / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 1 (46). – P. 41–45.
3. Garkina, I.A. Systems analysis methods in composite design / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2020. – № 1 (42). – P. 63–68.
4. Danilov, A.M. Methodology for the design of complex systems in the development of special-purpose materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Bulletin of higher educational institutions. Building. – 2011. – №1 (625). – P. 80–85.
5. 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. 344–346.
6. Gladkikh, V.A. Investigation of the viscosity of sulfur-bitumen binders / V.A. Gladkikh, E.V. Korolev, A.I. Albasov // Industrial and civil construction. – 2017. – №11. – P. 72–76.
7. Inozemtsev, A.S. High-strength lightweight concrete as a tool for the development of the construction industry / A.S. Inozemtsev, E.V. Korolev // Concrete and reinforced concrete. – 2017. – №1 (16). – P. 14–16.
8. Budylna, E.A. Fundamentals of the qualitative and quantitative assessment of the quality of complex systems of a hierarchical structure / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 1 (46). – P. 77–85.
9. Garkina, I.A. Experience in the development of composite materials: some aspects of mathematical modeling / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Bulletin of higher educational institutions. Building. – 2013. – № 8 (656). – P. 28–33.
10. Garkina, I.A. Complex systems of modular structure: composites, autonomous studies of separate subsystems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.I. Ermolaeva, A.M. Zaretskiy // Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2011. – № 1 (15). – P. 152–156.
11. Cherkasov, V.D. Structure formation of cement composites with the addition of modified diatomite / V.D. Cherkasov, V.I. Buzulukov, O.V. Tarakanov, A.I. Emelyanov // Building materials. – 2015. – № 11. – P. 75–77.
12. Nizina, T.A. Quantitative analysis of the kinetics of damage accumulation in the structure of polymer materials under tension / T.A. Nizina, V.P. Selyaev, D.R. Nizin, N.S. Kanaeva // Construction and reconstruction. – 2020. – № 2 (88). – P. 77–89.
13. Garkina, I.A. Evolution of ideas about composite materials from the standpoint of a paradigm shift / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Building materials. – 2018. – № 1–2. – P. 60–62.

14. Korolev, E.V. Prospects for the development of building materials science / E.V. Korolev // Academia. Architecture and construction. – 2020. – № 3. – P. 143–159.

15. Budylna, E.A. Approximate methods of decomposition when setting up simulators of dynamic systems / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2013. – №3. – P. 150–156.

16. Golovanov, O.A. Mathematical modeling of the development and outcome of an anti-terrorist operation at ammunition and weapons storage bases / O.A. Golovanov, Yu.G. Yashin, A.M. Danilov, S.A. Kurkov // Izvestia of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences. – 2006. – № 2. – P. 37.

УДК 691.32:666.972.16

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

Коровкин Марк Олимпиевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Технологии строительных материалов и деревообработки»
E-mail: m_korovkin@mail.ru

Короткова Анна Александровна,
аспирант кафедры «Технологии строительных материалов и деревообработки»
E-mail: anna10_89@bk.ru

Ерошкина Надежда Александровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Технологии строительных материалов и деревообработки»
E-mail: n_eroshkina@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

Korovkin Mark Olimpievich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Technology of Building Materials and Wood Processing»
E-mail: m_korovkin@mail.ru

Korotkova Anna Aleksandrovna,
Postgraduate student of the department «Technology of Building Materials and Wood Processing»
E-mail: anna10_89@bk.ru

Eroshkina Nadezda Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Technology of Building Materials and Wood Processing»
E-mail: n_eroshkina@mail.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПЛЕКСНОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКИ В МЕЛКОЗЕРНИСТОМ САМОУПЛОТНЯЮЩЕМСЯ БЕТОНЕ

М.О. Коровкин, А.А. Короткова, Н.А. Ерошкина

Определяется влияние состава трехкомпонентной минеральной добавки, в состав которой входят известняк, доменный гранулированный шлак и микрокремнезем, на свойства мелкозернистого самоуплотняющегося бетона. Установлено влияние соотношения компонентов добавки на консистенцию смеси, усадку и прочность мелкозернистого бетона в различных условиях твердения.

Ключевые слова: комплексная минеральная добавка, известняк, доменный гранулированный шлак, микрокремнезем, мелкозернистый бетон, самоуплотняющийся бетон, консистенция, прочность, усадка

EFFICIENCY OF COMPLEX MINERAL ADDITIVE IN FINE-GRAINED SELF-COMPACTING CONCRETE

M.O. Korovkin, A.A. Korotkova, N.A. Eroshkina

The influence of the composition of a three-component mineral additive including limestone, granular blast-furnace slag and microsilica on the properties of fine-grained self-compacting concrete has been investigated. The effect of the ratio of additive components on the consistency of the mixture, shrinkage and strength of fine-grained concrete under various conditions of hardening has been established.

Keywords: complex mineral additive, limestone, granulated blast-furnace slag, microsilica, fine-grained concrete, self-compacting concrete, consistency, strength, shrinkage

Введение

Самоуплотняющийся мелкозернистый (песчаный) бетон – одна из новых разновидностей бетона. Его производство можно рассматривать в качестве наиболее перспективных областей реализации синергии совместного использования суперпла-

стификаторов (СП) и минеральных добавок (МД). Эти бетоны могут эффективно применяться в качестве высокотехнологичных монтажных, инъекционных и ремонтных составов, а также в производстве архитектурно-декоративных изделий.

Способность таких бетонных смесей самоуплотняться обеспечивается двумя рецептурными факторами – применением высокоэффективных СП и ограничением дозировки песка до значений, обеспечивающих значительное снижение количества механических взаимодействий зерен заполнителя между собой в процессе укладки и уплотнения смеси. По данным [1], объемная доля песка в самоуплотняющемся бетоне не должна превышать 40 %. В связи с этим ограничением для получения в самоуплотняющемся мелкозернистом бетоне приемлемого расхода портландцемента значительная его часть должна быть замещена минеральными добавками.

Введение в рецептуру бетона активных и инертных минеральных добавок оказывает большое влияние на многие его технологические и эксплуатационные свойства [2]. Это влияние может быть как позитивным, так и негативным. Снижение негативных эффектов возможно за счет применения комплексных минеральных добавок, в состав которых входят компоненты с различным механизмом влияния на процессы структурообразования бетонной смеси и бетона. Совместное введение в бетон СП и различных бинарных комплексов, в составе которых содержатся такие МД как зола-унос, доменный гранулированный шлак, микрокремнезем, метакаолин, измельченный песок, известняк и другие горные породы [3–7], сегодня рассматривается как перспективное направление создания бетонов с пониженным содержанием клинкера и высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками [8–12].

В настоящее время имеется большой объем данных о влиянии различных индивидуальных МД на свойства бетона. Несмотря на это, интерес к исследованию МД в бетоне возрастает. Это связано с тем, что в составах с низким водоцементным отношением, которое достигается за счет использования СП, влияние МД на свойства бетона может значительно отличаться от влияния этих добавок на свойства хорошо исследованных составов со средними и высокими водоцементными отношениями, которые характерны для бетонов без водоредуцирующих добавок. Кроме того, различными исследованиями установлено [5], что МД одного вида в зависимости от его химико-минералогического состава, дисперсности и других факторов могут оказывать на свойства бетона различное действие. При этом влияние на свойства бетона бинарных и трехкомпонентных добавок остается малоизученным.

Целью работы является исследование влияния состава комплексной МД на основе известняка, доменного гранулированного шлака и микрокремнезема на свойства мелкозернистого самоуплотняющегося бетона.

Методы и материалы исследования

Исследование проводилось на составах, в которых вяжущее, заполнитель (песок) и вода имели соотношение 1:1,2:0,3. В качестве пластифицирующей добавки применялся суперпластификатор Melflux 1641 F при его дозировке 0,5 % от массы вяжущего.

Вяжущее для мелкозернистой бетонной смеси состояло из 70 % портландцемента класса ЦЕМ I 42,5 Н производства ООО «Азия Цемент» и 30 % МД, в составе которой содержались известняковая мука, доменный гранулированный шлак и микрокремнезем в различном соотношении.

Содержание шлака и известняка в комплексной добавке варьировалось в интервале от 0 до 100 %. Максимальное содержание микрокремнезема в МД ограничивалось 40 % в связи с высокой водопотребностью этого материала. Массовая доля компонентов МД назначалась с учетом их плотности: известняка – 2670 кг/м³, шлака – 2900 кг/м³, микрокремнезема – 2250 кг/м³. Для составов с низким водоцементным отношением при замещении одного компонента другим объемный фактор имеет большое значение. В связи с этим при назначении дозировки компонентов комплексной МД исходили из того, что суммарный объем всех компонентов при различном их соотношении должен оставаться постоянным. Составы исследованных МД приведены в табл. 1.

Составы МД

Компонент	Содержание компонента в масс. % / об. %											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Известняк	–	65,7 67,6	32,8 34,7	100 100	64,9 60,9	–	–	–	–	28,7 27,8	27,5 27,9	55,0 54,5
Шлак	100 100	34,3 32,4	67,2 65,3	–	–	83,7 80,0	89,4 86,7	77,8 73,1	65,8 59,8	36,9 32,8	56,1 52,4	28,4 25,9
Микрокремнезем	–	–	–	–	35,1 39,1	16,3 20,0	10,6 13,3	22,2 26,9	34,2 40,2	34,4 39,5	16,4 19,7	16,6 19,5

В качестве заполнителя использовался промытый песок Сурского месторождения с $M_k = 1,51$ и содержанием пылеватых и глинистых частиц менее 0,5 %.

Оценка влияния состава комплексной МД на консистенцию мелкозернистой бетонной смеси производилась по ее расплыву из конуса Хегермана (формы-конуса по ГОСТ 310.4-81). Прочность бетона при сжатии определялась на образцах 40×40×160 мм. Испытания проводились через 1, 3 и 28 суток твердения в нормальных условиях. Кроме того, часть образцов после 28 сут подвергалась 10 циклам насыщения и высушивания в дистиллированной воде и 5 % растворе хлорида натрия. Циклическое насыщение и высушивание производилось по следующему режиму: 5 суток насыщения и 2 суток высушивания при температуре 20–25 °С и относительной влажности воздуха 65–75 %.

Усадка бетона после 28 суток его твердения в нормально-влажностных условиях определялась в течение 4 месяцев на образцах 40×40×160 мм с помощью индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Результаты и их обсуждение

Анализ изолиний расплывов бетонной смеси на треугольной диаграмме состава комплексной МД (рис. 1) показывает, что повышение содержания микрокремнезема приводит к значительному загущению смеси. Это объясняется высокой удельной поверхностью и адсорбционной емкостью микрокремнезема по отношению к суперпластификатору, что согласуется с данными [2]. Как видно на рис. 1, повышение содержания микрокремнезема в комплексной МД более 30 % (10 % в пересчете на цемент) приводит к снижению расплыва до значений менее 250 мм – нижней границы расплыва для самоуплотняющейся мелкозернистой бетонной смеси.

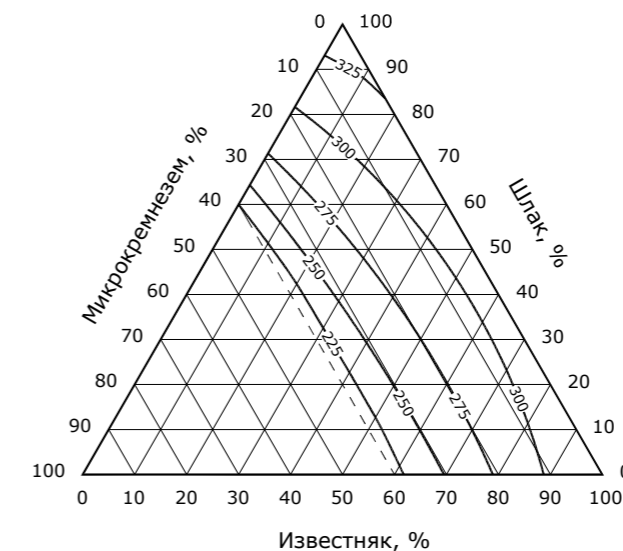


Рис. 1. Влияние состава комплексной МД на расплыв мелкозернистой бетонной смеси, мм

Наиболее значимое положительное влияние на консистенцию смеси оказывает содержание в МД известняка, а содержание шлака несколько повышает расплыв только при его содержании в комплексной добавке более 50-60 % (см. рис. 1).

Результаты определения прочности, приведенные в табл. 2, показывают, что состав МД оказывает значительное влияние на этот показатель в различные сроки испытания, а также после 10 циклов насыщения и высушивания в воде и растворе NaCl.

Т а б л и ц а 2

Прочность исследованных составов

№ состава	Прочность, МПа												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1 сут	12,3	11,0	11,8	14,8	8,8	16,8	15,8	13,2	11,0	10,3	16,8	8,8	
3 сут	33,9	36,8	41,3	25,3	24,2	42,9	38,2	40,5	22,3	21,8	41,3	29,5	
28 сут	42,2	52,5	48,0	40,2	56,0	69,3	65,0	72,3	62,5	57,8	59,5	52,5	
После циклического насыщения-высушивания:													
	- в воде	76,3	69,8	81,8	62,5	48,8	64,0	70,7	68,5	58,8	57,5	60,5	54,7
	- в растворе NaCl	53,0	57,5	57,0	59,8	44,3	61,3	59,2	65,5	70,3	56,5	62,5	57,3

Анализ графиков, построенных по данным табл. 2, для бинарных смесей (рис. 2) свидетельствует о том, что в минеральной добавке, состоящей из известняка и шлака, через 1 сутки твердения прочность мало зависит от соотношения компонентов. В более поздние сроки оптимальное содержание каждого компонента в бинарной МД составляет 40–60 %, что повышает прочность на 20-30 % в сравнении с бетонами, изготовленными с МД известняка и шлака в индивидуальном виде.

На графиках (рис. 3) зависимости прочности бетона от содержания микрокремнезема в бинарной добавке, состоящей из микрокремнезема и шлака, отмечаются максимумы, которые при увеличении продолжительности твердения возрастают и смещаются в область дозировки микрокремнезема 20–30 %. Снижение прочности при большей дозировке этого компонента МД предположительно определяется двумя факторами – недоуплотнением малоподвижной смеси, которое обусловлено повышенным содержанием высокодисперсного компонента и недостатком гидролизной извести для связывания микрокремнезема.

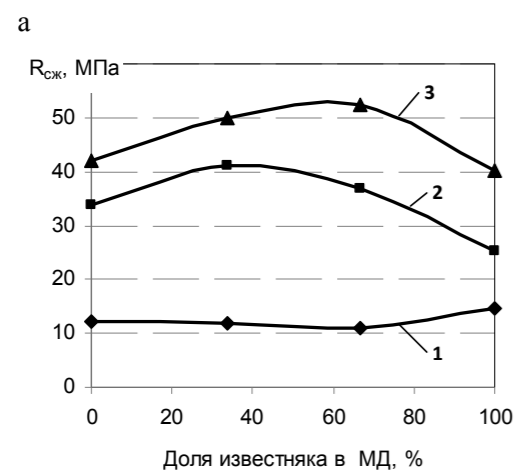


Рис. 2. Влияние доли известняка в добавке, состоящей из известняка и шлака, на прочность в различные сроки: 1 – 1 сут; 2 – 3 сут; 3 – 28 сут

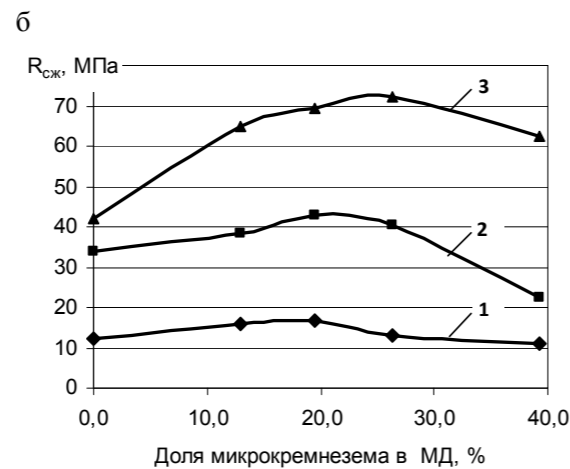


Рис. 3. Влияние доли микрокремнезема в добавке, состоящей из микрокремнезема и шлака, на прочность в различные сроки: 1 – 1 сут; 2 – 3 сут; 3 – 28 сут

Исследования влияния содержания известняка в комплексной добавке, в составе которой содержится 20 % (рис. 4,а) и 40 % (рис. 4,б) микрокремнезема, показали, что при низком содержании микрокремнезема, повышении доли известняка и, соответственно, уменьшении доли шлака прочность снижается, что в большей степени проявляется через 28 суток твердения (рис. 4,а). При содержании микрокремнезема в добавке 40 % соотношение известняка и шлака практически не влияет на прочность бетона. При высокой дозировке микрокремнезема отмечается замедление набора прочности в ранние сроки. Различия в характере влияния соотношения известняка и шлака на раннюю прочность в составах с низкой и высокой дозировкой микрокремнезема можно объяснить высокой пуццолановой активностью этого компонента МД, который интенсивно поглощает гидролизную известь, необходимую для активации шлака. В результате шлак проявляет себя как инертная добавка, сходная по свойствам с известняком.

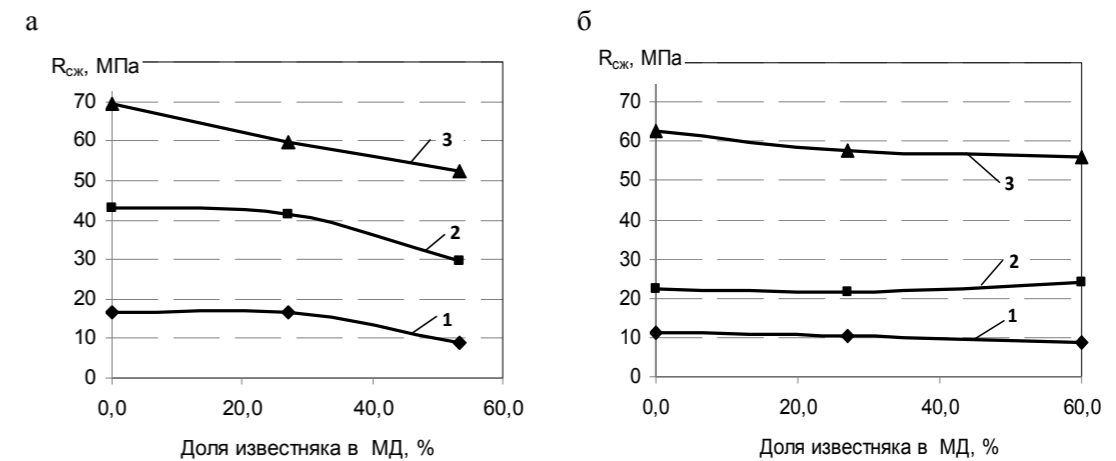


Рис. 4. Влияние доли известняка в комплексной МД при содержании в ней 20 % (а) и 40 % (б) микрокремнезема на прочность в различные сроки: 1 – 1 сут; 2 – 3 сут; 3 – 28 сут

Сопоставление значений прочности составов после 28 сут нормального твердения с прочностью после циклического насыщения в воде и растворе NaCl показало, что бетоны с бинарной добавкой на основе известняка и шлака имели после воздействия на них воды значительный прирост прочности – от 30 до 80 %. Наибольший прирост прочности отмечался при большей дозировке шлака в бинарной добавке. При воздействии на составы бетона с этой добавкой раствора хлорида натрия также было отмечено повышение прочности, но намного меньше, чем при воздействии воды – на 15-50 %, что возможно обусловлено деструктивными процессами в цементном камне, возникающими при кристаллизации NaCl в порах при высыхании солевого раствора.

При циклическом воздействии воды на составы с МД, состоящей из микрокремнезема и шлака, наибольший прирост прочности отмечается (рис. 6) в составе без микрокремнезема. Как видно на графиках, при повышении доли этого компонента в МД прочность в воде снижается, а в солевом растворе возрастает.

Анализ графиков зависимости прочности бетона с трехкомпонентной МД от ее состава (рис. 7) показывает, что повышение прочности после циклического воздействия на бетон воды и раствора NaCl происходит только при снижении доли известняка и увеличении доли шлака в добавке, что характеризует шлак как медленно твердеющий компонент добавки.

Состав комплексной минеральной добавки оказывает большое влияние на усадку мелкозернистого бетона (рис. 8). Анализ изолиний на треугольной диаграмме показал, что повышение содержания шлака в МД более 40-50 % приводит к значительному росту усадочных деформаций исследованного бетона. Эти деформации достигают максимума – 0,7 мм/м и более – в смесях, в которых содержание шлака в комплексной добавке составляет 90-100 %. В области высоких дозировок шлака увеличение содержания известняка не позволяет снизить усадку. В таких смесях эффективным является повышение содержания в комплексной МД микрокремнезема.

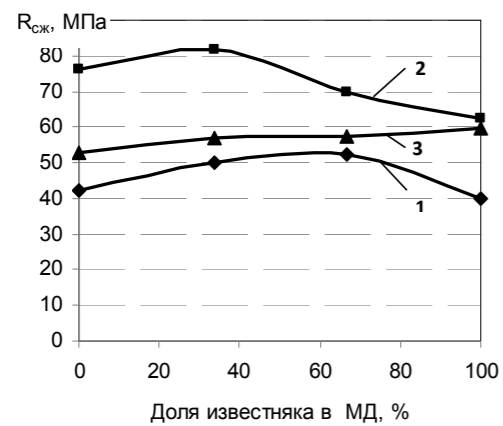


Рис. 5. Влияние доли известняка в добавке, состоящей из известняка и шлака, на прочность:
1 – 28 сут; 2 – после циклического насыщения в воде; 3 – в растворе NaCl

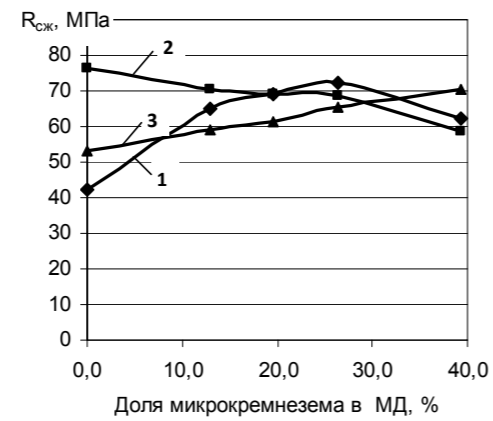


Рис. 6. Влияние доли микрокремнезема в добавке, состоящей из микрокремнезема и шлака, на прочность в различные сроки: 1 – 28 сут; 2 – после циклического насыщения в воде; 3 – в растворе NaCl

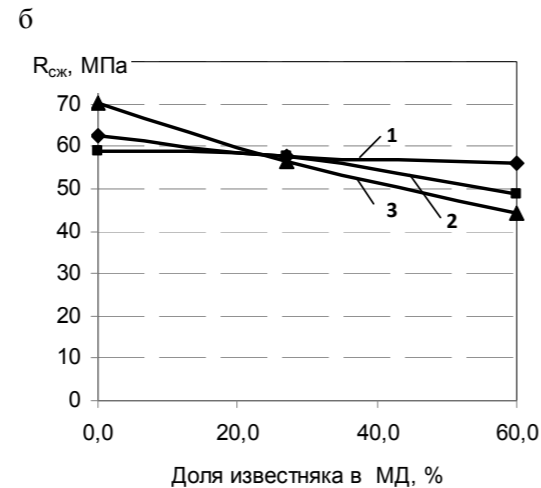
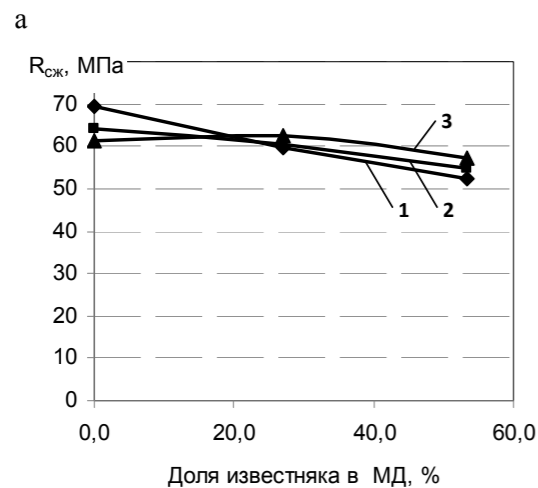


Рис. 7. Влияние доли известняка в комплексной МД при содержании в ней 20 % (а) и 40 % (б) микрокремнезема на прочность:
1 – 28 сут; 2 – после циклического насыщения в воде и высушивания; 3 – в растворе NaCl

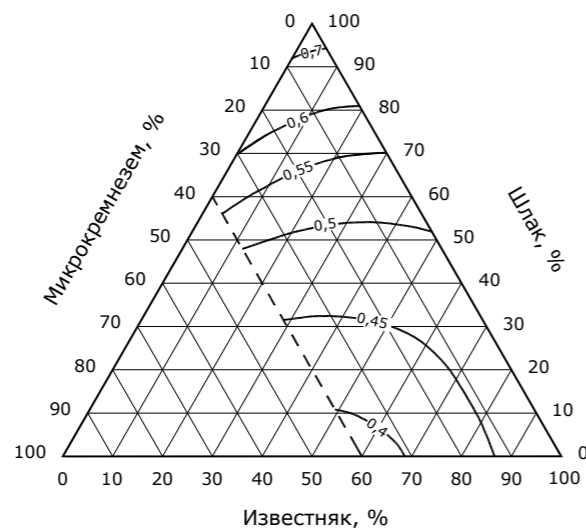


Рис. 8. Влияние состава комплексной МД на усадку мелкозернистого бетона, мм/м

При содержании шлака в комплексной МД менее 40-30 % показатели эффективности снижения усадки за счет повышения дозировки микрокремнезема и известняка сопоставимы.

Снижение усадки до минимального уровня – 0,4 мм/м – происходит при содержании в МД 60-70 % известняка и 30-40 % микрокремнезема.

Результаты исследования зависимости усадки мелкозернистого бетона от состава МД показывают, что изменение соотношения компонентов исследованной комплексной МД является эффективным фактором управления этим показателем бетона.

Выводы

Исследования показали возможность управления в широком диапазоне технологическими и эксплуатационными свойствами самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов за счет изменения состава трехкомпонентной минеральной добавки, состоящей из известняка, доменного гранулированного шлака и микрокремнезема.

Установлено, что наиболее значимое положительное влияние на консистенцию смеси оказывает содержание в минеральной добавке известняка, а содержание шлака несколько повышает расплыв только при его содержании в комплексной добавке более 50–60 %. При этом максимальный расплыв смеси достигается при повышении содержания шлака в добавке до 90–100 %.

Применение добавки, состоящей из шлака и известняка при содержании каждого компонента в интервале от 40 до 60 %, позволяет повысить прочность на 20–30 % в сравнении с бетонами, изготовленными с применением добавок известняка или шлака в индивидуальном виде. Еще более значительное повышение прочности – на 60–70 % – может быть достигнуто при замещении шлака в комплексной добавке микрокремнеземом в количестве 20–30 %.

При содержании микрокремнезема в добавке 40 % соотношение известняка и шлака практически не влияет на прочность бетона. При высокой дозировке микрокремнезема отмечается замедление набора прочности в ранние сроки.

Состав комплексной минеральной добавки оказывает большое влияние на усадку мелкозернистого бетона – повышение содержания шлака в МД более 40–50 % приводит к значительному росту усадочных деформаций. Повышение доли микрокремнезема и известняка позволяет снижать усадку. При содержании шлака в комплексной минеральной добавке менее 40–30 % показатели эффективности снижения усадки за счет повышения дозировки микрокремнезема и известняка сопоставимы.

Установленное разнонаправленное влияние компонентов минеральной добавки на различные свойства бетона показывает, что назначение состава добавки должно производиться на основе многофакторной оптимизации с учетом всего комплекса заданных свойств самоуплотняющегося мелкозернистого бетона.

Список литературы

1. Оучи, М. Самоуплотняющиеся бетоны: разработка, применение и ключевые технологии / М. Оучи // Бетон на рубеже третьего тысячелетия: труды 1-й Всерос. конф. по бетону и железобетону. – М., 2001. – С. 209–215.
2. Калашников, В.И. Супер- и гиперпластификаторы. Микрокремнеземы. Бетоны нового поколения с низким удельным расходом цемента на единицу прочности / В.И. Калашников // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2011. – № 4. – С. 60–69.
3. Тараканов, О.В. Влияние комплексных минеральных добавок на прочность и состав гидратации цементных материалов / О.В. Тараканов, Е.А. Белякова // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 4(45). – С. 46–52.
4. Лесовик, В.С. К вопросу повышения эффективности высокопрочных самоуплотняющихся бетонов / В.С. Лесовик, М.Ю. Елистраткин, А.С. Сальникова, О.В. Казлитина // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1(46). – С. 20–27.

5. Şahmaran, M. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars / M. Şahmaran, H.A. Christianto, I.O.Yaman // *Cement and Concrete Research*. – 2012. – 42(12). – P. 1579–1589.
6. Meddah, M.S. Potential use of binary and composite limestone cements in concrete production / M.S. Meddah, M.C. Lmbachiya, R.K. Dhirc // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 58. – P. 193–205.
7. Proske, T. Concretes made of efficient multi-composite cements with slag and limestone / T. Proske, M. Rezvani, S. Palm, C. Müller, C.-A. Graubnera // *Cement and Concrete Composites*. – 2018. – Vol. 89. – P. 107–119.
8. Ерофеев, В.Т. Исследование прочности композитов, наполненных порошками карбонатных пород / В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов, И.В. Ерофеева, С.А. Коротаев, Д.В. Емельянов, Э.М. Балатханова // *Региональная архитектура и строительство*. – 2018. – №1(34). – С. 5–13.
9. Barluenga, G. Hardened properties and microstructure of SCC with mineral additions / G. Barluenga, I. Palomar, J. Puentes // *Construction and Building Materials*. – 2015. – Vol. 94. – P. 728–736.
10. Mullick, A.K. Performance of concrete with binary and ternary cement blends / A.K. Mullick // *Indian Concrete Journal*. – 2007. – №81 (1). – P. 15–22.
11. Promsawat, P. Properties of self-compacting concrete prepared with ternary Portland cement-high volume fly ash-calcium carbonate blends / P. Promsawat, B. Chatveera, N. Makul // *Case Studies in Construction Materials*. – 2020. – Vol. 13. – 17 p. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00426>.
12. Hu, X. Drying shrinkage and cracking resistance of concrete made with ternary cementitious components / X. Hu, Z. Shi, C. Shi, Z. Wu, B. Tong, Z. Ou, G. de Schutter // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 149. – P. 406–415.

References

1. Ouchi, M. Self-compacting concrete: development, application and key technologies / M. Ouchi // *Concrete in the third Millennium: Proceedings of the first all-Russian conference on concrete and reinforced concrete*. – M., 2001. – P. 209–215.
2. Kalashnikov, V.I. Super- and hyper-plasticizers. Silica fumes. A new generation of concretes with low specific cement consumption per strength unit / V.I. Kalashnikov // *ALITinform: Cement. Concrete. Dry Mixtures*. – 2011. – № 4. – P. 60–69.
3. Tarakanov, O.V. Influence of integrated mineral additives on strength and composition of cement materials hydration / O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova // *Regional architecture and engineering*. – 2020. – № 4(45). – P. 46–52.
4. Lesovik, V.S. On the issue of improving the efficiency of high-strength self-compacting concretes / V.S. Lesovik, M.Y. Elistratkin, A.S. Salnikova, O.V. Kazlitina // *Regional architecture and engineering*. 2021. – № 1(46). – P. 20–27.
5. Şahmaran, M. Effect of chemical admixtures and mineral additives on properties of self-compacting mortars / M. Şahmaran, H.A. Christianto, I.O.Yaman // *Cement and Concrete Research*. – 2012. – 42(12). – P. 1579–1589.
6. Meddah, M.S. Potential use of binary and composite limestone cements in concrete production / M.S. Meddah, M.C. Lmbachiya, R.K. Dhirc // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 58. – P. 193–205.
7. Proske, T. Concretes made of efficient multi-composite cements with slag and limestone / T. Proske, M. Rezvani, S. Palm, C. Müller, C.-A. Graubnera // *Cement and Concrete Composites*. – 2018. – Vol. 89. – P. 107–119.
8. Erofeev, V.T. Investigation of strength of composites filled with powders of carbonate rocks / V.T. Erofeev, O.V. Tarakanov, I.V. Erofeeva, S.A. Korotaev, D.V. Emelyanov, E.M. Balatkhanova. // *Regional architecture and engineering*. – 2018. – №1(34). – P. 5–13.
9. Barluenga, G. Hardened properties and microstructure of SCC with mineral additions / G. Barluenga, I. Palomar, J. Puentes // *Construction and Building Materials*. – 2015. – Vol. 94. – P. 728–736.

10. Mullick, A.K. Performance of concrete with binary and ternary cement blends / A.K. Mullick // *Indian Concrete Journal*. – 2007. – №81 (1). – P. 15–22.
11. Promsawat, P. Properties of self-compacting concrete prepared with ternary Portland cement-high volume fly ash-calcium carbonate blends / P. Promsawat, B. Chatveera, N. Makul // *Case Studies in Construction Materials*. – 2020. – Vol. 13. – 17 p. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00426>.
12. Hu, X. Drying shrinkage and cracking resistance of concrete made with ternary cementitious components / X. Hu, Z. Shi, C. Shi, Z. Wu, B. Tong, Z. Ou, G. de Schutter // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 149. – P. 406–415.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624.012

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

Снежкина Ольга Викторовна,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Начертательная геометрия
и графика»
E-mail: o.v.snejkina@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

Snezhkina Olga Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the department «Descriptive
Geometry and Graphics»
E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С МАЛЫМ И СРЕДНИМ ПРОЛОТОМ СРЕЗА

О.В. Снежкина

Разработана методика оценки трещиностойкости железобетонных балок в зоне действия поперечных сил при относительном пролете среза меньше 3.

Ключевые слова: железобетонная балка, наклонное сечение, оценка трещиностойкости, каркасно-стержневые модели, относительный пролет среза

CRACKING RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH SMALL AND MEDIUM SPAN

O.V. Snezhkina

A method has been developed for assessing the crack resistance of reinforced concrete beams in the zone of action of transverse forces with a relative shear span of less than 3.

Keywords: reinforced concrete beam, inclined section, assessment of crack resistance, frame-bar models, relative shear span

Существующие методы расчета железобетонных конструкций не обладают универсальностью: методики, используемые по разным группам предельных состояний, недостаточно увязаны друг с другом; формулы, основанные на экспериментально-теоретических исследованиях, подразумевают определенные границы их обоснованного применения, что приводит в ряде случаев к сомнительным результатам [1–4]. До настоящего времени в нормативной литературе отсутствуют рекомендации по оценке трещиностойкости наклонного сечения.

Ниже рассматривается возможность применения расчетной модели, обеспечивающей единый подход к оценке трещиностойкости по нормальному и наклонному сечениям железобетонных балок с относительным пролетом среза от 0,25 до 3.

Ранее для решения этой проблемы проведено моделирование физической работы железобетонных балок с относительным пролетом среза от 0,25 до 1,5: расчетная каркасно-стержневая модель для определения прочности железобетонных балок с малым и средним относительным пролетом среза преобразовывалась до модели, позволяющей определять трещиностойкость указанных конструкций [5]. Принцип построения расчетных моделей сводился к замене наклонной сжатой полосы бетона стержневой фермой, расчетный растянутый стержень общей модели принимался подобным каркасно-стержневой модели (КСМ). Методологические основы анализа и синтеза сложных многокритериальных систем достаточно полно указаны в [6–8].

Поставленную задачу удалось свести к определению растягивающих усилий, действующих по длине сжатой наклонной бетонной полосы в поперечном направлении, а также к определению растягивающих усилий, действующих вдоль растянутого арматурного пояса. Имеется в виду определение тех растягивающих усилий, при которых в бетоне образуются наклонные – граничные и вертикальные – трещины [9, 10]. Характер образования и развития трещин в растянутой зоне является однозначным: в растянутом горизонтальном поясе бетона появляются трещины, имеющие вертикальную траекторию. Определение растягивающих поперечных усилий, действующих вдоль сжатого наклонного стержня каркасно-стержневой модели (в зоне действия поперечных сил), из-за сложного напряженного состояния остается проблематичным.

Рассматривалось три варианта построения стержневых расчетных моделей, позволяющих определять величину растягивающего поперечного усилия внутри сжатой наклонной бетонной полосы (в зоне действия поперечных сил). В качестве первого варианта предлагался наиболее идеализированный подход к построению модели (рис. 1): в этом случае расчетная модель определения усилия трещиностойкости является зеркальным отображением модели КСМ, принятой при расчете прочности. Усилия в стержнях зеркальной модели поменяли свой знак на противоположный, по сравнению с моделью КСМ. Наклонные стержни рассматриваемой модели являются растянутыми, горизонтальный стержень – сжатым.

В качестве второго варианта (рис. 2) рассматривалась стержневая модель, в которой сжатые зоны бетона, расположенные между грузовой и опорными площадками, представлены в виде фермы с усилиями S_1 (сжатие) и стержнем-распоркой с усилием T_1 (растяжение).

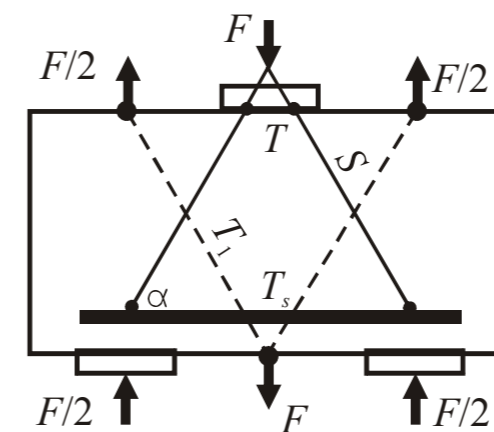


Рис. 1. Каркасno-стержневая модель определения трещиностойкости балок №1

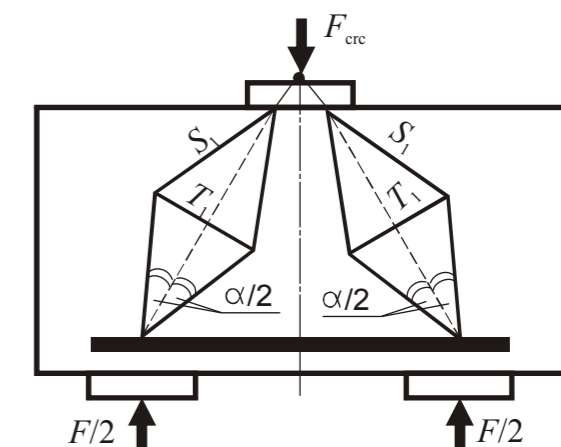


Рис. 2. Каркасno-стержневая модель определения трещиностойкости балок №2

В качестве третьего варианта рассматривалась модель, аналогичная в построении второму варианту, но отличающаяся наличием двух поперечных растянутых элементов T_1 , расположенных вблизи грузовой и опорных площадок (рис. 3). Характерным для второго и третьего вариантов является то, что угол между наклонными поясами ферм наклонного очертания принимался равным углу наклона сжатого подкоса модели КСМ.

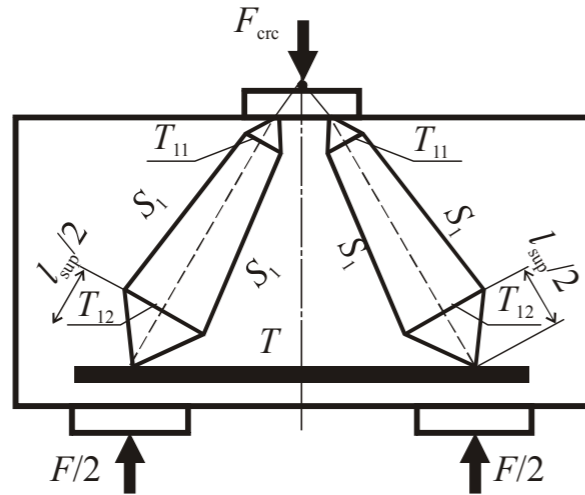


Рис. 3. Каркасно-стержневая модель определения трещиностойкости балок №3

В развитие ранее рассмотренных каркасно-стержневых моделей по оценке трещиностойкости железобетонных балок с малым относительным пролетом среза (от 0,25 до 1) проведено моделирование железобетонных балок со средним относительным пролетом среза (от 1 до 3). Усилия трещинообразования в наклонном и вертикальном сечениях предложено определять на основе модернизированной каркасно-стержневой модели в виде трехшарнирной арки с затяжкой (рис. 4).

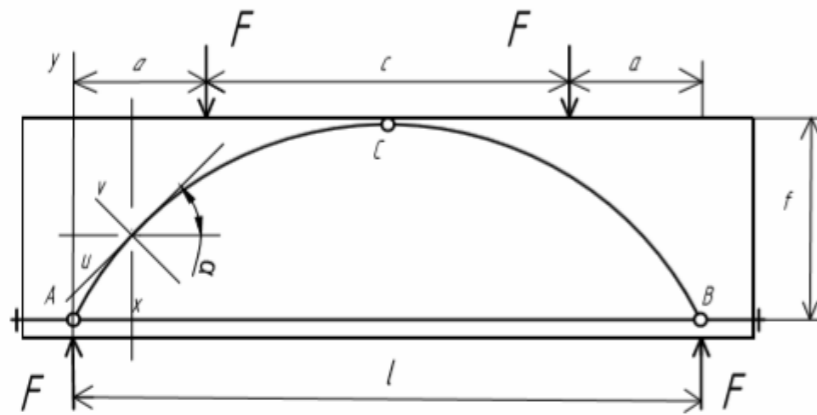


Рис. 4. Арочная модель определения усилий трещинообразования железобетонных балок с $a/h_0 \leq 3$

В рассматриваемой системе [11, 12] для произвольного сечения арки (опоры которой расположены на одном уровне) поперечная сила от вертикальной нагрузки

$$Q = (V_A - \sum P_i) \cos \alpha - H \sin \alpha,$$

где под знаком суммы стоят силы, расположенные слева от рассматриваемого сечения (рис. 5).

Учитывая, что поперечная сила в соответствующем сечении простой арки с горизонтальной осью (при заданном нагружении) определяется выражением

$$Q^0 = V_A - \sum P_i,$$

получим

$$Q = Q^0 \cos \alpha - H \sin \alpha,$$

где Q – усилие трещинообразования, действующее по длине сжатой наклонной бетонной полосы в поперечном направлении.

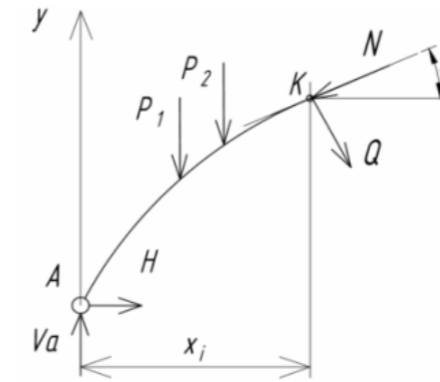


Рис. 5. Схема усилий при расчете железобетонных балок со средним относительным пролетом среза

Усилие трещинообразования, действующее вдоль растянутого арматурного пояса,

$$H = M_c^0 / f,$$

где M_c^0 – изгибающий момент от заданных сил в сечении простой балки; f – расстояние от наиболее удаленной точки оси арки (ключевого шарнира) до линии, соединяющей центры опор.

Выводы

Дается развитие расчетной каркасно-стержневой модели по определению прочности коротких балок до модели, позволяющей определять трещиностойкость железобетонных балок с малым и средним относительным пролетом среза $a/h_0 \leq 3$.

Приводится инженерный метод оценки трещиностойкости железобетонных балок без распределенной арматуры с малым и средним относительным пролетом среза ($a/h_0 \leq 3$) по арочной модели.

Осуществляется единый подход к оценке прочности и трещиностойкости наклонного и нормального сечений в изгибаемых железобетонных балках с малым и средним относительным пролетом среза $a/h_0 \leq 3$.

Предложенный метод расчета трещиностойкости железобетонных балок с малым и средним пролетом среза позволяет учитывать взаимное влияние моментов и поперечных сил.

Список литературы

1. Кодыш, Э.Н. Совершенствование нормативной базы проектирования железобетонных конструкций / Э.Н. Кодыш, Н.Н. Теркин // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – №6. – С.25–28.
2. Филатов, В.Б. Результаты экспериментального исследования сопротивления железобетонных балок в зоне поперечного изгиба / В.Б. Филатов, В.О. Горынцев, В.П. Биндер // Градостроительство и архитектура. – 2017. – Т. 7, №4. – С. 25–31.
3. Мирсаяпов, И.Т. Обеспечение безопасности железобетонных балок по наклонному сечению при многократно повторяющихся нагрузках / И.Т. Мирсаяпов // Жилищное строительство. – 2016. – №1–2. – С.23–27.
4. Старишко, И.Н. Совершенствование методики расчета изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям / И.Н. Старишко // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – №5. – С.31–40.
5. Снежкина, О.В. Оценка каркасно-стержневых моделей для определения трещиностойкости коротких балок / О.В. Снежкина, Ю.П. Скачков, Р.А. Ладин // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 1 (22). – С. 101–104.

6. Гарькина, И.А. Единая концепция системного проектирования сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1(38). – С. 119–123.
7. Garkina, I.A. Modeling of building materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, Yu.P. Skachkov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417. – URL: <https://www.scientific.net/KEM.730.412>
8. Danilov, A.M. Coherence function in analysis and synthesis of complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, no. 9. – P. 375–380. – URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.5236>
9. Скачков, Ю.П. Определение схем разрушения и трещинообразования коротких железобетонных балок по экспериментальным данным / Ю.П. Скачков, О.В. Снежкина, М.В. Кочеткова, А.В. Корнюхин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 74–81.
10. Снежкина, О.В. Эмпирический метод расчета трещиностойкости коротких железобетонных балок / О.В. Снежкина, Ю.П. Скачков, Р.А. Ладин // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 2 (23). – С. 84–88.
11. Snezhkina, O.V. Engineering method for assessing the strength of reinforced concrete beams / O.V. Snezhkina // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. International Workshop «Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019». – 2019. – P. 22050.
12. Snezhkina, O.V. Strength assessment modeling for reinforced concrete beams in transverse forces / O.V. Snezhkina // Zone atlantis highlights in material sciences and technology (AHMST). – 2019. – Vol. 1. – P. 504–508. – URL: <https://doi.org/10.2991/isees-19.2019.99>

References

1. Kodysh, E.N. Improvement of a regulatory framework for the design of reinforced concrete structures / E.N. Kodysh, N.N. Terkin // Industrial and civil construction. – 2016. – No. 6. – P.25–28.
2. Filatov, V.B. Results of the experimental study of reinforced concrete beams resistance in the zone of transverse bending / V.B. Filatov, V.O. Goryntsev, V.P. Binder // Urban planning and architecture. – 2017. – Vol. 7, No. 4. – P. 25–31.
3. Mirsayapov, I.T. Ensuring the safety of reinforced concrete beams along an inclined section under repeated loads / I.T. Mirsayapov // Housing construction. – 2016. – №1–2. – P.23–27.
4. Starishko, I.N. Improvement of the methodology for calculating bending reinforced concrete elements along inclined sections / I.N. Starishko // Industrial and civil construction. – 2019. – No. 5. – P.31–40.
5. Snezhkina, O.V. Evaluation of frame-bar models to determine the fracture toughness of short beams / O.V. Snezhkina, Yu.P. Skachkov, R.A. Ladin // Regional architecture and construction. – 2015. – No. 1 (22). – P. 101–104.
6. Garkina, I.A. A unified concept of system design of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2019. – No. 1 (38). – P. 119–123.
7. Garkina, I.A. Modeling of building materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, Yu.P. Skachkov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417. – URL: <https://www.scientific.net/KEM.730.412>
8. Danilov, A.M. Coherence function in analysis and synthesis of complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, no. 9. – P. 375–380. – URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.5236>
9. Skachkov, Yu.P. Determination of schemes of destruction and cracking of short reinforced concrete beams according to experimental data / Yu.P. Skachkov, O.V. Snezhkina, M.V. Kochetkova, A.V. Korniyukhin // Regional architecture and engineering. – 2013. – No. 3. – P. 74–81.

10. Snezhkina, O.V. An empirical method for calculating crack resistance of short reinforced concrete beams / O.V. Snezhkina, Yu.P. Skachkov, R.A. Ladin // Regional architecture and engineering. – 2015. – No. 2 (23). – P. 84–88.

11. Snezhkina, O.V. Engineering method for assessing the strength of reinforced concrete beams / O.V. Snezhkina // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. International Workshop «Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019». – 2019. – P. 22050.

12. Snezhkina, O.V. Strength assessment modeling for reinforced concrete beams in transverse forces / O.V. Snezhkina // Zone atlantis highlights in material sciences and technology (AHMST). – 2019. – Vol. 1. – P. 504–508. – URL: <https://doi.org/10.2991/isees-19.2019.99>

УДК 69.059.032

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

Волков Владимир Павлович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Механика»
Гарькин Игорь Николаевич,
доцент кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

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

Volkov Vladimir Pavlovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Mechanics»
Garkin Igor Nikolaevich,
Associate Professor of the department
«Quality Management and Technology
of Building Production»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УЗЛА СТЫКА СВАИ СЕРИИ 1.011.1-10 «СВАИ ЗАБИВНЫЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ»

В.П. Волков, И.Н. Гарькин

Приводятся результаты исследования напряженно-деформированного состояния разработанного узла стыка железобетонной сваи. Дается сравнительный анализ разработанного и стандартного узлов стыка. Указываются преимущества использования разработанного узла.

Ключевые слова: строительные конструкции, напряженно-деформированное состояние, железобетонные конструкции, свая, техническая экспертиза

STRESS-DEFORMED STATE OF JOINT NODE OF SERIES 1.011.1-10 «DRIVEN REINFORCED PILES» PILES

V.P. Volkov, I.N. Garkin

Results of the study of stress-strain state of developed joint of a reinforced concrete pile are presented. A comparative analysis of the developed and standard joint assembly is given. Advantages of using the developed node are indicated.

Keywords: building structures, stress-strain state, reinforced concrete structures, pile, technical expertise

Возрастающие темпы жилищного строительства делают необходимым разработку новых конструктивных решений для различных строительных конструкций [1, 2]. Так, актуальным является разработка отдельных узлов для железобетонных свай. Стыки ЖБ свай согласно серии 1.011.1-10 «Сваи забивные железобетонные» обладают рядом особенностей, в частности, иногда возникает необходимость повышенного восприятия усилий на сдвиг.

Для достижения равнопрочности железобетонной сваи и обеспечения упрощенного монтажа предлагается новый вид сварного стыка, где запас прочности в узле стыка учитывает работу сварного соединения (рис. 1, без учета работы бетона): $k_f = 6 \text{ мм}$; $R_{wf} = 180 \text{ МПа}$; $\beta_f = 0,7$ (2-угловой шов в полке двутавра); $l_w = 216 - 10 = 206 \text{ мм}$; $H = 215 \text{ мм}$.



Рис. 1. Сварной стык железобетонной сваи

Рассмотрим несущую способность узла в плоскости наибольшей жесткости (рис. 2). Условие прочности сварного шва:

$$\delta_{\max} = \delta_M + \delta_N = \frac{N}{A \cdot 2} + \frac{M}{A \cdot h} \leq R_{wf},$$

где $A = \beta_f \cdot k_f \cdot l_w \cdot 2$ – площадь среза сварного шва в полке двутавра,

$$A = 0,7 \cdot 6 \text{ мм} \cdot 206 \text{ мм} \cdot 2 = 1730 \text{ мм}^2;$$

при $M=0$

$$N_{\max} = R_{wf} \cdot 2 \cdot A = 180 \text{ МПа} \cdot 1730 \text{ мм}^2 \cdot 2 = 623 \text{ кН};$$

при $N=0$

$$M_{\max} = R_{wf} \cdot h \cdot A = 180 \text{ МПа} \cdot 1730 \text{ мм}^2 \cdot 215 \text{ мм} = 67 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

при $N=100$

$$M = R_{wf} \cdot h \cdot A - N \cdot \frac{h}{2} = 67 \text{ кН} \cdot \text{м} - 100 \text{ кН} \cdot \frac{215 \text{ мм}}{2} = 56,2 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

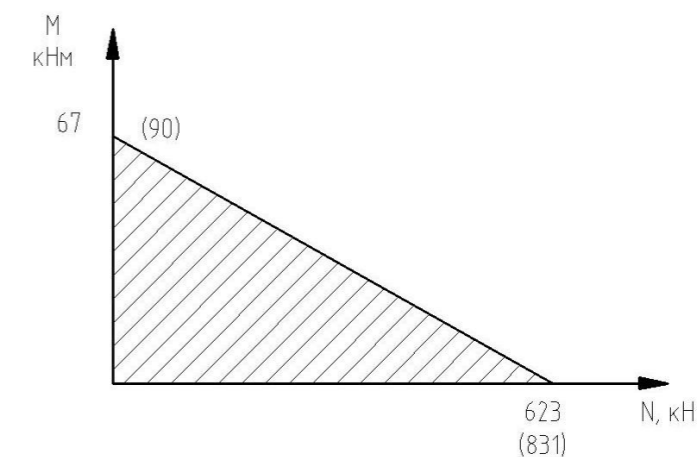


Рис. 2. Несущая способность узла в плоскости наибольшей жесткости
(в скобках указаны значения усилий при $k_f = 8 \text{ мм}$, без скобок – при $k_f = 6 \text{ мм}$)

Как видим, несущая способность указанного узла стыка свай сечением 300×300 мм, найденная из условий прочности сварного шва, будет обеспечивать несущую способность самой сваи, если свая изготовлена из бетона В15, $k_f = 6-7$ мм, армирование стержнями А-I и А-II. При армировании стержнями А-III $k_f = 7$ мм. Если свая изготовлена из бетона В20, то $k_f = 8$ мм при армировании А-I и А-II.

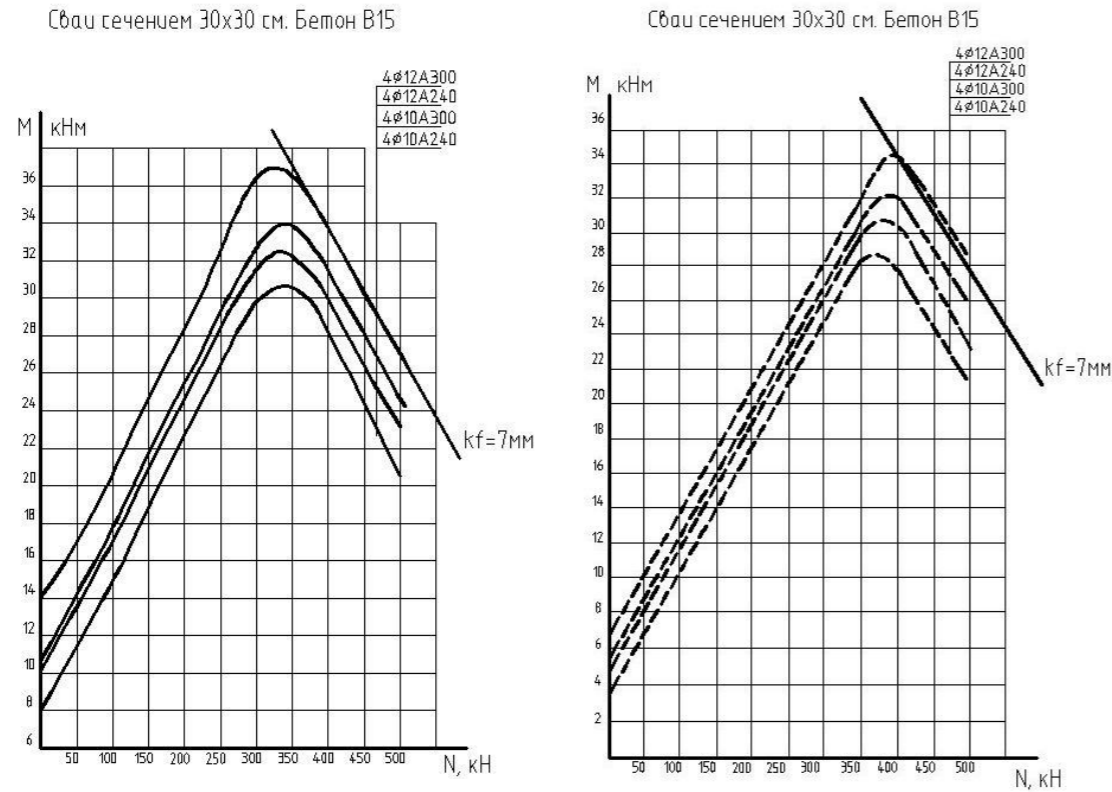


Рис. 3. Несущая способность свай

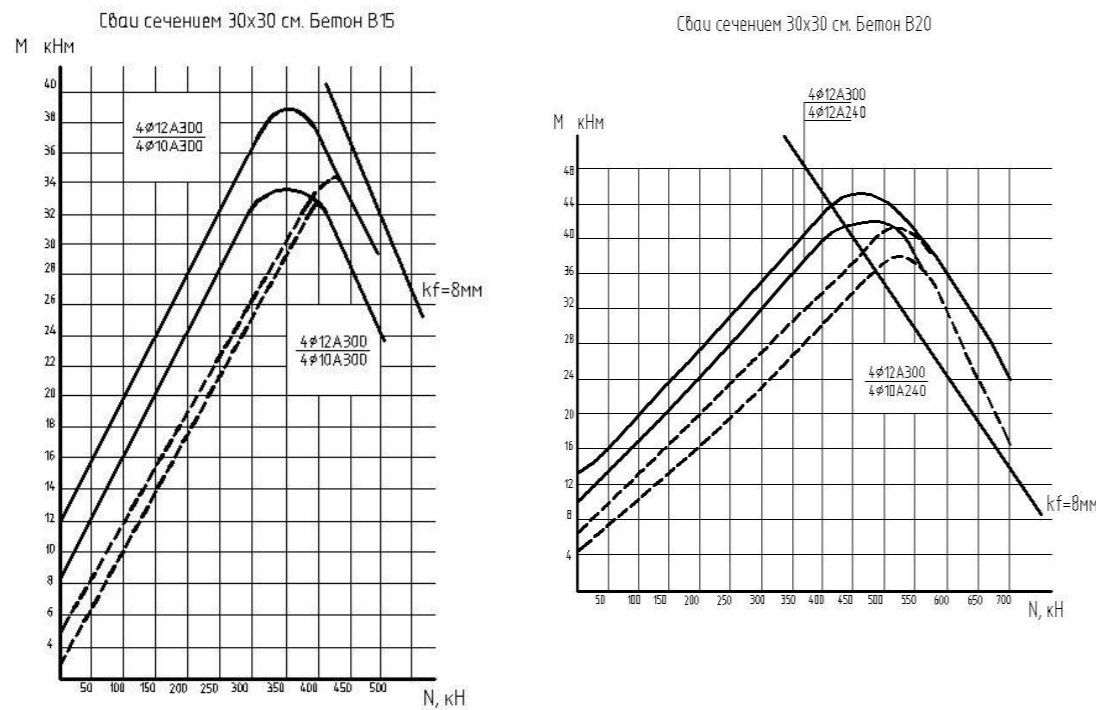


Рис. 4. Несущая способность свай

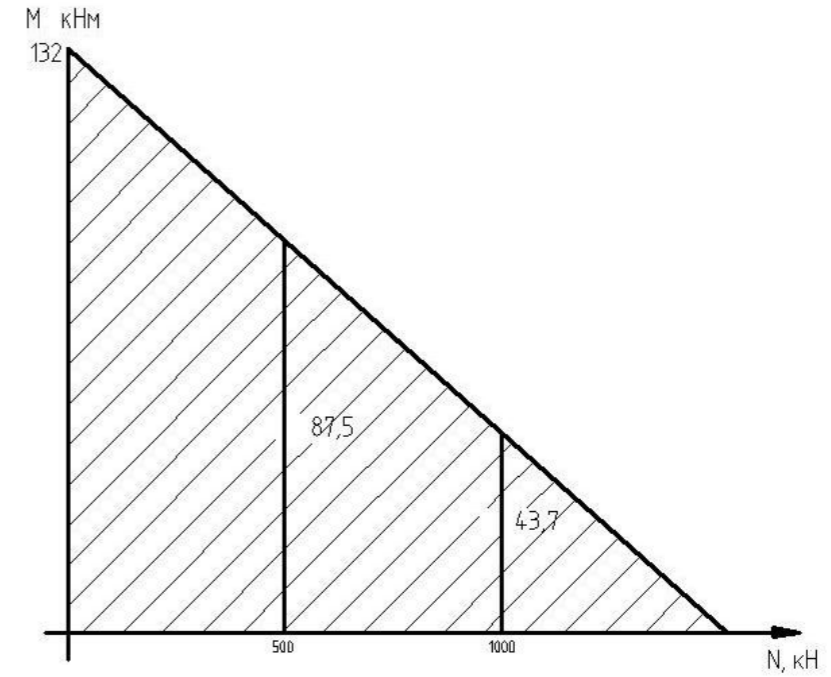


Рис. 5. Несущая способность свай

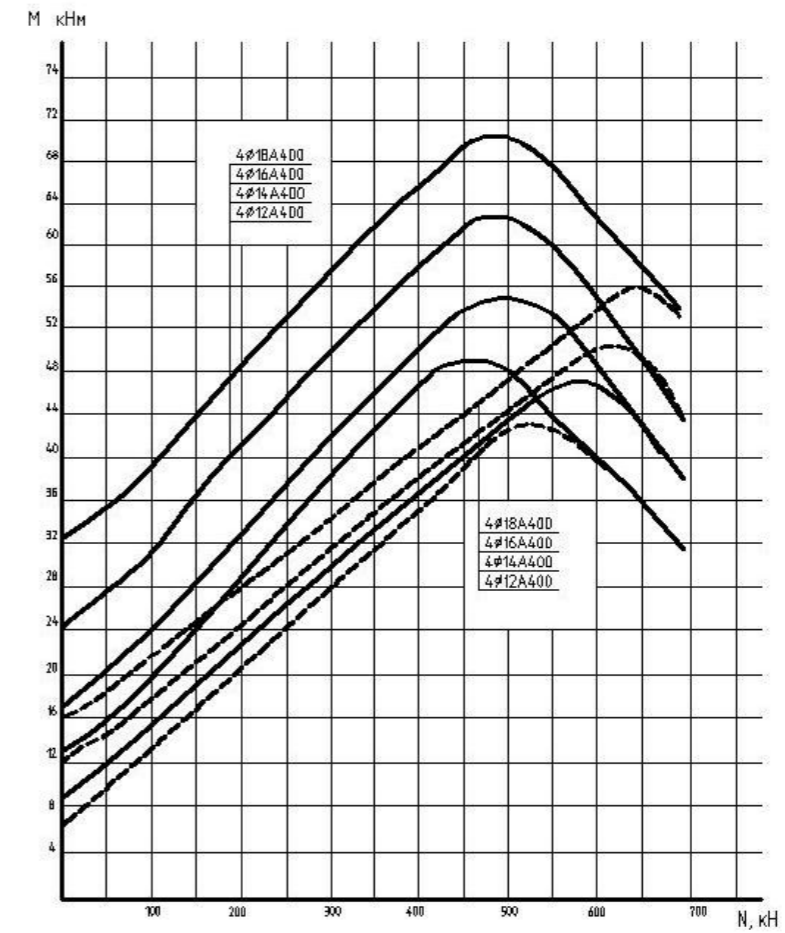


Рис. 6. Несущая способность свай

Для безопасной эксплуатации разработанного узла стыка составной сваи сплошного квадратного сечения 300×300 мм применяется специальный узел усиления с использованием закладной пластины толщиной 10 мм.

При $k_f = 6 \text{ мм}$ $R_{wf} = 180 \text{ МПа}$ (при ручной сварке электродом Э42А, ГОСТ 9467-75); $l_w = 216 - 10 = 106 \text{ мм}$; $\beta_f = 0,7$.

$$N = \beta_f \cdot k_f \cdot l_w \cdot R_{wf} = 0,7 \cdot 6 \text{ мм} \cdot 206 \text{ мм} \cdot 180 \text{ МПа} = 155,7 \text{ кН}.$$

Для двух сварных швов:

$$N = 2 \cdot 155,7 \text{ кН} = 311,4 \text{ кН}.$$

Предельное усиление (от двух П-образных элементов):

$$N_{\max} = 2N \Rightarrow 2 \cdot 311,4 = 622,8 \text{ кН}.$$

Предельное значение момента (от двух П-образных элементов с $h = 216 \text{ мм}$):

$$M_{\max} = N \cdot h = 311,4 \text{ кН} \cdot 216 \text{ мм} = 67,3 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Продольно распределенная нагрузка (из условия прочности сварного шва) от П-образного элемента на пластину:

$$q = \frac{N}{l} = \frac{311,4 \text{ кН}}{216 \text{ мм}} = 1442 \text{ кН/м}.$$

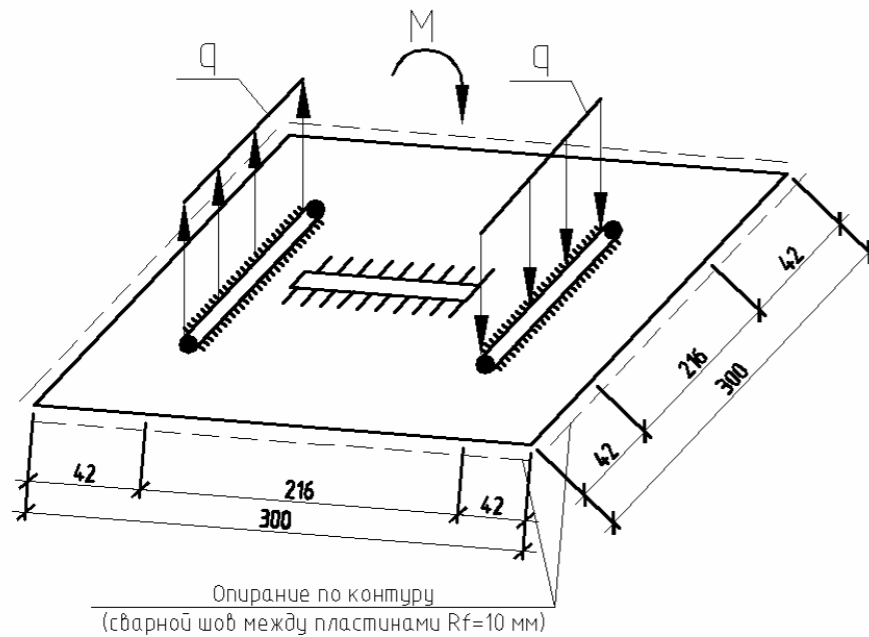


Рис. 7. Упрощенная расчетная схема закладной детали

$$M_x = (ql) \cdot 42 \text{ мм} \Rightarrow 311,4 \text{ кН} \cdot 42 \text{ мм} = 13,08 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

$$W_x = \frac{bh^2}{6} = \frac{216 \text{ мм} \cdot (10 \text{ мм})^2}{6} = 3600 \text{ мм}^3.$$

$$\sigma = \frac{M_x}{W_x} = \frac{13,08 \text{ кН} \cdot \text{м}}{3600 \text{ мм}^3} = 3,633 \text{ ГПа} = 3633 \text{ МПа}.$$

$$\sigma = 3633 \text{ МПа} \leq R = 210 \text{ МПа}.$$

При оптимальной деформации пластины (образование прогибов) соприкоснутся друг с другом. Получим опирание по всей площади соприкосновения, где в дальнейшем будут отсутствовать деформации.

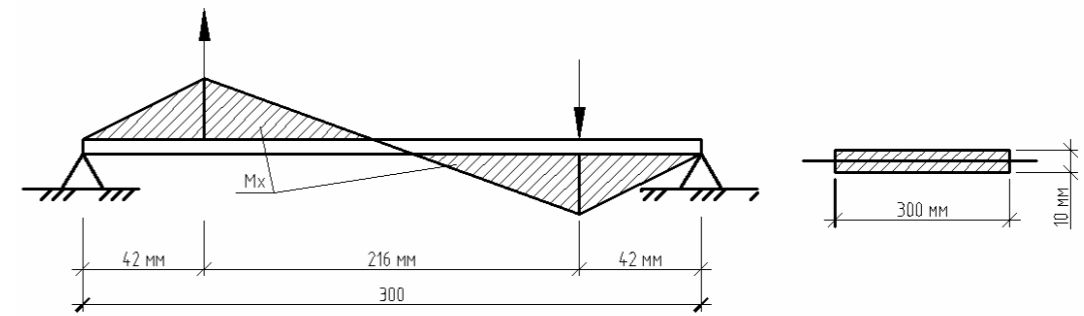


Рис. 8. Упрощенная расчетная схема закладной детали

$$M_x = (ql) \cdot \frac{216}{300} \cdot 42 \text{ мм} \Rightarrow 311,4 \text{ кН} \cdot \frac{216}{300} \cdot 42 \text{ мм} = 9,42 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

$$W_x = \frac{bh^2}{6} = \frac{300 \text{ мм} \cdot (10 \text{ мм})^2}{6} = 5000 \text{ мм}^3.$$

$$\sigma = \frac{M_x}{W_x} = \frac{9,42 \text{ кН} \cdot \text{м}}{5000 \text{ мм}^3} = 1884 \text{ МПа}.$$

$$\sigma = 1884 \text{ МПа} \leq R = 210 \text{ МПа}.$$

Однако с учетом контурного опирания пластины (сварной шов $k_f = 10 \text{ мм}$ между пластинами по контуру) напряжения будут значительно меньше, что подтверждается расчетом: $R_{wf} = 180 \text{ МПа}$ (при ручной сварке электродами Э42А, ГОСТ 9467-75); $k_f = 10 \text{ мм}$ (варится по контуру 300×300); $\beta_f = 0,7$; $l_w = 300 - 10 = 290 \text{ мм}$; $h \approx 300 \text{ мм}$.

Условие прочности:

$$\sigma_{\max} = \sigma_N + \sigma_M = \frac{N}{4A} + \frac{M}{Ah} \leq R_{wf},$$

где $A = \beta_f \cdot k_f \cdot l_w = 0,7 \cdot 10 \text{ мм} \cdot 290 \text{ мм} = 2030 \text{ мм}^2$ – площадь среза одного шва.

График $N(M)$ (рис. 9):

$$1) N = 0 \text{ кН}: M = R_{wf} \cdot A \cdot h \Rightarrow 180 \text{ МПа} \cdot 2030 \text{ мм}^2 \cdot 300 \text{ мм} = 109,6 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$2) M = 0 \text{ кН}: N = R_{wf} \cdot A \cdot 4 \Rightarrow 180 \text{ МПа} \cdot 2030 \text{ мм}^2 \cdot 4 = 1461,6 \text{ кН}.$$

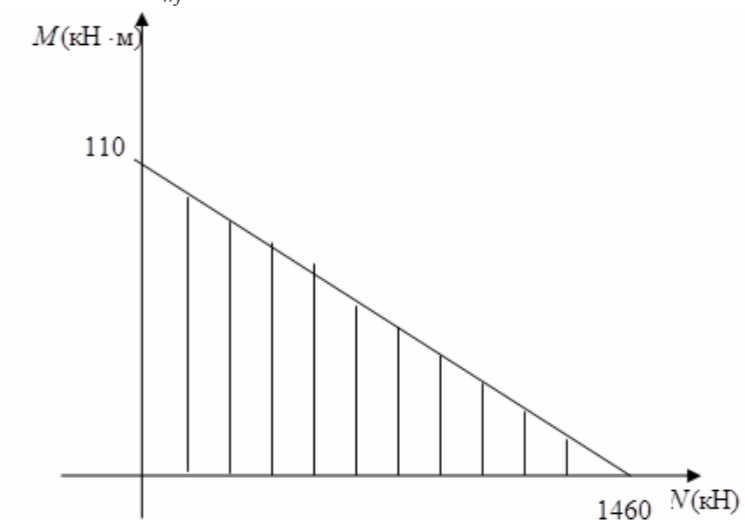


Рис. 9. Несущая способность разработанного стыка

Сравнение $N(M)$ с графиком $N(M)$ самой сваи (см. серия 1.011.1-10.1) показывает, что несущая способность стыка не превышает (график для сваи лежит внутри заштрихованного треугольника; см. рис. 9) несущей способности сваи сечением 300×300 мм, изготовленной из бетона В15, В20 с рабочей арматурой $\varnothing 10, 12, 14, 16, 18$, классов А-I, А-II, А-III.

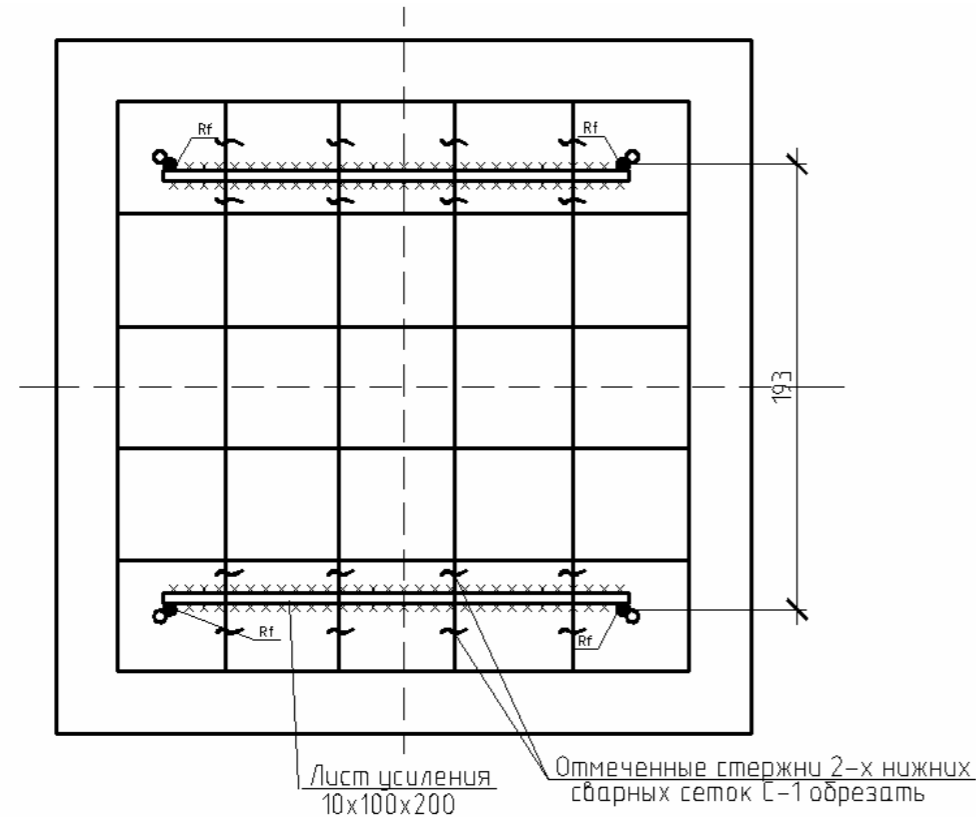


Рис. 10. Лист усиления стыка:

- – рабочие стержни закладной детали $l = 500$ мм; ○ – рабочие стержни сваи

Лист усиления: $10 \times 100 \times 200$ мм

$$k_f = \begin{cases} 6 \text{ мм} & \text{для } \varnothing \leq 14 \text{ мм} \\ 7 \text{ мм} & \text{для } \varnothing \leq 16 \text{ мм} \\ 8 \text{ мм} & \text{для } \varnothing \leq 18 \text{ мм} \end{cases}$$

Повышение несущей способности узла стыка составной сваи для серии 1.011-10 «Сваи забивные железобетонные. Выпуск 8» обеспечивает равнопрочность самой сваи, изготовленной из бетона марок В15 и В20 с любой арматурой, принятой в серии 1.011.1-10.

Приварка листа усиления $10 \times 100 \times 200$ мм к рабочим стержням закладной детали Мс-1 осуществляется одним угловым швом с

$$k_f = \begin{cases} 6 \text{ мм} & \text{для } \varnothing \leq 14 \text{ мм} \\ 7 \text{ мм} & \text{для } \varnothing \leq 16 \text{ мм} \\ 8 \text{ мм} & \text{для } \varnothing \leq 18 \text{ мм} \end{cases}$$

Выводы:

- разработанный узел стыка железобетонной сваи имеет повышенные характеристики в части восприятия усилий на сдвиг (более чем на 10 %);
- предложенный стык имеет улучшенные эксплуатационные характеристики в части упрощения процесса монтажа.

Список литературы

1. Саденко, Д.С. Причины дефектов при производстве монолитных железобетонных конструкций, связанных с коррозией бетона / Д.С. Саденко, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 4 (45). – С. 105–109.
2. Гарькин, И.Н. Деформативно-прочностные свойства монолитных железобетонных перекрытий / И.Н. Гарькин, Д.С. Саденко // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 1 (42). – С. 126–129.
3. Гарькина, И.А. Из опыта разработки материалов специального назначения / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, В.О. Петренко // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 235.
4. Garkina, I.A. Materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Se-lyayev // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 11. – P. 2461–2464.
5. 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.
6. Логанина, В.И. Обеспечение качества и повышение конкурентоспособности строительной продукции: монография / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов. – Пенза, 2014.

References

1. Sadenko, D.S. Causes of defects in the production of monolithic reinforced concrete structures associated with concrete corrosion / D.S. Sadenko, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 4 (45). – P. 105–109.
2. Garkin, I.N. Deformative and strength properties of monolithic reinforced concrete slabs / I.N. Garkin, D.S. Sadenko // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 1 (42). – P. 126–129.
3. Garkina, I.A. From experience in the development of special-purpose materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.O. Petrenko // Modern problems of science and education. – 2014. – No. 5. – P. 235.
4. Garkina, I.A. Materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Se-lyayev // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 11. – P. 2461–2464.
5. 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.
6. Loganina, V.I. Quality assurance and increasing the competitiveness of construction products: monograph / V.I. Loganina, L.V. Makarova, R.V. Tarasov. – Penza, 2014.

УДК 624.012.45

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

Аль-Хаснави Яссер Сами Гариб,
преподаватель-исследователь,
соискатель ученой степени кандидата
технических наук кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

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

Казанский государственный архитектурно-
строительный университет
Россия, 420043, Республика Татарстан,
г. Казань, ул. Зеленая, д.1,
тел./факс: (8843) 510-46-01
E-mail: kgasu@kgasu.ru

Ефимов Олег Иванович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Металлические конструкции»

Замалиев Фарит Сахапович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Металлические конструкции»

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

Al-Chasnavi Yaser Sami Garib,
Lecturer-researcher, Applicant for the degree
of Candidate of Sciences 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

Kazan State University of Architecture and
Civil Engineering
Russia, 420043, Republic of Tatarstan, Kazan,
1, Zelyonaya St.,
tel./fax: (8843) 510-46-01
E-mail: kgasu@kgasu.ru

Efimov Oleg Ivanovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Metal Structures»

Zamaliyev Farit Sakhapovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Metal Structures»

К ВОПРОСУ О ПРОЕКТИРОВАНИИ БАЛКИ ИЗ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА С ЖЁСТКОЙ АРМАТУРОЙ

Аль-Хаснави Яссер Сами Гариб, О.И. Ефимов, Ф.С. Замалиев, Н.Н. Ласьков

Рассматривается возможность (невозможность) проектирования облегчённых железобетонных балок из ячеистого бетона с жёсткой арматурой в виде спаренных в двутавр тонкостенных стальных холоднодеформированных оцинкованных профилей в виде швеллеров с применением «метода предельных усилий».

Ключевые слова: ячеистый бетон; жёсткая арматура; тонкостенные стальные профили; метод предельных усилий

ON THE DESIGN OF AERATED CONCRETE BEAMS WITH RIGID REINFORCEMENT

Al-Chasnavi Yaser Sami Garib, O.I. Efimov, F.S. Zamaliyev, N.N. Laskov

This paper considers the possibility (impossibility) of designing lightweight reinforced concrete beams made of aerated concrete with rigid reinforcement in the form of thin-walled steel cold-deformed galvanized sections paired in I-beams in the form of channels using the «method of limiting efforts».

Keywords: cellular concrete; rigid reinforcement; thin-walled steel profiles; method of limiting efforts

Наиболее массовыми конструкциями в зданиях и сооружениях являются покрытия и перекрытия, т.е. изгибаемые элементы.

В железобетонных несущих конструкциях покрытий и перекрытий имеются возможности уменьшения их веса: применение облегчённых балок из легких бетонов; использование в качестве жёсткой арматуры этих балок тонкостенных стальных холоднодеформированных оцинкованных профилей (ЛСТП). Лёгким бетоном может быть пенобетон, который имеет достаточную прочность, долговечность, экологическую чистоту и не является горючим.

Возможность (невозможность) проектирования железобетонных балок из ячеистого бетона с жёсткой арматурой в виде спаренных в двутавр тонкостенных гнутых швеллеров с применением «метода предельных усилий» [2,3,4] рассматривается на примере балки с сечением по рис. 1.

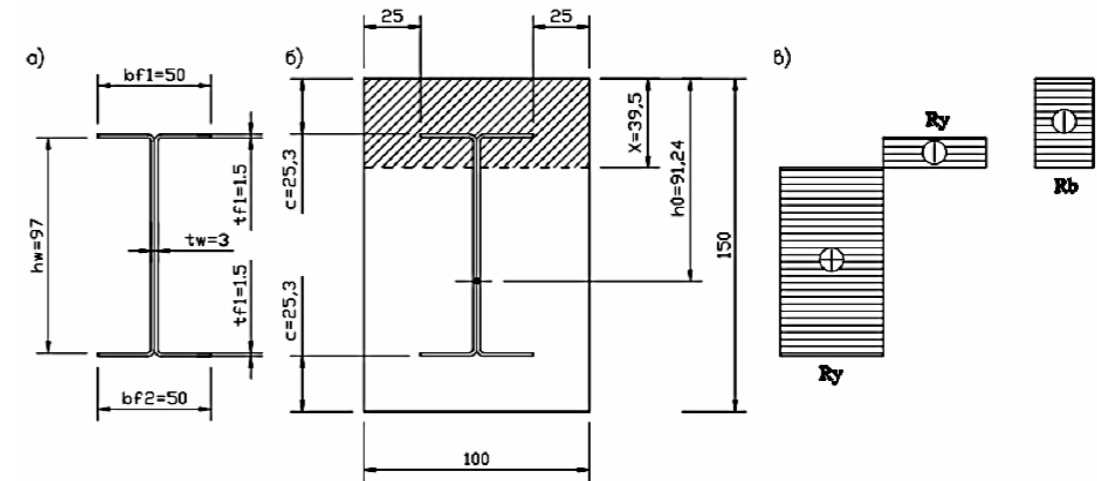


Рис. 1. Параметры нормального сечения рассматриваемой балки:
а – габариты сечения жёсткой арматуры; б – поперечное сечение балки;
в – эпюры нормальных напряжений в сечениях жёсткой арматуры и бетона при использовании «метода предельных усилий»

Положение границы сжатой зоны (граница сжатой зоны пересекает стенку двутавра):

- по указаниям [3]

$$x = \frac{(R_y - R_b) [t_w (t_{f1} + c) - b_{f1} t_{f1}] + R_y [t_w (h_w + t_{f1} + c) + b_{f2} t_{f2}]}{R_b b + R_y t_w - t_w (R_b - R_y)} = \frac{(265 - 14,3) [0,3(0,15 + 2,53) - 5 \cdot 0,15]}{14,3 \cdot 10 + 265 \cdot 0,3 - 0,3(14,3 - 265)} + \frac{265 [0,3(9,7 + 0,15 + 2,53) + 5 \cdot 0,15]}{14,3 \cdot 10 + 265 \cdot 0,3 - 0,3(14,3 - 265)} = 4,019 \text{ см.}$$

Здесь геометрические размеры приняты согласно рис. 1, а, б. Расчётные сопротивления $R_y=265$ МПа и $R_b=14,3$ МПа приняты по результатам испытаний исходных материалов, использованных при изготовлении опытных образцов балок (рис. 3, 4);

- по указаниям [4]

$$x = \frac{2R_y t_w r}{R_b b + 2R_y t_w} = \frac{2 \cdot 265 \cdot 0,3 \cdot 7,5}{14,3 \cdot 10 + 2 \cdot 265 \cdot 0,3} = 3,949 \text{ см.}$$

Оба источника [3, 4] дают практически одинаковое значение положения границы сжатой зоны бетона, что свидетельствует об идентичности подходов в обоих источниках к применению «метода предельных усилий».

Граничное значение относительной высоты сжатой зоны бетона

$$\xi_R = \frac{0,8}{1 + \frac{\varepsilon_{st,el}}{\varepsilon_{b2}}} = \frac{0,8}{1 + \frac{1,286}{3,491}} = 0,58463.$$

Здесь $\varepsilon_{st,el} = R_y / E_{st} = 265 / (2,06 \cdot 10^5) = 1,286 \cdot 10^{-3}$; $\varepsilon_{b2} = 4,8 \cdot 10^{-3} \left(0,4 + \frac{0,6\rho}{2200} \right) = 4,8 \cdot 10^{-3} \left(0,4 + \frac{0,6 \cdot 1200}{2200} \right) = 4,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7273 = 3,491 \cdot 10^{-3}$; ρ – плотность ячеистого бетона (по результатам конкретных замеров).

Для рассматриваемого случая $\xi = x/h_0 = 3,95/9,124 = 0,4329 < \xi_R = 0,58463$.

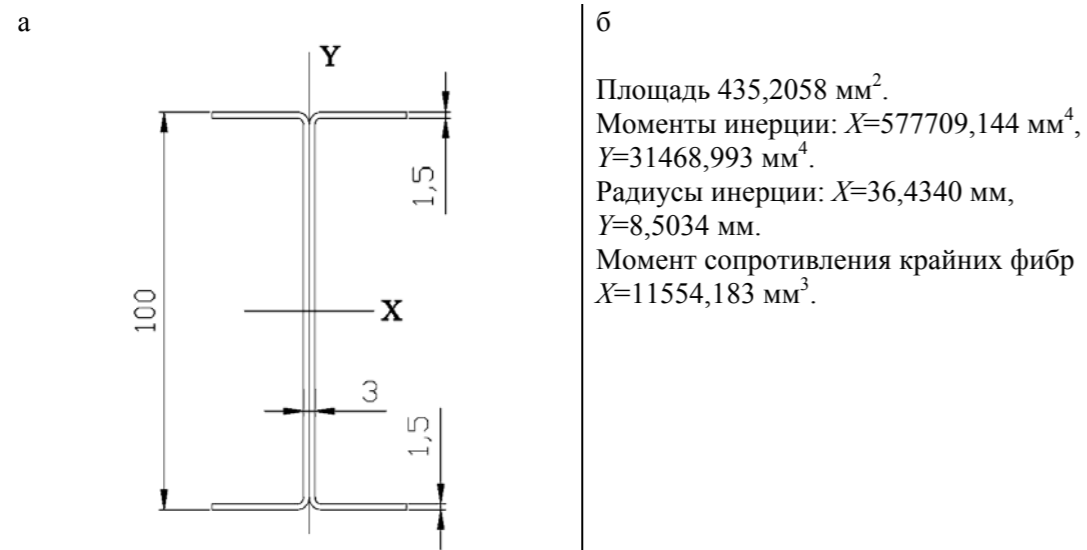


Рис. 2. Геометрические характеристики сечения жёсткой арматуры:

а – сечение жёсткой арматуры; б – геометрические характеристики сечения жёсткой арматуры

Согласно [4], вычисленный при использовании «метода предельных усилий» расчётный изгибающий момент, который выдерживает сечение:

$$M = R_b \frac{bx^2}{2} + R_y \left[W_{пл} + (r-x)^2 t_w \right] = 143 \frac{10 \cdot 3,95^2}{2} + 2650 \left[13,52 + (7,5 - 3,95)^2 \cdot 0,3 \right] = 570,03 \text{ кГм.}$$

Возможность (невозможность) проектирования железобетонных балок из ячеистого бетона с жёсткой арматурой с применением «метода предельных усилий» может быть установлена путём сравнения этого результата с результатами натурных испытаний серии из трёх балок с сечением по рис. 1.

Натурные испытания проведены согласно требованиям ГОСТ 8829-94 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости».

Перед непосредственными испытаниями самих балок серии установлены характеристики материалов, использованных при их изготовлении, т.е.:

- расчётное сопротивление материала жёсткой арматуры $R_y=265$ МПа (напряжение, при котором $\varepsilon_{ост}=0,001$);
- расчётное сопротивление ячеистого бетона $R_b=14,3$ МПа.

Испытания проведены на серии из трёх образцов одинаковых балок из ячеистого бетона с жёсткой арматурой в виде спаренных в двутавр тонкостенных гнутых швеллеров (см. рис. 3, 4). Геометрические параметры сечения жёсткой арматуры представлены на рис. 1 и 2. Балки имеют пролёт 1500 мм. Загружение – два симметрично расположенных груза на расстоянии 500 мм от опор. Такая схема приложения нагрузки позволяет получить зону чистого изгиба в середине пролёта балки.



Рис. 3. Жёсткая арматура из неперфорированных ЛСТП в виде двутавров



Рис. 4. Балка №1, армированная неперфорированными ЛСТП в виде двутавра до испытаний

При испытаниях измерялись:

- величина нагрузки каждого этапа нагружения;
- прогиб балки посредством индикатора часового типа;

- фибровые деформации как самого бетона балки, так и жёсткой арматуры посредством тензометрии;
- длина и ширина раскрытия трещин посредством микроскопа.

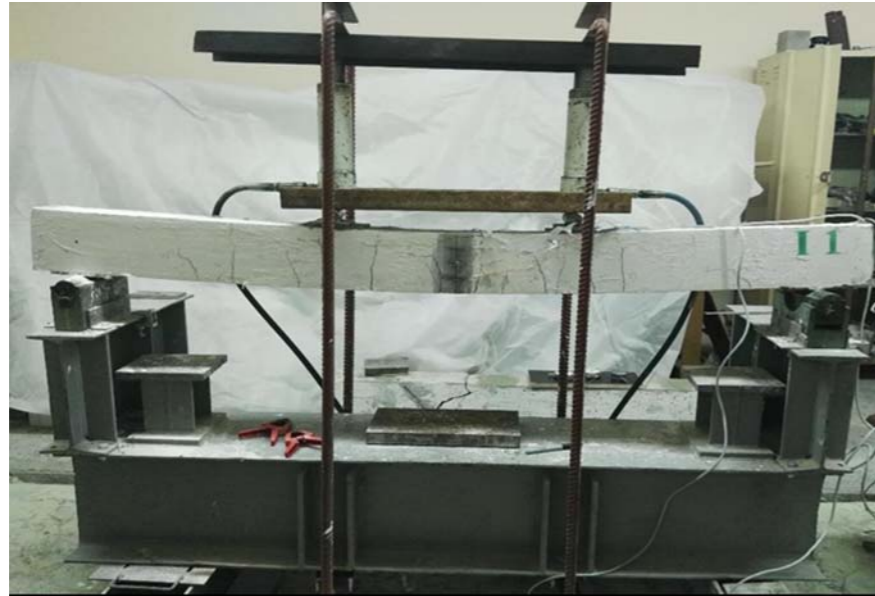


Рис. 5. Балка №1, армированная неперфорированными ЛСПП в виде двутавра после испытаний

Результаты испытаний серии представлены на рис. 6, 7 и 8 в виде совмещённых диаграмм «нагрузка – прогиб» и «нагрузка – кривизна».

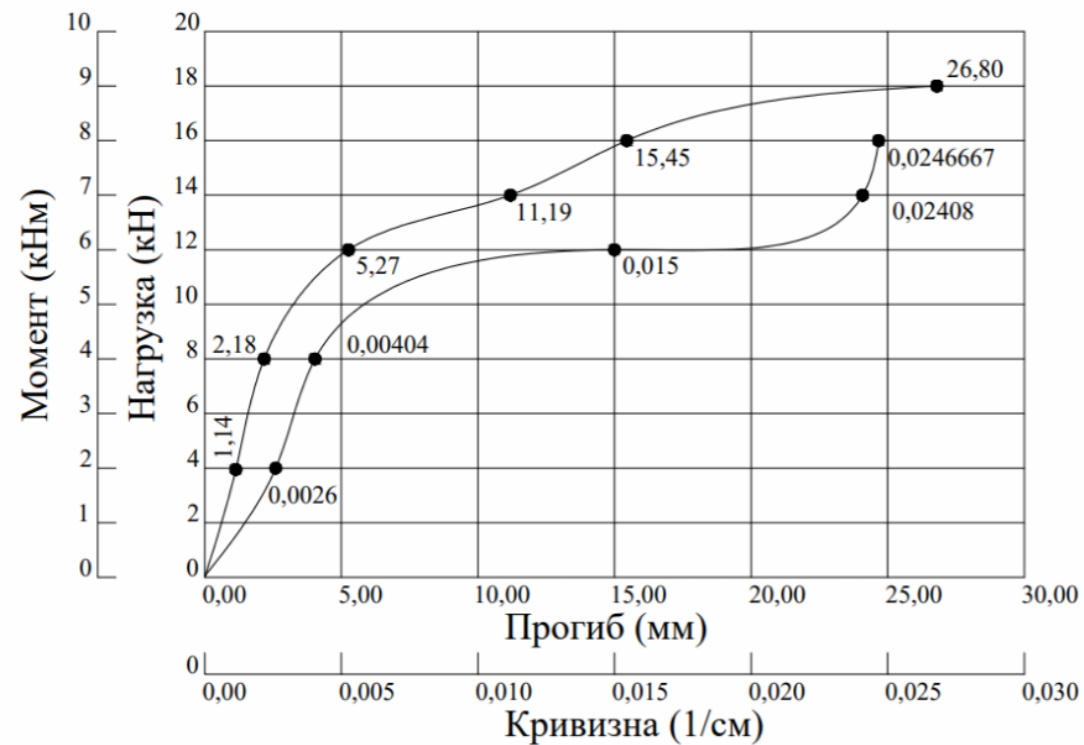


Рис. 6. Результаты натурных испытаний балки №1

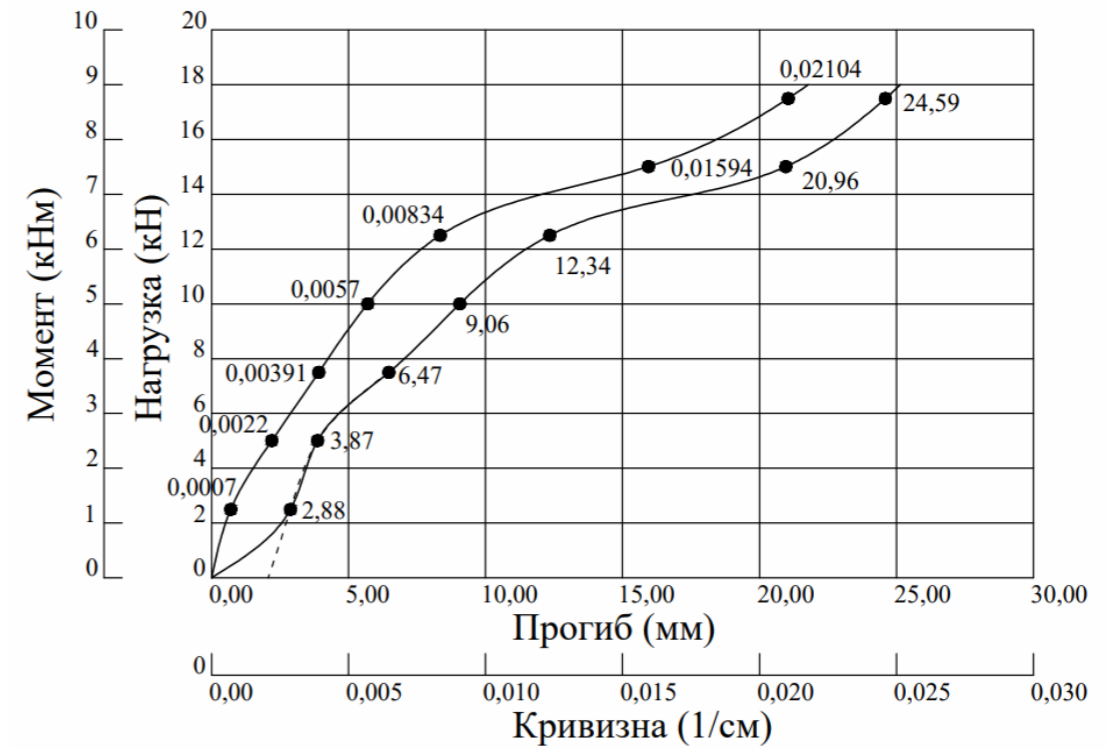


Рис. 7. Результаты натурных испытаний балки №2

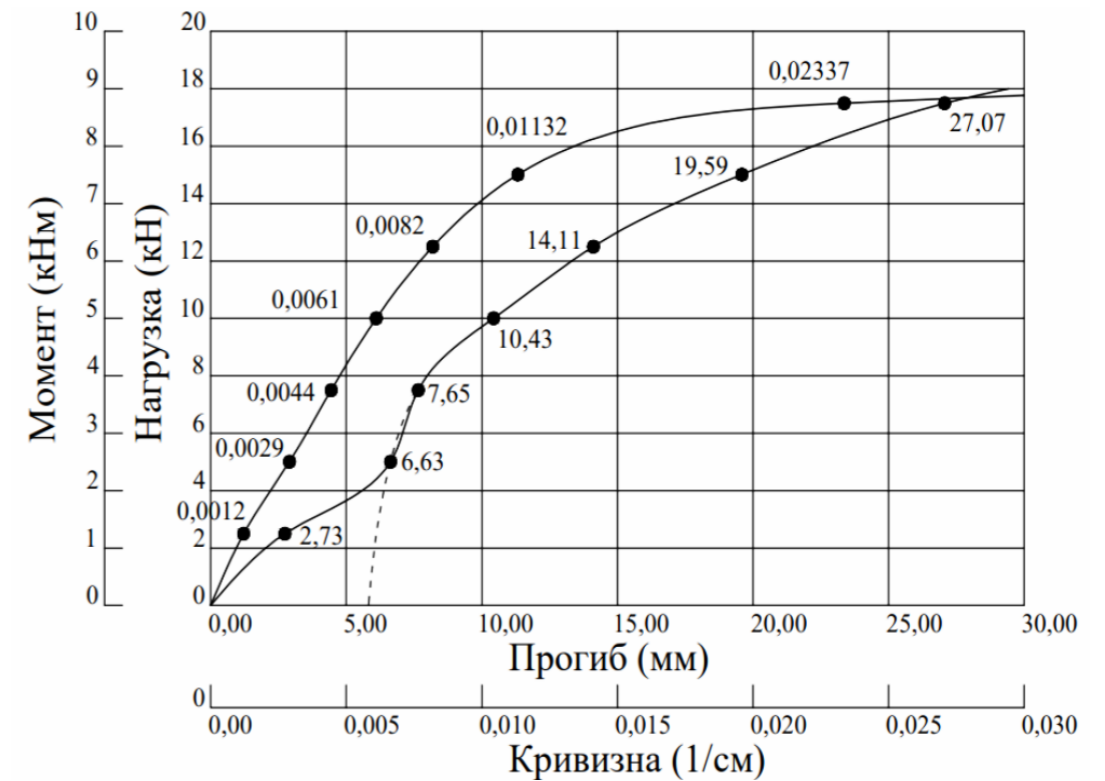


Рис. 8. Результаты натурных испытаний балки №3

Кривизна – разность фибровых деформаций «нижнего» и «верхнего» тензодатчиков, отнесённая к расстоянию между их осями (90 мм).

Выводы:

1. Анализ результатов натурных испытаний балок по показателям нагрузка (момент) – прогиб и нагрузка (момент) – кривизна позволяет считать, что расчётной нагрузкой по первой группе предельных состояний является пара сосредоточенных

грузов в интервале 5,0÷8,0 кН каждый, что соответствует изгибающему моменту 2,5÷4,0 кН·м.

2. Анализ результатов данных свидетельствует о том, что по второй группе предельных состояний расчётной длительно действующей нагрузкой является пара сосредоточенных грузов ~7,5 кН каждый. Расчётной кратковременно действующей нагрузкой является пара сосредоточенных грузов ~10 кН каждый.

3. Расчётный изгибающий момент (5,703 кН·м) по первой группе предельных состояний, определённый по «методу предельных усилий», больше аналогичного, полученного в ходе натурных испытаний серии балок (2,5÷4,0 кН·м) в 1,43÷2,28 раза.

4. Проектирование железобетонных балок из ячеистого бетона с жёсткой арматурой в виде спаренных в двутавр тонкостенных гнутых швеллеров с применением «метода предельных усилий» не представляется возможным.

Список литературы

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: Стандартинформ, 2019.
2. СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. – М., 2017.
3. Методическое пособие по расчёту и проектированию сталежелезобетонных конструкций с жёсткой арматурой. – М., 2019.
4. Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жёсткой арматурой. – М., 1978.

References

1. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003. – M.: Standartinform, 2019.
2. SP 266.1325800.2016. Steel-reinforced concrete structures. Design rules. – M., 2017.
3. Methodological guide for the calculation and design of steel-reinforced concrete structures with rigid reinforcement. – M., 2019.
4. Guide for the design of reinforced concrete structures with rigid reinforcement. – M., 1978.

УДК 624.9669.032.22

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

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ КОЛОНН ДЛЯ МНОГОЭТАЖНОГО КАРКАСНОГО ЖИЛОГО ДОМА

И.С. Гучкин, Н.Н. Ласьков

Приводятся результаты определения несущей способности и материалоемкости разных видов центрально-сжатых колонн многоэтажного каркасного здания. Рассматриваются варианты колонн круглого и квадратного сечений из трубобетона и квадратного – из обычного железобетона. Анализируются результаты поверочных расчетов несущей способности колонн и расхода материалов на 1 п.м ствола колонны. Даются рекомендации по применению вида колонн в зависимости от величины расчетной нагрузки и класса бетона.

Ключевые слова: колонна, трубобетон, железобетон, форма сечения, нагрузка, класс бетона, прочность, расчет

COLUMNS MADE OF PIPE CONCRETE FOR A MULTI-STORY FRAME RESIDENTIAL BUILDING

I.S. Guchkin, N.N. Laskov

The results of verification calculations of the load-bearing capacity and material consumption of different types of centrally compressed columns of a multi-story frame building are presented. Variants of columns of round and square cross-sections from pipe concrete and square-cross from ordinary reinforced concrete are considered. The results of the verification calculations of the bearing capacity of columns and material consumption per 1 p.m. of a column trunk are analyzed. Recommendations are given for the use of the type of columns depending on design load and concrete class.

Keyword: pipe-concrete and ordinary reinforced concrete columns, cross-section shape, load, concrete class, strength, calculation

Проблема выбора типа колонн для многоэтажного каркасного здания, несмотря на кажущуюся простоту решения, остается до сих пор актуальной. Здесь должны учитываться как архитектурные, так и конструктивные, технологические и экономические требования. В статье мы несколько упрощаем проблему выбора, ограничиваясь лишь конструктивными и экономическими требованиями, сведенными к материалоемкости конструкции колонн.

В соответствии с техническим заданием требовалось установить тип стойки и класс бетона для центрально-сжатых колонн многоэтажного каркасного жилого дома под расчетные нагрузки $P = 5000$ кН и $P = 4000$ кН. При оценке несущей способности колонн (стоек) допускалось использование как нормативных, так и широко известных

ненормативных методов расчета. Размеры сечения колонн назначались в пределах 300...400 мм.

Исследуемые параметры – несущая способность и материалоемкость колонн.

Типы колонн: колонна трубобетонная, круглого и квадратного сечений; колонна обычная железобетонная, квадратного сечения.

Виды бетона: бетон высокопрочный класса В45; бетон средней прочности класса В15.

Методы расчета колонн:

- 1 – колонна трубобетонная, круглого сечения (метод СП266.1325800,2016);
- 2 – то же (метод Л.И.Стороженко);
- 3 – колонна трубобетонная, квадратного сечения (метод А.Л.Кришана);
- 4 – колонна обычная железобетонная, квадратного сечения (метод СП 63.13330, 2012).

Исходные данные к расчету колонн:

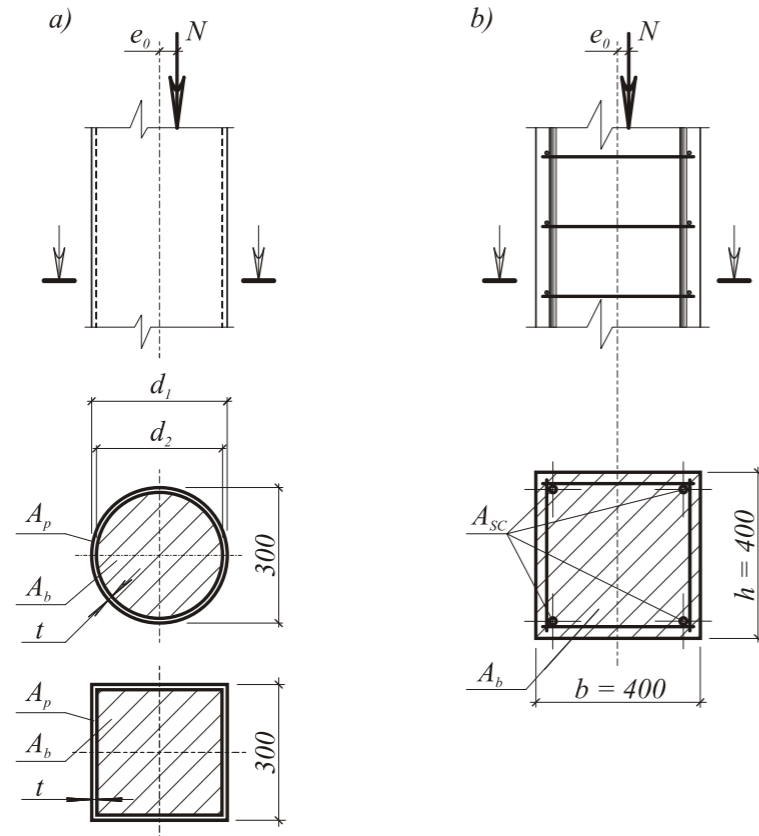
Общие исходные данные колонн:

Расчетный эксцентриситет $e = e_0 \leq 1$ см, гибкость $\lambda \leq 10$.

Бетон класса В45, $R_b = 25$ МПа, $\gamma_{e2} = 1$ (для В15, $R_b = 8.5$ МПа).

Труба кольцевого или квадратного сечения из стали класса С345, $R_y = 330$ МПа,

$R_{ym} = 345$ МПа. Арматура класса А400, $R_{sc} = 350$ МПа.



Расчетные схемы колонн:

а – колонна из трубобетона; б – колонна железобетонная

1. Расчет колонны круглого сечения из трубобетона

(метод расчета по СП 266.1325800.2016)

Геометрические параметры сечения колонны:

Наружный диаметр трубы $d_1 = 300$ мм, внутренний диаметр $d_2 = 284$ мм.

Толщина стенки $t = 8$ мм, $t/d_1 = 8/300 = 0.027 < 0.046$ – условие [1] выполняется.

Площадь сечения бетонного ядра $A_b = \pi d_2^2/4 = 3,14 \cdot 28,4^2/4 = 633,15$ см².

Площадь сечения стенки трубы $A_p = \pi t (d_2 + t) = 3,14 \cdot 0,8 \cdot (28,4 + 0,8) = 73,35$ см². При толщине стенки $t = 6$ мм $A_p = 55,1$ см².

Расчетное усилие, воспринимаемое сечением колонны:

$$N_r = \varphi (R_{bp} A_b + R_{pc} A_p),$$

где $\varphi = 1,0$ – коэффициент продольного изгиба; R_{bp} – расчетное сопротивление сжатию бетона в трубе,

$$R_{bp} = R_b + \Delta R_b \eta_1 = 25 + 67,43 \cdot 0,746 = 74,63 \text{ МПа};$$

здесь $\eta_1 = 1 - 7,5e/(d - 2t) = 1 - 7,5 \cdot 1,0/(30 - 2 \cdot 0,8) = 0,746 > 0$ – условие выполняется;

$$\Delta R_b = R_b (2 + 2,52 e^{-1/G(R_p A_p + R_b A_b)}) t R_p / (d_1 - 2t) R_b =$$

$$= 25 (2 + 2,52 \cdot 1,0^{-1/25(330 \cdot 73,35 + 25 \cdot 633,15)}) \cdot 0,008 \cdot 330 / (0,3 - 2 \cdot 0,008) \cdot 25 = 67,43 \text{ МПа};$$

$G = 25$ МН – при измерениях в МПа [1]; R_{pc} – расчетное сопротивление сжатию металла трубы,

$$R_{pc} = R_y - 0,25 R_y \cdot \eta_1 = 330 - 0,25 \cdot 330 \cdot 0,736 = 269,3 \text{ МПа}.$$

Расчетное усилие, воспринимаемое сечением колонны:

$$N_r = 1,0 (74,63 \cdot 10^3 \cdot 633,15 \cdot 10^{-4} + 269,3 \cdot 10^3 \cdot 73,35 \cdot 10^{-4}) = 6700,5 \text{ кН}.$$

Примечание. При толщине стенки трубы $t = 6$ мм и классе бетона В45 – $N_r = 5433$ кН; при толщине $t = 6$ мм и классе бетона В15 – $N_r = 4067$ кН.

Расход материалов на 1 п.м ствола колонны:

Бетон – $633,15 \cdot 100 = 63315$ см³ = 0,063 м³.

Сталь – $0,0073 \cdot 7800 = 56,94$ кг. При $t = 6$ мм расход составляет: $0,0055 \cdot 7800 = 42,9$ кг.

2. Расчет колонны круглого сечения из трубобетона

(по методу Л.И. Стороженко)

Исходные данные – класс бетона, геометрические и расчетные параметры трубы такие же, как и в предшествующем примере.

Расчетное усилие, воспринимаемое сечением колонны:

$$N_r = \gamma_{bs} (R_{bp} A_b + \gamma_{s2} R_y A_p),$$

где $\gamma_{bs} = 1,1$ – коэффициент условий работы трубобетона;

γ_{s2} – коэффициент условий работы металла трубы, зависит от коэффициента μpb и марки стали, определяется по графику [2, рис. 5,1];

R_{bp} – расчетное сопротивление сжатию бетона, $R_{bp} = R_{bpm}/\gamma_{вп}$;

R_{bpm} – условное (нормируемое) сопротивление сжатию бетона в оболочке;

$\gamma_{вп} = 1,16$ – коэффициент надежности по бетону для трубобетона.

$$R_{bpm} = 0,65B(1 + 16,1 \mu pb \beta) = 0,65 \cdot 45(1 + 16,1 \cdot 0,115 \cdot 0,3) = 45,49 \text{ МПа};$$

$$R_{bp} = 45,49/1,16 = 39,2 \text{ МПа} (3,92 \text{ кН/см}^2);$$

здесь μpb – коэффициент армирования трубобетона,

$$\mu pb = (d_1/d_2)^2 - 1 = (30/28,4)^2 - 1 = 0,115;$$

$\beta = 0,3$ – поправочный коэффициент, принимаемый в зависимости от класса бетона по прочности на сжатие из таблицы [2]:

Класс бетона	В15	В20	В25	В30	В35	В40	В45
β	0,77	0,66	0,52	0,39	0,35	0,31	0,3

Расчетное усилие, воспринимаемое сечением колонны:

$$N_r = 1,1 (3,92 \cdot 633,15 + 0,86 \cdot 330 \cdot 73,35) = 5020 \text{ кН}.$$

Примечание. Если класс бетона В15, то при тех же исходных данных $N_r=3711$ кН.

Расход материалов на 1 п.м ствола колонны:

Бетон – $633,15 \cdot 100=63315 \text{ см}^3 = 0,063 \text{ м}^3$. Сталь – $0,0073 \cdot 7800=56,94$ кг.

3. Расчет колонны квадратного сечения из трубобетона (по методу А.Л.Кришана)

Исходные данные:

Бетон класса В45, $R_b=25$ МПа, $\gamma_{b2}=1$ (для В15 $R_b=8.5$ МПа).

Труба из стали класса С345, $R_y=330$ МПа, $R_{yn}=345$ МПа.

Геометрические параметры сечения колонны

Размеры сечения: $b=0,288$ м, $b_1=0,3$ м, $t=0,006$ м.

Площадь сечения бетонного ядра $A_b=b^2=0,288^2=0,083 \text{ м}^2$.

Площадь сечения стенки трубы $A_p=(2b_1+2b) \cdot t=(2 \cdot 0,3+2 \cdot 0,288) \cdot 0,006=0,007 \text{ м}^2$.

Коэффициент армирования $\mu=A_s/A_b=0,007/0,083=0,084$ (8,4 %).

Расчетное сопротивление бетона в трубе [3]:

$R_{b\alpha}=R_b+0,4 \mu R_y=25+0,4 \cdot 0,085 \cdot 330=36,22$ МПа.

Расчетное усилие, воспринимаемое сечением колонны:

$N_r=R_{b\alpha} A_b+0,9 R_y A_s=36,22 \cdot 0,083 \cdot 10^3+0,9 \cdot 330 \cdot 10^3 \cdot 0,007=5085$ кН.

Примечание. Если класс бетона В15, то при тех же исходных данных $N_r=4255$ кН.

Расход материалов на 1 п.м ствола колонны:

Бетон – $0,083 \cdot 1,0=0,083 \text{ м}^3$.

Сталь – $0,007 \cdot 7800=54,6$ кг.

Коэффициент армирования $\mu=0,007/0,083=0,084$ (8,4 %).

4. Расчет железобетонной колонны квадратного сечения (метод расчета по СП 63. 13330. 2012)

Исходные данные:

Бетон класса В45, $R_b=25$ МПа, $\gamma_{b1}=1$. Арматура класса А400, $R_{sc}=350$ МПа.

Геометрические параметры колонны: размеры сечения $b \cdot h=0,4 \cdot 0,4$ (м), площадь сечения $A_b=0,4^2=0,16 \text{ м}^2$, рабочая арматура $4\text{Ø}25\text{A}400+4\text{Ø}16\text{A}400$, площадь сечения арматуры $A_{sc}=19,63+8,04=27,67 \text{ см}^2$.

Коэффициент армирования $\mu=0,0028/0,16=0,0175$ (1,75 %).

Расчетное усилие, воспринимаемое сечением колонны [4]:

$N_r=\varphi(R_b \gamma_{b1} A_b+R_{sc} A_{sc})$,

$N_r=1,0 \cdot (25 \cdot 10^3 \cdot 1,0 \cdot 0,16+350 \cdot 10^3 \cdot 27,67 \cdot 10^{-4})=4968$ кН.

Примечание. Второй вариант – класс бетона В15, арматура $4\text{Ø}32\text{A}400+4\text{Ø}22\text{A}400$, площадь сечения $A_{sc}=47,37 \text{ см}^2$, процент армирования $\mu=2,96$ %, $N_{r1}=4058$ кН.

Определяем расход материалов на 1 п.м ствола колонны:

Бетон – $0,16 \cdot 1,0=0,16 \text{ м}^3$.

Рабочая арматура – $27,67 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0 \cdot 7800=21,6$ кг.

То же, второй вариант – $47,37 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0 \cdot 7800=36,95$ кг.

Поперечная арматура (хомуты – 3 шт.) $\text{Ø}8\text{A}240$ ($A_s=0,503 \text{ см}^2$, шаг 35 см).

Общая длина хомутов на 1 п.м ствола $37 \cdot 4 \cdot 3=444$ см.

Масса хомутов $0,503 \cdot 10^{-4} \cdot 4,44 \cdot 7800=1,74$ кг.

Результаты выполненных расчетов несущей способности и материалоемкости колонн (в расчете на 1 п.м ствола колонны) обобщены и представлены в таблице.

Результаты расчета колонн

Методы расчета	Исходные данные			Результаты расчета			Примечание
	Сечение колонны, мм	Объем бетона, м ³	Класс бетона, В	Расход стали, кг	Расчетное усилие (N_{r45}, N_{r15}), кН	$\frac{N_{r45}}{N_{r15}}$	
1	2	3	4	5	6	7	8
Метод СП266.13258.2016	Ø300 $t=6$	0,065	В45	42,9	5433	1,34	
			В15	42,9	4067		
Метод Стороженко Л.И.	Ø300 $t=8$	0,063	В45	56,94	5020	1,35	
			В15	56,94	3711		
Метод Кришана А.Л.	300×300 $t=6$	0,083	В45	54,6	5085	1,2	
			В15	54,6	4255		
Метод СП63.13330.2012	400×400	0,16	В45	23,34	4968	2,13	$\mu=1,73$ % $\mu=1,73$ % ($\mu=2,86$ %)
			В15	23,34	2330		
			В15	(36,95)	(4058)		

Примечание. Величина расчетных усилий, воспринимаемых колонной, достаточно условна, так как не учитывается влияние гибкости элемента на величину коэффициента φ . Однако для коротких элементов, когда $\varphi=0,97 \dots 0,99$, это не приводит к существенным погрешностям и вполне допустимо в прикидочных расчетах.

Выводы

Из анализа табличных данных следует:

1. В центрально-сжатых колоннах, с расчетной нагрузкой 5000 кН, целесообразно применить трубобетонные колонны круглого сечения из бетона класса В45, как имеющих наибольшую несущую способность и экономичных по расходу материалов.

2. В центрально-сжатых колоннах, с расчетной нагрузкой 4000 кН, можно использовать близкие по несущей способности и расходу материалов колонны из трубобетона круглого сечения (класс бетона В15) или обычные железобетонные того же класса, однако во втором случае размеры сечения и расход бетона несколько выше.

3. Колонны квадратного сечения из трубобетона по расходу металла уступают колоннам круглого сечения, но имеют преимущества перед ними при решении узлов сопряжения со стенами и перегородками. Этот фактор необходимо учитывать при выборе окончательного решения.

4. Расчет трубобетонных колонн по нормам [1], в сравнении с расчетом по методу Л.И.Стороженко, показывает более высокие значения несущей способности, поэтому желательно экспериментальное подтверждение [5].

Список литературы

- СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования / АО НИИ «Строительство». – М., 2017.
- Стороженко, Л.И. Расчет трубобетонных конструкций / Л.И. Стороженко, П.И. Плахотный, А.Я. Черный. – Киев: Будивельник, 1991.
- Кришан, А.Л. Прочность трубобетонных колонн квадратного сечения при осевом сжатии / А.Л.Кришан, А.С.Мельничук // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2012. – №3.
- СП 63. 13330. 2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 52 – 01 – 2003. – М., 2012.
- Danilov, A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 5–8. – С. 219–225.

References

1. SP 266.1325800.2016. Steel-reinforced concrete structures. Design rules / JSC Research Institute "Construction". – M., 2017.
2. Storozhenko, L.I. Calculation of pipe-concrete structures / L.I. Storozhenko, P.I. Plakhotny, A.Ya. Cherny. – Kiev: Budivelnik, 1991.
3. Krishan, A.L. Strength of square-section pipe-concrete columns under axial compression / A.L. Krishan, A.S. Melnichuk // Bulletin of the Moscow State Technical University named after G. I. Nosov. – 2012. – No. 3.
4. SP 63. 13330. 2012. Concrete and reinforced concrete structures. Updated version SNiP 52 – 01 – 2003. – M., 2012.
5. Danilov, A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 5–8. – С. 219–225.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 698

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

Ерёмки Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Петрова Ксения Александровна,
магистрант кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д.40,
тел.: (8412) 36-82-09

Пономарева Инна Константиновна,
кандидат экономических наук,
доцент кафедры «Бухгалтерский учет,
налоги и аудит»
E-mail: inna.ok007@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

Eremkin Aleksander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Heat, Gas Supply
and Ventilation»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Petrova Kseniya Aleksandrovna,
Undergraduate of the department «Heat, Gas
Supply and Ventilation»

Penza State university
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,
tel.: (8412) 36-82-09

Ponomareva Inna Konstantinovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Accounting, Taxes and
Audit»
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ ОТ ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И СОХРАННОСТЬ УБРАНСТВА В ЗАЛАХ БОГОСЛУЖЕНИЯ ЦЕРКВЕЙ, ХРАМОВ, СОБОРОВ

А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, К. А. Петрова

Приведены результаты исследования влияния загрязненных конвективных потоков от отопительных приборов на климатические условия и сохранность убранства в залах богослужения церквей, храмов, соборов. Известно, что к внутреннему убранству залов богослужения относятся станковая живопись, настенная роспись, фрески, произведения зодчества, иконы, иконостас, церковная утварь. Установлено, что продукты горения свечей – сажа, копоть, дым, влага, теплота, углекислый газ, попадая на поверхность внутреннего убранства, подвергают их разрушительному воздействию и ухудшению интерьеров. Предложены способы отклонения загрязненных конвективных потоков от внутренней поверхности стен и убранств. Для этого разработаны горизонтальные направляющие конвективного потока, которые устанавливаются над отопительными приборами. Проведены экспериментальные исследования, которые подтверждают эффективность разработанных конструкций, которые обеспечивают отклонение восходящих загрязненных конвективных потоков от поверхности стен и убранств в зале богослу-

жения. Это позволяет сохранить историко-культурное наследие и обеспечить комфортные климатические условия для прихожан и обслуживающего персонала.

Ключевые слова: зал богослужения, культовые сооружения, климатизация, скорость воздуха, убранство, оптический прибор, горизонтальная направляющая, конвективный поток, дым, влага, копоть, сажа, профиль скорости, профиль температуры

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF CONVECTIVE FLOWS FROM HEATING DEVICES ON CLIMATIC CONDITIONS AND PRESERVATION OF DECORATION IN CHURCHES, TEMPLES AND CATHEDRALS

A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, K.A. Petrova

The article studies the influence of contaminated convective flows from heating devices on climatic conditions and the safety of decoration in the halls of worship of churches, temples and cathedrals. It is known that gilding, easel painting, wall paintings, frescoes, works of architecture, icons, iconostasis, and church utensils belong to the interior decoration of the halls of worship. It has been established that the products of burning candles – soot, smoke, moisture, heat, carbon dioxide which falling on the surface of interior decoration, expose them to destructive effects and deterioration of the interiors. To eliminate the effects of candle combustion products, the article methods were developed for deflecting contaminated convective flows from the inner surface of walls and decorations. For this, horizontal convective flow guides installed above the heating devices have been developed. Experimental studies have been carried out which confirm the effectiveness of the developed structures, which ensure the deviation of upward contaminated convective currents from the surface of the walls and decorations in the worship hall. This allows you to preserve the historical and cultural heritage and explain the comfortable climatic conditions for parishioners and staff.

Keywords: worship hall, places of worship, air conditioning, air speed, decoration, optical device, horizontal guide, convective flow, smoke, moisture, soot, velocity profile, profile, temperature

Обследование ряда соборов и храмов в г.Пензе и Пензенской области позволяет сделать вывод, что не везде применяются системы климатизации, а используемые системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в залах богослужения не справляются с поставленной задачей. Убранства залов в результате выделения при сгорании свечей копоти, сажи, дыма и влаги с годами разрушаются и приобретают неприглядный внешний вид. Восстановление культурных и художественных ценностей требует значительных финансовых и материальных затрат, а также приостановки проведения мероприятий богослужения.

В работе приводятся результаты натурных исследований воздействия восходящих загрязняющих тепловых потоков от отопительных приборов на состояние поверхностей внутренних стен, сводов, куполов и размещенных на данных поверхностях элементов убранства. На рис. 1 показаны загрязнения поверхностей внутренних стен в зале богослужения в храме Святых первоверховных апостолов Петра и Павла в г.Пензе продуктами сгорания свечей в виде копоти, дыма, сажи и влаги.



Рис. 1. Общий вид загрязнения внутренней поверхности стены и икон над отопительным прибором

В зале богослужения храмов и соборов в период богослужения, как правило, установлено несколько десятков подсвечников с сотнями горящих свечей (рис. 2).



Рис. 2. Подсвечники, установленные в зале богослужения Спасского кафедрального собора и в храме Святых первоверховных апостолов Петра и Павла в г.Пензе

Выделяющиеся продукты от сгорания свечей перемещаются по объему зала богослужения за счет вентиляционного и естественного движения воздуха в сторону вытяжных вентиляционных отверстий и восходящих конвективных потоков от нагретых поверхностей отопительных приборов и восходящих конвективных потоков за счет теплоты при сгорании свечей. Движение конвективного потока от нагретой поверхности отопительного прибора в зале богослужения показано на рис. 3.

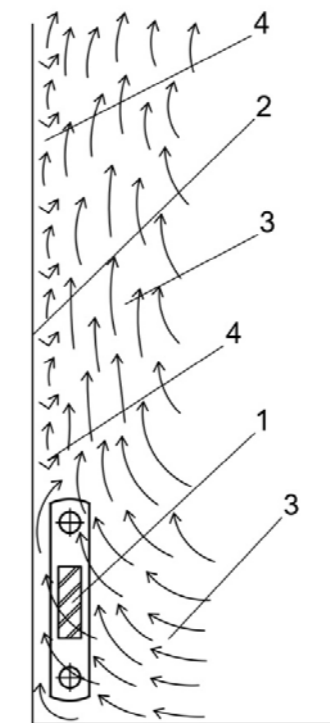


Рис. 3. Схема движения загрязненного воздуха в пристенном конвективном потоке от нагретой поверхности отопительного прибора:
1 – отопительный прибор; 2 – охлажденный конвективный поток; 3 – загрязненный воздух; 4 – нагретый пристенный загрязненный конвективный поток

Нагретый и охлажденный конвективные потоки вдоль тепловоспринимающей внутренней поверхности стены движутся во взаимно противоположных направлениях. Охлажденный поток направлен вниз, а нагретый – вверх, в результате наблюдается взаимное торможение скорости движения конвективных потоков.

Теплота от множества отопительных приборов передается прилегающим слоям воздуха, которые становятся менее плотными и вытесняются более плотной окружающей средой вверх. При этом загрязненный воздух из окружающего пространства достигает нагретой поверхности отопительного прибора, нагревается, увеличивается в объеме и вытесняется вверх более плотным окружающим воздухом. В результате загрязненный воздух скользит над отопительным прибором по внутренней поверхности стены, и образуется постоянный восходящий загрязненный воздушный конвективный поток возле охлажденной внутренней поверхности наружной стены.

Взаимодействие нагретых и охлажденных конвективных потоков определяет общий процесс циркуляции воздуха возле и над отопительными приборами, на поверхности стены и в целом в объеме зала богослужения. Благодаря циркуляции и постоянному подтеканию загрязненного окружающего воздуха (см. рис. 3) из пространства помещения, восходящий конвективный поток захватывает пыль, копоть, сажу, дым, влагу и уносит вверх, при этом данные вредности оседают на вертикальную внутреннюю поверхность стен, икон, живописи и другого убранства над отопительным прибором.

Профиль изменения скорости движения воздуха в поперечном сечении восходящего пристенного конвективного потока от нагретой поверхности отопительного прибора приведен на рис. 4.

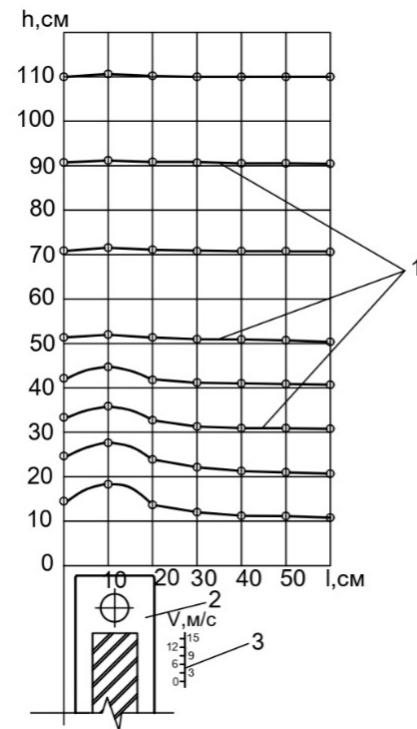


Рис. 4. Профиль изменения скорости движения воздуха в поперечном сечении пристенного восходящего конвективного потока от нагретой поверхности отопительного прибора:

- h – высота пристенного восходящего конвективного потока, см;
 l – расстояние от стены в сторону помещения, см;
 1 – профиль изменения скорости, м/с; 2 – отопительный прибор (радиатор);
 3 – масштаб скорости

Анализ профиля скорости в поперечном сечении пристенного потока показал, что скорость вблизи тепловоспринимающей поверхности стены ниже, чем в конвективном потоке над отопительным прибором. Это происходит за счет торможения двух встречных потоков – охлажденного на поверхности стены и нагретого в объеме конвективного потока. Значение скорости воздуха в начале возрастает до 18 м/с и затем, за счет присоединения воздуха из окружающей среды, снижается до 0,6 м/с. При этом прилегающий воздух поступает только со стороны помещения, в результате объем и толщина конвективного потока возрастают за счет загрязненного воздуха.

Установлено, что прилегающий воздух, поступающий в конвективный поток со стороны помещения, загрязнен сажой, дымом, влагой, копотью, пылью, оседающими на поверхности стен и убранства зала богослужения. По мере удаления от стены скорость воздуха в конвективном потоке снижается до уровня скорости окружающего воздуха в помещении. Профиль изменения температуры воздуха в поперечном сечении пристенного восходящего конвективного потока от нагретой поверхности отопительного прибора показан на рис. 5.

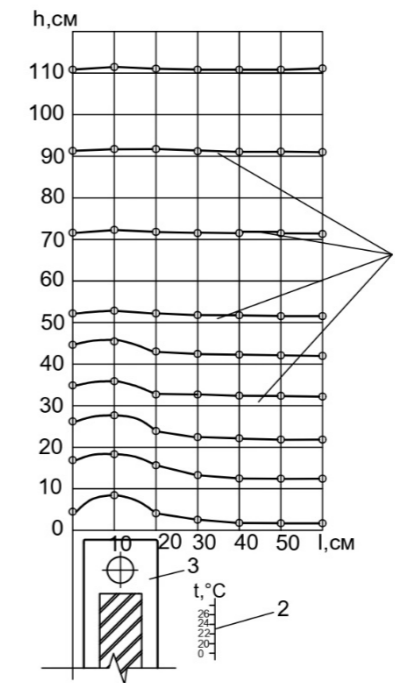


Рис. 5. Профиль изменения температуры воздуха в поперечном сечении пристенного восходящего конвективного потока от нагретой поверхности отопительного прибора:

- h – высота пристенного восходящего конвективного потока, см;
 l – расстояние от стены в сторону помещения, см;
 1 – профиль изменения температуры, °С; 2 – масштаб температуры, °С;
 3 – отопительный прибор (радиатор)

По тепловоспринимающей внутренней поверхности стены вертикально вверх направлен загрязненный нагретый конвективный поток с температурой до 20 °С, затем, по мере удаления от стены, температура воздуха в потоке повышается и над отопительным прибором достигает 24 °С при температуре на поверхности отопительного прибора 42,3 °С.

Объем конвективного потока непрерывно возрастает за счет подтекания воздуха из окружающей среды помещения, при этом прилегающий воздух поступает только со стороны помещения с загрязнениями, копотью, сажой, дымом, влагой. В результате в поперечном сечении температура воздуха в конвективном потоке снижается до 19 °С и достигает температуры воздуха в помещении. В результате совместного действия скорости и температуры воздуха конвективный поток скользит по внутренней поверхности стен, на которых размещены элементы убранства зала богослужения, загрязняя их продуктами сгорания свечей.

Проведенные авторами исследования показали, что элементы оформления интерьера зала становятся закопченными и имеют неприглядный внешний вид. В процессе эксплуатации зданий периодически проводятся реставрационные работы и тратятся значительные средства. Экспериментально установлено, что в каждом поперечном сечении пристенного конвективного потока образуются профили скоростей и температуры с высокими параметрами, которые интенсифицируют движение загрязненного воздуха по внутренней поверхности стены и элементам убранства зала

богослужения. Для устранения негативного воздействия данных явлений необходимо предусмотреть мероприятия, при которых важно перенаправить восхождение конвективного потока от поверхности стены вовнутрь помещения к месту удаления воздуха из зала богослужения в атмосферу.

Для регулирования направления движения конвективного потока от отопительного прибора разработаны два способа обеспечения отклонения вертикального загрязненного потока воздуха от внутренней поверхности стены в сторону помещения. Для регулирования направления движения конвективного потока над отопительным прибором устанавливается горизонтальная направляющая конвективного потока (рис. 6).

Из зала богослужения загрязненный конвективный поток 4 достигает нагретой поверхности отопительного прибора 1; нагреваясь, поднимается в верхнюю часть отопительного прибора и упирается в горизонтальную направляющую 2. Затем поток разворачивается на 90 градусов и, выходя из-под направляющей, поднимается в виде конвективного потока вверх, не касаясь внутренней поверхности стены и убранства. Охлажденный поток 3, опускающийся вниз, захватывается восходящим конвективным потоком и общей струей перемещается в верхнюю часть помещения, откуда удаляется наружу.

Дальнейшие экспериментальные исследования изменения температуры и скорости воздуха в конвективном потоке показали, что более эффективным способом отклонения потока от стены вовнутрь помещения является установка над прибором горизонтальной направляющей с профилем внутри в виде дуги (рис.7).

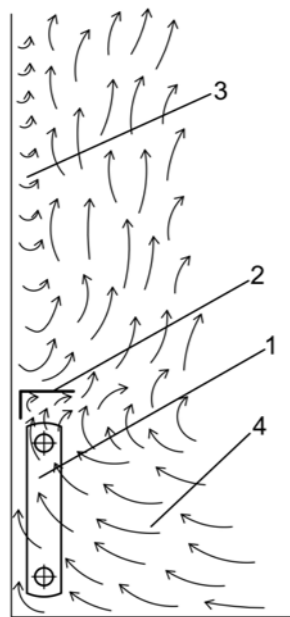


Рис. 6. Схема движения загрязненного воздуха в пристенном конвективном потоке от нагретой поверхности отопительного прибора:

- 1 – отопительный прибор; 2 – горизонтальная направляющая конвективного потока; 3 – охлажденный нисходящий конвективный поток; 4 – загрязненный восходящий конвективный поток

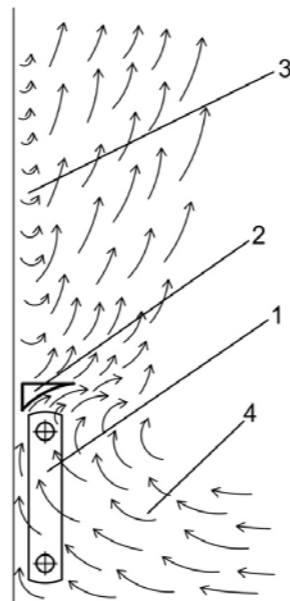


Рис. 7. Схема движения загрязненного воздуха в пристенном конвективном потоке от нагретой поверхности отопительного прибора:

- 1 – отопительный прибор; 2 – горизонтальная направляющая конвективного потока с профилем внутри в виде дуги; 3 – охлажденный нисходящий конвективный поток; 4 – загрязненный восходящий конвективный поток

Профиль внутри устройства 2 обеспечивает плавный поворот нагретого потока над отопительным прибором и большее ускорение и отклонение в сторону помещения. Дальнейшее движение нисходящего и восходящего конвективных потоков происходит аналогично описанному выше способу. В результате внедрения разработанных способов нагретый конвективный поток, загрязненный дымом, сажей, копотью, влагой, пылью и другими вредностями, не достигает поверхностей стены и убранства над отопительным прибором. Это позволяет сохранить историко-культурное наследие в залах богослужения и обеспечить комфортные климатические условия для прихожан.

Теоретические и экспериментальные исследования и разработанные конструктивные решения позволяют сделать следующие выводы:

1. Для климатизации залов богослужения церквей, храмов, соборов применяются различные системы отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, схемы воздухообмена и виды теплоносителей.

2. В качестве убранства залов богослужения используются художественная роспись, станковая живопись, иконы, фрески, архитектурные элементы, иконостасы, утварь, являющиеся историко-культурным наследием.

3. Известно, что при сгорании свечей в зале богослужения выделяются дым, сажа, копоть, влага, теплота, углекислый газ. Данные вредности отрицательно влияют на сохранность убранства и комфортные условия в залах богослужения.

4. Для решения проблемы сохранности внутреннего убранства разработаны два конструктивных решения в виде горизонтальных направляющих конвективного потока, которые устанавливаются над отопительными приборами и обеспечивают отклонение загрязненного конвективного потока от стены в сторону помещения, что препятствует загрязнению стен и убранства в зале богослужения.

5. Проведены экспериментальные исследования с использованием прибора для задымления в храме Святых первоверховных апостолов Петра и Павла в г. Пензе. Полученные данные подтверждают эффективность разработанных конструктивных решений.

Список литературы

1. АВОК Стандарт–2-2004. Храмы православные. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: отраслевой стандарт: дата введения НП «АВОК» 09.06.04. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2004. – 14 с.
2. ИСП 31-103-99. Здания, сооружения и комплексы православных храмов / Госстрой России. – М.: АХЦ «Арххрам», ГУП ЦПП, 2000.
3. ГОСТ 12.3.018. Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. – М.: Госстандарт СССР, 1979.
4. МДС 31-9.2003. Православные храмы. Т.2. Православные храмы и комплексы / Архитектурно-художественный центр Московской Патриархии; сост. М.Ю. Кеслер. – М.: Технорматив, 2008. – 194 с.
5. Кочев, А.Г. Микроклимат православных храмов: монография / А.Г. Кочев; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2004. – 449 с.
6. Чем дышат храмы? Благовест. – URL: <http://blagovest.ru/blog/chem-dyshatphramy>, свободный – (11.01.2021).
7. СП 391.132.5800. 2017. Храмы православные. Правила проектирования / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. – М., 2018.
8. Еремкин, А.И. Анализ использования гибридных систем создания и поддержания искусственного микроклимата в православных соборах и храмах / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, К.А. Петрова // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2020. – № 4. – С. 158–167.

9. Еремкин, А.И. Анализ и способы обеспечения микроклимата в православных соборах и храмах / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, А.Г. Багдасарян // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2020. – № 4. – С. 151–158.

10. Еремкин, А.И. Особенности применения вытесняющей вентиляции в системах кондиционирования воздуха в залах богослужения православных соборов и храмов / А.И. Еремкин // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 2. – С. 151–158.

11. Еремкин, А.И. Методика расчета воздухообмена системы кондиционирования воздуха вытесняющего типа в залах богослужения православных соборов / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 3. – С. 161–168.

12. Еремкин, А.И. Пути повышения качества микроклимата в зале богослужения Спасского кафедрального собора г. Пензы / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, К.А. Петрова, А.Г. Багдасарян // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 4. – С. 125–136.

13. Еремкин, А.И. Совершенствование устройств тепловлажностной обработки воздуха и методов расчета климатологии / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин. – Москва-Вологда: ИНФРА-Инженерия, 2019. – 186 с.

References

1. AVOK Standard–2-2004. Orthodox churches. Heating, ventilation and air conditioning: industry standard: date of introduction of NP «AVOK» 09.06.04. – М.: AVOK-PRESS, 2004. – 14p.

2. I. SP 31-103–99. Buildings, structures and complexes of Orthodox churches / Gosstroy of Russia. – М.: АНТ «Арххкхрм», ГУП ТсПП, 2000.

3. GOST 12.3.018. Occupational safety standards system. Ventilation systems. Aerodynamic test methods. – М.: Gosstandart USSR, 1979.

4. MDS 31-9.2003. Orthodox churches. T.2. Orthodox churches and complexes / Architectural and Art Center of the Moscow Patriarchate; compiled by M.Yu. Kesler. – М.: Tekhnormative, 2008. – 194 p.

5. Kochev, A.G. Microclimate of Orthodox churches: monograph / A.G. Kochev; Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering. – Nizhny Novgorod: NNGASU, 2004. – 449 p.

6. How can temples breathe? Blagovest. – URL: <http://blagovest.ru/blog/chem-dyshatphramy>, free – (01/11/2021).

7. SP 391.132.5800. 2017. Orthodox churches. Design rules / Ministry of construction and housing and communal services of the Russian Federation. – М., 2018.

8. Eremkin, A.I. Analysis of the use of hybrid systems for creating and maintaining an artificial microclimate in Orthodox cathedrals and temples / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, K.A. Petrova // Education and Science in the Modern World. Innovation. – 2020. – No. 4. – P. 158–167.

9. Eremkin, A.I. Analysis and methods of providing a microclimate in Orthodox cathedrals and temples / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, A.G. Bagdasaryan // Education and Science in the Modern World. Innovation. – 2020. – No. 4. – P. 151–158.

10. Eremkin, A.I. Features of the use of displacement ventilation in air conditioning systems in the halls of worship of Orthodox cathedrals and temples / A.I. Eremkin // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 2. – P. 151–158.

11. Eremkin, A.I. Methodology for calculating the air exchange of the displacing type air conditioning system in the halls of worship of Orthodox cathedrals / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 3. – P. 161–168.

12. Eremkin, A.I. Ways to improve the quality of microclimate in the worship hall of the Spassky Cathedral in Penza / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, K.A. Petrova, A.G. Bagdasaryan // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 4. – P. 125–136.

13. Eremkin, A.I. Improvement of devices for heat and humidity treatment of air and methods for calculating climatic engineering / A.I. Eremkin, A.G. Aeverkin. – Moscow-Vologda: INFRA-Engineering, 2019. – 186 p.

УДК 621.6.036

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Россия, 410054, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77,
тел.: (8452) 51-50-18

Усачев Александр Прокофьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Теплогазоснабжение,
вентиляция, водообеспечение
и прикладная гидрогазодинамика»
E-mail: usachev-ap@mail.ru

АО «Гипрониигаз»

Россия, 410012, г. Саратов,
проспект им. Кирова С.М., д. 54,
тел.: (845-2) 74-94-95

Шурайц Александр Лазаревич,
доктор технических наук, генеральный
директор АО «Гипрониигаз»
E-mail: Shurait@niigaz.ru

Хомутов Антон Олегович,
директор по техническому регулированию

АО «Ревизия Контролинг Консалтинг»

Россия, г. Саратов, тел. (8452) 74-94-74

Пикалов Александр Анатольевич,
аспирант, эксперт по надзору АО «Ревизия
Контролинг Консалтинг»
E-mail: pikalov-181978@yandex.ru

*Saratov State Technical University named
after Gagarin Yu.A.*

Russia, 410054, Saratov,
77, Politechnicheskaya St.,
tel.: (8452) 51-50-18

Usachev Aleksander Prokofievich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Heat and Gas Supply,
Ventilation, Water Supply and Applied
Hydrogasodynamics»
E-mail: usachev-ap@mail.ru

JSC «Giproniigas»

Russia, 410012, Saratov,
54, Kirov Avenue,
tel.: (845-2) 74-94-95

Shurayts Aleksander Lazarevich,
Doctor of Sciences, General Director of
JSC «Gipronigas»
E-mail: Shurait@niigaz.ru

Homutov Anton Olegovich,
Director of Technical Regulation of
Giproniigaz PLC

Stock Company «Audit, Controlling, Consulting»

Russia, Saratov, tel. (8452) 74-94-74

Pikalov Alexander Anatolievich,
Postgraduate, Expert on supervision of Stock
Company «Audit, Controlling, Consulting»
E-mail: pikalov-181978@yandex.ru

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ И ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ГРУБОЙ И ТОНКОЙ ГАЗОВОЙ ОЧИСТКИ В ОДНОМ КОРПУСЕ

А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, А.О. Хомутов, А.А. Пикалов

Представлен вариант повышения газодинамической и тепловой эффективности путем размещения фильтрующих элементов грубой и тонкой очистки в одном корпусе двухступенчатых установок газовой очистки. Результаты работы позволяют значительно сократить размеры и металлоемкость двухступенчатых фильтрующих элементов, а также тепловую мощность на их обогрев.

Ключевые слова: газодинамическая и тепловая эффективность, размещение, фильтрующие элементы, грубая и тонкая очистка, единый корпус, двухступенчатая установка, природный газ, металлоемкость, тепловая мощность

GAS DYNAMIC AND THERMAL EFFICIENCY OF APPLICATION OF FILTER ELEMENTS OF COARSE AND FINE GAS CLEANING IN A SINGLE BODY

A.P. Usachev, A.L. Shurait, A.O. Khomutov, A.A. Pikalov

The article is devoted to the determination of gas-dynamic and thermal efficiency by placing coarse and fine filtering elements in one building of two-stage gas cleaning units. The results of the

work make it possible to significantly reduce the size and metal consumption of two-stage filter elements as well as the thermal power for heating them.

Keywords: gas-dynamic and thermal efficiency, placement, filter elements, coarse and fine cleaning, single body, two-stage installation, natural gas, metal consumption, thermal power

1. Актуальность повышения газодинамической и тепловой эффективности двухступенчатых установок газовой очистки

На сетях газораспределения, эксплуатируемых в макроклиматических районах с умеренным и холодным климатом на территории Российской Федерации, достаточно часто используются и применяются двухступенчатые цилиндрические установки (ДЦУ) очистки природного газа, которые составляют порядка 94 % от общего числа всех эксплуатируемых установок, устанавливаемых в пунктах редуцирования газа (ПРГ).

ДЦУ представляют собой два последовательно установленных фильтра сначала предварительной очистки (ГО), а затем, по ходу газа, – тонкой очистки (ТО). Каждый фильтр ДЦУ размещается в отдельном корпусе А и Б, которые представлены на рис. 1. Данные установки имеют большую металлоемкость и площадь ограждающих конструкций технологического помещения за счет расположения их в отдельных корпусах. Большая площадь ограждающих конструкций технологического помещения ПРГ приводит к дополнительным затратам на тепловую энергию для обогрева.

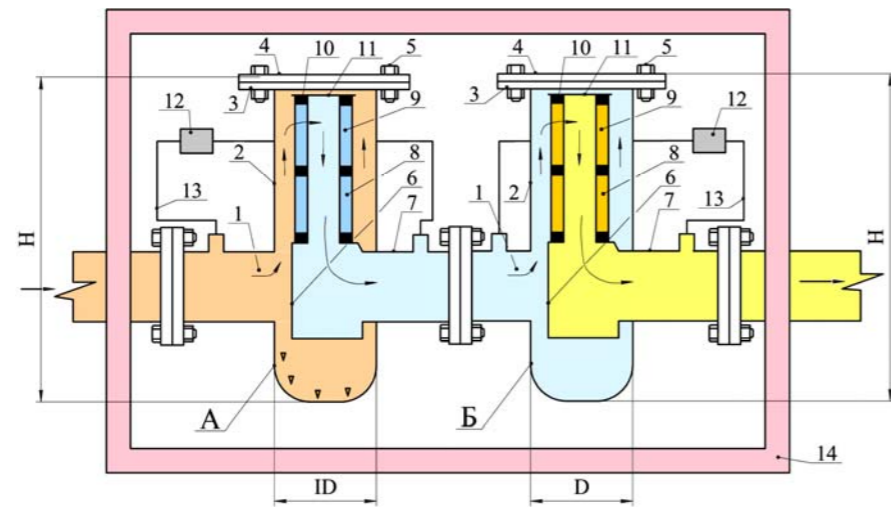


Рис. 1. Существующая ДЦУ, включающая фильтрующие элементы предварительной и тонкой очистки газа в отдельных корпусах А и Б и размещаемая в обогреваемом помещении:

- 1 – входной патрубок фильтров; 2 – корпус; 3 – фланец; 4 – крышка корпуса;
5 – соединения болтовые; 6 – стакан; 7 – выходной патрубок фильтров; 8, 9 – цилиндрические фильтрующие элементы; 10 – уплотнительные прокладки; 11 – крышка цилиндрических фильтрующих элементов; 12 – дифманометр (преобразователь перепада давления);
13 – импульсная трубка; 14 – наружные теплоизолированные ограждения

Системы обогрева предназначены для предотвращения снижения температуры в помещении ПРГ ниже $+5^{\circ}\text{C}$ и, соответственно, образования кристаллогидратных и ледяных закупорок в газопроводах и импульсных трубках 13 (см. рис. 1), которые могут привести к нарушению работы как технологического оборудования, в том числе дифференциальных манометров 12, так и электроники (при ее наличии в ПРГ).

В связи с этим актуальной становится задача по разработке методов увеличения газодинамической и тепловой эффективности двухступенчатых установок газовой очистки.

2. Повышение газодинамической эффективности двухступенчатых установок газовой очистки за счет размещения фильтрующих элементов предварительной и тонкой очистки в одном корпусе

В современных двухступенчатых установках газовой очистки в качестве конструкции цилиндрических фильтрующих элементов применяются не плоские, а гофрированные конструкции фильтрующих элементов, эффективность и надежность которых была неоднократно доказана в исследованиях многих авторов.

Для повышения газодинамической эффективности функционирования газовых фильтров предварительной и тонкой очистки предлагается цилиндрические фильтрующие элементы (ЦФЭ) предварительной и тонкой очистки размещать в одном корпусе газовой ДЦУ [1, 2] (рис. 2) так, чтобы расстояние между этим фильтрующими элементами было минимальным δ_{\min} . В этом случае сетка ЦФЭ предварительной очистки в точках сближения с фильтрующим гофрированным элементом тонкой очистки не загрязняется более интенсивно по сравнению с участками, расположенными на больших расстояниях и, следовательно, отсутствует рост газодинамических потерь (потерь давления) и снижение пропускной способности в точках этого сближения [1]. При размещении в одном корпусе фильтрующих элементов предварительной и тонкой очистки отпадает необходимость в установке второго корпуса газового фильтра, тем самым снижается металлоемкость двухступенчатых установок газовой очистки.

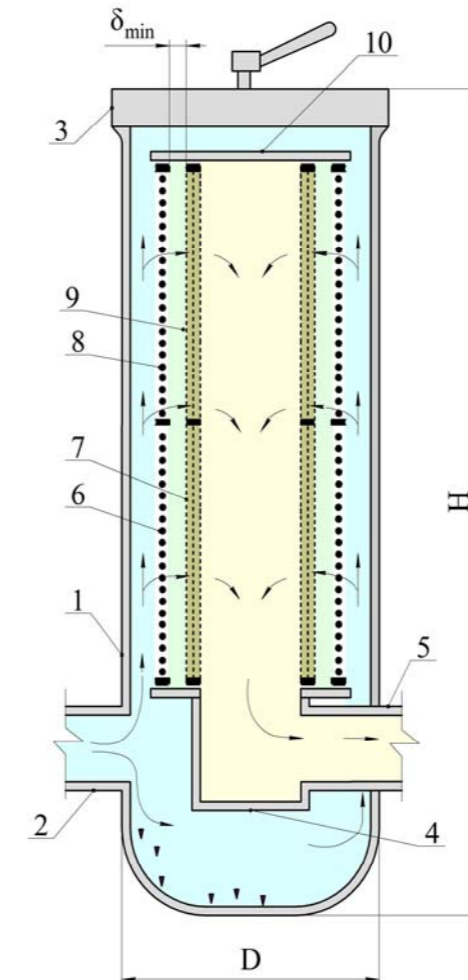


Рис. 2. Двухступенчатая установка с ЦФЭ предварительной и тонкой очистки, размещенными в одном корпусе:

- 1 – корпус; 2 – патрубок входной; 3 – крышка корпуса 1; 4 – стакан; 5 – патрубок выходной;
6, 8 – ЦФЭ ГО, установленные вертикально; 7, 9 – ЦФЭ ТО, установленные вертикально;
10 – крышка ЦФЭ ГО и ЦФЭ ТО

Согласно этому условию установленные ЦФЭ тонкой очистки 7 и 9 располагаются на расстоянии δ_{\min} от ЦФЭ предварительной очистки 6 и 8, исключая их касание (см. рис. 2).

В случаях если имеют место сближения или соприкосновения отдельных точек ЦФЭ предварительной и тонкой очистки, происходит снижение пропускной способности ЦФЭ предварительной очистки.

Проведем детальный анализ этих случаев для конкретных примеров при различных значениях δ при условии, что ЦФЭ предварительной очистки изготовлены из металлической сетки с размером ячейки в свету 0,2 мм, а ЦФЭ тонкой очистки – с размером ячейки в свету, находящимся в диапазоне от 0,2 до 0,04 мм, с пропуском через них примесей размером менее 0,2 мм, но более 0,04 мм.

А. При расстоянии между сетками предварительной и тонкой очистки:

$$\delta = 0 \quad (1)$$

происходит соприкосновение сеток грубой и тонкой ступеней очистки (см. рис. 2), при этом фильтрующий материал тонкой ступени перекрывает проходное сечение ячеек предварительной ступени очистки. Примеси размерами меньше 0,2 мм, проходя через ячейки фильтрующей сетки предварительной очистки, сталкиваются с фильтрующим материалом тонкой очистки, имеющим размеры ячеек в свету меньше 0,2 мм, но более 0,04 мм, останавливаются, а затем осыпаются. В результате возникает засорение ячеек предварительной очистки твердыми примесями и, следовательно, снижается их пропускная способность.

Б. При фактическом расстоянии δ между ЦФЭ предварительной и тонкой очисткой больше нуля, но менее δ_{\min} (см. рис. 2)

$$0 \leq \delta \leq \delta_{\min}. \quad (2)$$

Все так же продолжает оказывать существенное влияние на засорение фильтрующих сеток предварительной очистки близко расположенный с внутренней стороны фильтрующий материал тонкой ступени очистки. Кроме этого, из-за плюсовых отклонений $+\Delta\delta_r$ от цилиндрической формы у ступени тонкой очистки и минусовых отклонений $-\Delta\delta_{rp}$ от цилиндрической формы у ступени предварительной очистки, вызванных овалностью ЦФЭ, всегда имеющей место при изготовлении, фильтрующие поверхности будут продолжать касаться друг друга. Здесь весьма вероятным является сценарий, когда место с отклонением $+\Delta\delta_r$ устанавливается напротив места ЦФЭ с отклонением $-\Delta\delta_{rp}$ предварительной очистки. На этих участках общее отклонение становится равным $+\Delta\delta_r + [-\Delta\delta_{rp}]$. В этом случае возникает более интенсивное засорение ячеек грубой очистки механическими примесями размером менее 0,2 мм и более 0,04 мм в местах таких соприкосновений, что также приводит к снижению пропускной способности.

В. Фактическое расстояние между ступенями предварительной и тонкой очистки составит (см. рис. 2)

$$\delta = \delta_{\min} + \Delta\delta_r + [-\Delta\delta_{rp}]. \quad (3)$$

Г. При расстоянии между ступенями предварительной и тонкой очистки с (см. рис. 2)

$$\delta > \delta_{\min} + \Delta\delta_r + [-\Delta\delta_{rp}]. \quad (4)$$

Будет увеличиваться диаметр фильтрующего элемента предварительной очистки, равный $D_{rp} = D_r + \delta$, что непременно приведет к увеличению диаметра корпуса фильтра и, соответственно, к увеличению металлоемкости, а значит, и себестоимости.

Таким образом, эффективное фактическое расстояние между ступенями предварительной и тонкой очистки должно определяться по формуле (3).

Для экспериментального определения минимально допустимого расстояния δ_{\min} , при котором ЦФЭ тонкой очистки перестанет влиять на засоряемость ЦФЭ предварительной очистки и, следовательно, на перепад давления при пропуске расчетного расхода природного газа, были проведены соответствующие эксперименты с целью

определения влияния степени засоренности ячеек ЦФЭ предварительной очистки на величину δ_{\min} . Корпус ДЦУ был выполнен из трубы внутренним диаметром $D=100$ мм, оснащен ЦФЭ грубой очистки внутренним диаметром 80 мм из сетки с размером ячейки 0,12 мм и установленным за ним по ходу рабочей среды поочередно рядом однотипных ЦФЭ тонкой очистки наружными диаметрами 79,8; 78,0; 76,0; 74,0; 72,0; 70,0; 68,8; 68,0; 66,0; 64,0; 62,0 мм из фильтрующего полотна, имеющего минимальный размер ячейки, равный 0,04 мм. В качестве рабочей среды использовался как незагрязненный воздух, так и воздух, содержащий максимальную концентрацию механических примесей $0,001 \text{ г/м}^3$, регламентируемую для природного газа согласно ГОСТ 5542-2014. Расход воздуха также принят максимальным и одинаковым для обоих случаев.

Результаты испытаний, представленные на рис. 3, показывают, что при увеличении расстояния δ между фильтрующими элементами предварительной и тонкой очистки до значения, равного $\delta_{\min.ч}=5,6$ мм на чистых сетках при степени засорения, равной нулю (кривая **а** на рис. 3), и $\delta_{\min.з}=8,4$ мм (кривая **б** на рис. 3), при максимально допустимой степени засорения, принимаемой в размере 70 % для ЦФЭ предварительной очистки и 65 % для ЦФЭ тонкой очистки, потери давления в ДЦУ (точки на пересечении кривых **а** и **б** с пунктирными линиями 1→2→3) становятся постоянными и не зависящими от дальнейшего увеличения δ .

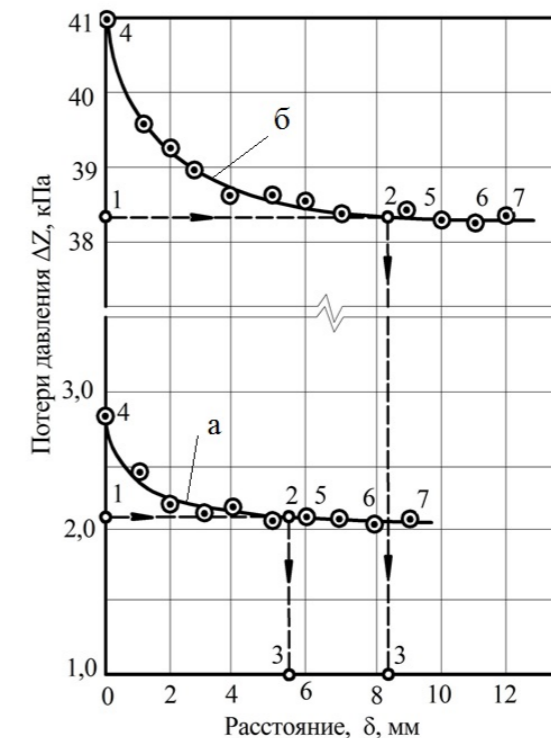


Рис. 3. Зависимость потери давления на ДЦУ от расстояния между фильтрами предварительной и тонкой очистки:

⊙ – экспериментальные значения;

— кривая, полученная путем аппроксимирования экспериментальных данных;

а – чистые сетки; б – загрязненные сетки

В качестве расчетной для δ принимается наибольшая ($\delta_{\min.з} > \delta_{\min.ч}$) величина $\delta_{\min.з}=8,4$ мм. Принятая величина свидетельствует о том, что при $\delta_{\min.з}=8,4$ мм и выше сопротивление сетки грубой очистки является таким же, как и у одиночно расположенной сетки, и газодинамическое влияние фильтра тонкой очистки уже не ощущается (см. экспериментальные точки 5, 6 и 7 при расстояниях 9–11 мм на рис. 3, кривая **б**).

3. Повышение тепловой эффективности двухступенчатых установок газовой очистки за счет размещения фильтрующих элементов предварительной и тонкой очистки в одном корпусе

Тепловая эффективность в обогреваемых промышленных установках газовой очистки достигается за счет разработки нового принципа размещения ЦФЭ тонкой очистки внутри ЦФЭ предварительной очистки на минимальном расстоянии δ в объеме единого корпуса, когда не уменьшается пропускная способность и обеспечивается экономия теплоты на обогрев ДЦУ (рис. 4А и 4Б). В соответствии с предлагаемым принципом была разработана конструкция ДЦУ, которая защищена патентом на полезную модель RU 19697431 от 23.03.2020 [3].

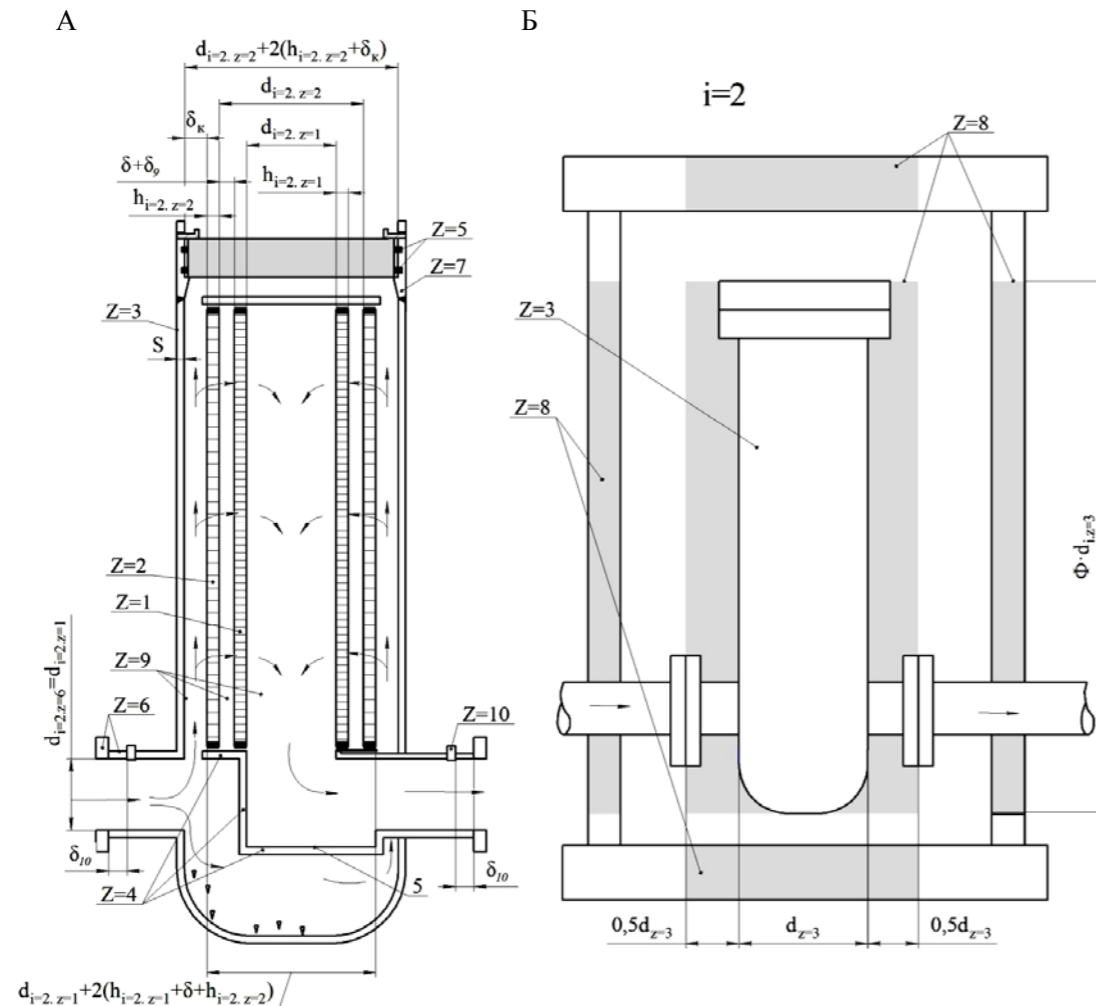


Рис. 4. А – структурная схема сравнения двухступенчатых установок газовой очистки;

Б – схема помещения для размещения сравниваемых

вариантов двухступенчатых установок грубой и тонкой очистки:

$z=1$ – ЦФЭ тонкой очистки; $z=2$ – ЦФЭ предварительной очистки; $z=3$ – корпус установки очистки; $z=4$ – стакан; $z=5$ – уплотнительные прокладки; $z=6$ – входной патрубок; $z=7$ – корпус быстроръемной крышки; $z=8$ – стеновые, напольные и потолочные строительные конструкции, необходимые для размещения двухступенчатой установки очистки газа; $z=9$ – датчики перепада давления для варианта $i=2$; $z=10$ – датчики перепада давления для варианта $i=1$;

$d_{i,z=3}$ – диаметр корпуса ДЦУ, м; Φ – оптимальное соотношение высоты к диаметру корпуса ДЦУ

Часовой расход энергоносителя, полезно потребляемого для обогрева ДЦУ в существующем и предлагаемом вариантах, определялся как сумма теплопотерь через все строительные ограждения ДЦУ, через четыре вертикальных наружных ограждения, а также напольное и потолочное перекрытия:

$$Q_{i,z=8}(d_{i,z=1}) = \left\{ \begin{aligned} & \frac{(t_b - t_{c.o.})(1 + \beta) \cdot n_{i,z=8} \cdot 2\Phi[(2d_{i,z=1} + \\ & + 2(h_{i,z=1} + \delta + \delta_9 + h_{i,z=2} + \delta_K + S + 2\delta_{10})] \cdot \\ & + 2[(d_{i,z=1} + 2(h_{i,z=1} + \delta + \delta_9 + h_{i,z=2} + \delta_K + S + 2\delta_{10})) + \\ & + 2\Phi[(d_{i,z=1} + 2(h_{i,z=1} + \delta + \delta_9 + h_{i,z=2} + \delta_K + S))] \cdot \\ & \cdot 2[(d_{i,z=1} + 2(h_{i,z=1} + \delta + \delta_9 + h_{i,z=2} + \delta_K + S))] + 4[(2d_{i,z=1} + \\ & + 2(h_{i,z=1} + \delta + \delta_9 + h_{i,z=2} + \delta_K + S)) + 2\delta_{10}] \cdot [d_{i,z=1} + \\ & + 2(h_{i,z=1} + \delta + \delta_9 + h_{i,z=2} + \delta_K + S)] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где t_b – температура воздуха в помещении для размещения ДЦУ, $^{\circ}\text{C}$; $t_{c.o.}$ – средняя температура наружного воздуха во временном интервале с температурой, ниже и равной нулю, $^{\circ}\text{C}$; β – значение суммарного коэффициента, учитывающего ряд надбавок: на стороны света, на инфильтрацию наружного воздуха через неплотности в наружных ограждающих конструкциях, на примыкающие к углам здания наружные ограждения, на поток холодного воздуха при открывании дверей, д.е.; $n_{i,z=8}$ – количество установок очистки природного газа; $R_{i,z=8}$ – средняя величина сопротивления теплопередаче вертикальных, напольных и потолочных ограждений помещения; находят по известным: типу ограждения; перепаду температур ($t_b - t_{c.o.}$), периоду времени с температурой, ниже и равной нулю; $S_{i,z=8}$ – средняя толщина вертикальных, напольных и потолочных ограждений помещения, м; $F_{i,z=8}(d_{i,z=1})$ – площадь вертикальных, напольных и потолочных ограждений помещения, необходимых для размещения i -го варианта двухступенчатой установки очистки, m^2 ; Φ – отношение высоты корпуса ДЦУ к ее диаметру; принимается равным 3,5.

Годовая экономия энергоносителя, полезно потребляемого для обогрева, при использовании предлагаемого варианта при установке фильтрующих элементов предварительной и тонкой очистки в одном корпусе, а не в двух отдельных корпусах, по результатам проведенных расчетов численным методом по формуле (5) составляет 75 %.

С целью экспериментального подтверждения достоверности расчетной формулы (5) проведены исследования на опытно-промышленном образце установки очистки газа в научно-производственном центре АО «ГипроиниГаз», г. Саратов. Опыты проводились для четырех значений температур воздуха в помещении t_b , равных: плюс 5,0; плюс 10,0; плюс 15,0 и плюс 20,0 $^{\circ}\text{C}$. Температуры воздуха внутри помещения t_b и соответствующие им температуры наружного воздуха $t_{c.o.}$ измерялись термометрами четыре раза для каждого из значений температур t_b и $t_{c.o.}$

Результаты расчетов по определению теоретических значений тепловых потерь помещения для вариантов $i=1$ и $i=2$ по формуле (5) в зависимости от температуры воздуха внутри помещения t_b приведены на графике в виде сплошных линий (рис. 5). Экспериментальные замеры согласно принятой надежности $\alpha=0,9$ взяты как среднее значение по четырем измерениям ($n=4$).

Среднее расхождение теоретических и экспериментальных данных для заданной надежности $\alpha=0,9$ и числа произведенных измерений $n=4$ составило 14,6 %, что позволяет рекомендовать формулу (5) к применению на практике при разработке конструкций газовых фильтров.

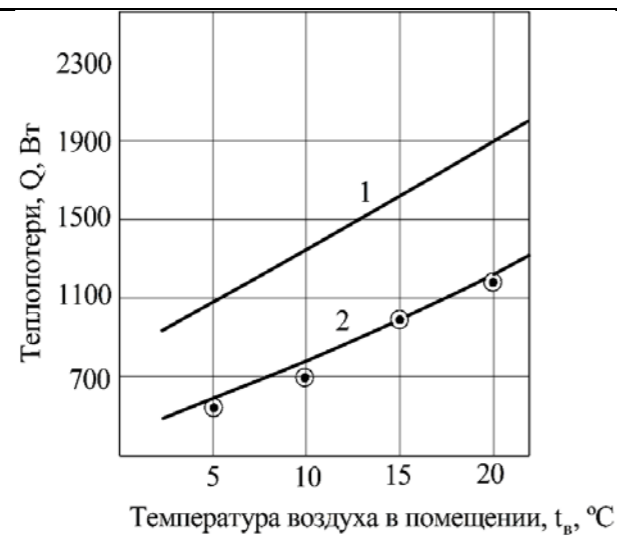


Рис. 5. Тепловые потери, определенные по формуле (5), в зависимости от значений температур воздуха в помещении:

- 1 – существующий вариант $i=1$ из двух фильтров предварительной и тонкой очистки, с последовательно установленными фильтрами один за другим; 2 – предлагаемый вариант $i=2$ с фильтрующими элементами предварительной и тонкой очистки, установленными в одном корпусе ДЦУ коаксиально один внутри другого;
 ○ – экспериментальные значения; — — — — — теоретические кривые

Заключение

1. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден новый принцип компоновки во внутреннем объеме одной газоочистной установки фильтрующих элементов предварительной и тонкой очистки, обеспечивающий необходимую пропускную способность при требуемом качестве очистки газа.
2. Разработан метод экономии теплоты в промышленных установках газовой очистки, располагаемых в отапливаемых помещениях, на основе сокращения площади отапливаемого помещения за счет размещения фильтрующих цилиндрических элементов предварительной и тонкой газовой очистки внутри одного корпуса установки очистки (патент RU 196974 U1 от 23.03.2020 г.), что позволяет сократить расход теплоты на обогрев в 1,74 раза.
3. Согласно патентам RU 196974U1 от 23.03.2020 и RU 165142U1 от 19.01.2016 по конструкторской документации и техническим условиям ТУ 4859-080-03321549-2018 был изготовлен опытно-промышленный образец производительностью 500 Вт/ч, который после испытаний был внедрен для обогрева установки очистки газа производства АО «Гипрониигаз», г. Саратов, с интегральным экономическим эффектом 1100,0 тыс. рублей в ценах 2020 г.

Список литературы

1. Устройство для очистки от твердых частиц природного газа высокого давления: патент на полезную модель 174446, Российская Федерация, МПК B01D 46/24 / Шурайц А.Л., Усачев А.П., Хомутов А.О. Рулев А.В.; заявитель и патентообладатель АО «Головной научно-исследовательский и проектный институт по распределению и использованию газа (АО Гипрониигаз)». – No 2017111708; заявл. 06.04.17; опубл. 13.10.17, Бюл. No 29. – 4 с.
2. Khomutov, A.O. Method description for arranging coarse and fine gas purification filtering cartridges within one device / A.P. Usachev, A.V. Rulev, A.L. Shurayts, A.O. Khomutov// Oil and Gas Engineering (OGE-2018). 2017. AIP Conference Procedia. – P. 03001–1 – 03001–7.
3. Патент на полезную модель RU 196974U1. Устройство для двухступенчатой очистки от твердых частиц природного газа высокого давления / Усачев А.П., Шурайц

А. Л. Рулев А.В., Бирюков А.В., Пикалов А.А. 23.03.2020. Заявка № 2019132265 от 11.10.2019.

4. Патент на полезную модель № RU165142U1. Узел перекрытия люка газового оборудования высокого давления / Шурайц А.Л., Усачев А.П., Пикалов А.А., Усуев З.М. Зарегистрирован 15.09.2016 г., с приоритетом от 19.01.2016. Заявка № 2019132265 от 11.10.2019.

References

1. Device for cleaning high pressure natural gas solid particles: utility model patent 174446, Russian Federation, IPC B01D 46/24 / Shurayts A.L., Usachev A.P., Khomutov A.O. Rulev A.V.; applicant and patentee of JSC Leading Research and Design Institute for the Distribution and Use of Gas (JSC Giproniigaz). – No. 2017111708; declared 04/06/17; publ. 13.10.17, Bul. No 29. – 4 p.
2. Khomutov, A.O. Method description for arranging coarse and fine gas purification filtering cartridges within one device / A.P. Usachev, A.V. Rulev, A.L. Shurayts, A.O. Khomutov// Oil and Gas Engineering (OGE-2018). 2017. AIP Conference Procedia. – P. 03001–1 – 03001–7.
3. Patent for utility model RU 196974U1. Device for two-stage purification from solid particles of natural gas of high pressure / Usachev A.P., Shurayts A.L. Rulev A.V., Biryukov A.V., Pikalov A.A. 03/23/2020. Application No. 2019132265 dated 11.10.2019.
4. Patent for utility model No. RU165142U1. High pressure gas equipment hatch block / Shurayts A.L., Usachev A.P., Pikalov A.A., Usuev Z.M. Registered on September 15, 2016, with a priority of January 19, 2016. Application No. 2019132265 dated 11.10.2019.

УДК 66.071.6

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

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Лебединский Константин Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Транспортные машины»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

Андреев Виктор Сергеевич,
студент

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

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,
tel.: (8412) 56-35-11;
факс: (8421) 56-51-22

Lebedinskiy Konstantin Valerevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
department «Transport Machines»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

Andreev Viktor Sergeevich,
Student

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ ЗА СЧЕТ УМЕНЬШЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ АППАРАТОВ

С.Ю. Андреев, К.В. Лебединский, В.С. Андреев

Приведены результаты теоретических исследований путей повышения эффективности процесса массообмена при разделении газовых смесей в поле действия центробежных сил. Получены математические зависимости, позволяющие определять величину коэффициента разделения кислорода в воздухе под действием поля центробежных сил K_r и величину удельной объемной производительности центробежного аппарата по кислороду воздуха q_w , кг/(м³·с). Показано, что уменьшение диаметра аппарата, создающего поле действия центробежных сил до $d_0=0,4 \cdot 10^{-3}$ м, позволяет обеспечить величину критерия Фруда $Fr=149000$ при сохранении ламинарного режима вращательно-поступательного движения газовой смеси и получить концентрацию кислорода в газовой смеси в пристеночной области камеры сепарации на уровне $C_k=1,33$ кг/м³.

Ключевые слова: критерий Фруда; критерий Рейнольдса, центробежный аппарат, коэффициент разделения, удельная объемная производительность, процесс массопередачи

NEW TECHNOLOGY FOR INTENSIFYING THE PROCESS OF SEPARATION OF GAS MIXTURES IN A CENTRIFUGAL FIELD BY REDUCING THE SIZE OF CENTRIFUGAL APPARATUSES

S.Yu. Andreev, K.V. Lebedinskiy, V.S. Andreev

The results of theoretical studies of ways to improve the efficiency of the mass transfer process in the separation of gas mixtures in the field of action of centrifugal forces are presented. Mathematical dependences are obtained that allow us to determine the value of the oxygen separation coefficient in the air under the action of the field of centrifugal forces of the K_r and the value of the specific volume capacity of the centrifugal device for air oxygen q_w (kg/m³s). It is shown that reducing the diameter of the device that creates the field of action of centrifugal forces to $d_0=0,4 \cdot 10^{-3}$ m allows us to provide

the value of the Froude criterion $Fr=149000$ while maintaining the laminar mode of rotational-translational motion of the gas mixture and to obtain the concentration of oxygen in the gas mixture in the wall area of the separation chamber at the level of $C_k=1.33$ kg/m³.

Keywords: Froude criterion; Reynolds criterion, centrifugal apparatus, separation coefficient, specific volume productivity, mass transfer process

Одним из технологических приемов, позволяющих существенно интенсифицировать работу аэротенков, является использование в системах пневматической аэрации технического кислорода или воздуха, обогащенного кислородом. Такие аэротенки получили название «окситенки». Использование технического кислорода в системе аэрации окситенка вместо атмосферного воздуха позволяет поддерживать концентрацию растворенного кислорода в иловой смеси аэрационного бассейна на уровне 5–9 мг/л. Концентрация растворенного кислорода в аэротенке, как правило, не превышает значения 1,5–3,0 мг/л. Опыт эксплуатации окситенков показал, что расход электроэнергии на систему аэрации в этих сооружениях в 1,3–1,7 раза меньше аналогичного показателя аэротенков. Прирост активного ила в окситенке на 20–30 % ниже, чем в аэротенке, что положительно сказывается на работе сооружений механического обезвоживания осадков.

Повышение концентрации кислорода в аэрационном бассейне окситенков обуславливает значительное понижение величины илового индекса, что делает возможным интенсифицирование работы илоотделителей. Как правило, в окситенках поддерживается доза активного ила 6–9 г/л вместо принятой дозы активного ила в аэрационном бассейне аэротенка 1,5–2,5 г/л. Повышение дозы активного ила и увеличение концентрации растворенного кислорода в иловой смеси в окситенках позволяют повысить их окислительную мощность в 5–6 раз по сравнению с аэротенками, снизить величину капитальных затрат в 1,5–2 раза, величину эксплуатационных затрат – в 2,5–3 раза [1].

Широкому внедрению окситенков в практику очистки сточных вод препятствует высокая стоимость технического кислорода. Окситенки, как правило, используются на сооружениях биологической очистки сточных вод промышленных предприятий, где имеется дешевый технический кислород, образующийся как отход производства при реализации основного технологического процесса (металлургические, химические и нефтехимические предприятия).

Получить дешевый технический кислород можно в процессе разделения воздуха на кислород и азот в центробежном поле. В 1937 году вышла статья Ю.Б. Харитона «К вопросу разделения газов центрифугированием», в которой приведены результаты аналитического исследования перспектив применения роторных центрифуг для разделения воздуха на азот и кислород. Харитон Ю.Б. подчеркивал близость к обратимому процессу механизма молекулярно-диффузионного разделения компонентов газовой смеси, имеющих различную плотность, в центробежном поле и сделал вывод о наличии теоретических предпосылок, свидетельствующих о высокой экономичности этого процесса.

В соответствии с данными, приведенными в статье, обратимый процесс получения 1 м³ чистого кислорода и 4 м³ чистого азота потребует при нормальных условиях лишь 0,09 кВт·ч энергии.

Более детальный анализ механизма разделения компонентов воздуха в роторных центрифугах показал нецелесообразность применения этой технологии ввиду крайне низкой скорости протекания процесса молекулярной диффузии в создаваемом центрифугами центробежном поле.

Упрощенная модель, описывающая работу роторной разделительной центрифуги, включает в себя следующие процессы.

Вращательное движение ротора посредством действия сил вязкого трения передается потоку газовой смеси, которая медленно движется вдоль оси центрифуги, в результате чего обеспечивается вращательно-поступательное движение потока. В объеме ротора устанавливается поле действия центробежных сил. Затем под действием поля центробежных сил начинается движение более тяжелых компонентов, чем сама смесь, к периферии ротора и более легких к его оси.

Действию центробежной силы противодействует сила тепловой молекулярной диффузии, вызванная тепловым движением молекул газовой смеси, стремящейся к равномерному распределению ее компонентов по всему объему. Наличие турбулентной диффузии в разделяемом объеме газовой смеси недопустимо, поскольку турбулентная диффузия более интенсивно перемешивает компоненты смеси. Таким образом, необходимо обеспечить в объеме ротора центрифуги ламинарный режим движения газовой смеси. Газовая смесь должна вращаться синхронно с вращением ротора центрифуги, медленно передвигаясь при этом вдоль его оси.

Основной технологической характеристикой, определяющей условия работы центрифуги, является фактор разделения (критерий Фруда), величина которого рассчитывается как отношение значения центробежной силы, действующей на газовую смесь $F_{ц}$, Н, к величине силы тяжести F_T , Н:

$$Fr = \frac{F_{ц}}{F_T} = \frac{V_T^2}{r_0 \cdot g} = \frac{\omega^2 \cdot r_0}{g}, \quad (1)$$

где V_T – окружная (тангенциальная) скорость вращения ротора, м/с; r_0 – радиус ротора, м; ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

В соответствии с моделью Коэна, газовая центрифуга работает вследствие действия принудительной газовой диффузии, вызванной градиентом давления газов, возникающего под действием центробежных сил, и ее основной технологической характеристикой является коэффициент разделения, определяемый по формуле, приведенной в работе [2]:

$$K_p = \frac{C_{гп}}{C_{г0}} = e^{\frac{(\mu_k - \mu_b) V_T^2}{2RT}}, \quad (2)$$

где $C_{гп}$ – концентрация отделяемого из газовой смеси (воздуха) газа (кислорода) на периферии ротора центрифуги (у его стенки), кг/м³; $C_{г0}$ – концентрация отделяемого газа на оси центрифуги (в первом приближении принимается $C_{г0} = C_{кв} = 0,278$ кг/м³); μ_k и μ_b – соответственно молекулярная масса кислорода ($\mu_k = 0,0320$ кг/моль) и газовой смеси (воздуха $\mu_b = 0,0288$ кг/моль); R – газовая постоянная ($R = 8,31$ Дж/(моль·К)); T – температура смеси (воздуха), К.

С учетом

$$V_T = \omega \cdot r_0, \text{ м/с}, \quad (3)$$

и

$$\omega^2 \cdot r_0 = Fr_{ц} \cdot g, \text{ м/с}^2, \quad (4)$$

формула (2) может быть записана в виде

$$K_p = e^{\frac{(\mu_k - \mu_b) \cdot \omega^2 \cdot r_0}{2RT}} = e^{\frac{(\mu_k - \mu_b) Fr_{ц} \cdot g \cdot r_0}{2RT}}. \quad (5)$$

Формула (5) справедлива для случая, когда времени нахождения газовой смеси в центробежном аппарате достаточно для того, чтобы молекулы отделяемого вещества продиффундировали к своему конечному распределению.

Харитонов Ю.Б. было получено уравнение для определения производительности роторной центрифуги:

$$q_m = \frac{2\pi l_{ц} V_T^2}{RT} \cdot \alpha_k \cdot C_{кв} \cdot (\mu_k - \mu_b), \text{ кг/с}, \quad (6)$$

где $l_{ц}$ – длина ротора центрифуги, м; α_k – значение коэффициента молекулярной диффузии кислорода воздуха, обусловленной наличием градиента концентрации

отделяемого газа ($\alpha_k = 1,8 \cdot 10^{-5}$ м²/с); $C_{кв}$ – концентрация кислорода в воздухе ($C_{кв} = 0,278$ кг/м³).

Поделив уравнение (6) на величину объема роторной центрифуги

$$W_{ц} = \pi r_0^2 \cdot l_{ц}, \text{ м}^3, \quad (7)$$

производительность центрифуги (удельная объемная производительность центрифуги по кислороду воздуха q_w , кг/(м³·с)) можем выразить в единицах концентрации dC/dt :

$$\begin{aligned} q_w &= \frac{dC}{dt} = \frac{q_m}{W_{ц}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot l_{ц} \cdot V_T^2}{R \cdot T \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot l_{ц}} \cdot \alpha_k \cdot C_{кв} \cdot (\mu_k - \mu_b) = \\ &= \frac{2V_T^2}{R \cdot T \cdot r_0^2} \cdot \alpha_k \cdot C_{кв} \cdot (\mu_k - \mu_b), \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{с)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Проанализировав формулы (6) и (8), можно сделать следующие выводы: величина производительности роторной центрифуги по отделяемому газу q_m (кг/с) не зависит от величины радиуса центрифуги r_0 (м), а определяется длиной ее ротора $l_{ц}$, величина удельной объемной производительности центрифуги q_w (кг/(м³·с)) не зависит от длины ротора $l_{ц}$, а определяется величиной квадрата радиуса центрифуги r_0^2 (м²).

В работе [2] приводятся следующие технологические характеристики роторной центрифуги DMS-1, используемой для разделения газовой смеси, запущенной в эксплуатацию в США в марте 1964 года: длина ротора $l_{ц} = 1,5$ м, радиус ротора $r_0 = 0,06$ м, величина тангенциальной скорости вращения ротора $V_T = 350$ м/с.

В соответствии с формулой (1) центрифуга DMS-1 может разделять газовую смесь при величине критерия Фруда

$$Fr = \frac{350^2}{0,06 \cdot 9,8} = 210481 \approx 210000. \quad (9)$$

При использовании роторной центрифуги DMS-1 для разделения воздуха на кислород и азот при температуре $T = 293$ К в соответствии с формулами (2), (6) и (8) она будет иметь следующие технологические характеристики:

$$K_p = e^{\frac{(0,0320 - 0,0288) \cdot 350^2}{2 \cdot 8,31 \cdot 293}} = 1,08, \quad (10)$$

$$q_m = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 350^2}{8,31 \cdot 293} \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} \cdot 0,278 \cdot (0,0320 - 0,0288) = 0,8 \cdot 10^{-5}, \text{ кг/с}, \quad (11)$$

$$q_w = \frac{2 \cdot 350^2}{8,31 \cdot 293 \cdot 0,06^2} \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} \cdot 0,278 \cdot (0,0320 - 0,0288) = 45 \cdot 10^{-5}, \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{с)}. \quad (12)$$

В формуле (5) величина коэффициента разделения кислорода K_p зависит от произведения критерия Фруда Fr на величину радиуса ротора центрифуги r_0 . В соответствии с формулой (5) при достаточно большом радиусе ротора центрифуги r_0 малая величина центробежной силы $F_{ц}$ в формуле (1) обеспечит требуемое значение коэффициента разделения K_p , что противоречит физическим основам процесса сепарации газовых смесей в поле действия центробежных сил.

Данное противоречие может быть устранено, если в формулу (5) вместо значения радиуса ротора центрифуги r_0 подставить некоторый линейный размер r , величина которого не зависит от значения r_0 .

$$K_p = e^{\frac{(\mu_k - \mu_b) Fr_{ц} \cdot g \cdot r}{2RT}} \quad (13)$$

Величину размера r и его физическую сущность можно определить, проведя динамический анализ процесса разделения газовой смеси в поле действия центробежных сил.

Движущей силой процесса разделения в объеме равном одному молю разделяемой газовой смеси W_μ является центробежная сила $F_{ц}$

$$F_{ц} = (\mu_k - \mu_b) \cdot \omega^2 \cdot r_0, \text{ Н/моль.} \quad (14)$$

Допустим, что газовая смесь объемом W_μ (м^3), находящаяся в цилиндре, имеющем высоту, равную длине ротора $l_{ц}$, и радиус r_μ , оказывает давление теплового движения молекул газовой смеси на вертикальной стенке этого цилиндра с силой F_d (Н)

$$F_d = P \cdot 2\pi \cdot r_\mu \cdot l_{ц}, \text{ Н/моль,} \quad (15)$$

где P – давление газовой смеси объемом W_μ в рассматриваемом цилиндре, Па.

Величину силы давления газовой смеси на вертикальные стенки рассматриваемого цилиндра F_d можно определить из уравнения (15) и уравнения Менделеева – Клапейрона

$$R \cdot T = P \cdot W_\mu, \text{ Дж/моль,} \quad (16)$$

$$F_d = \frac{R \cdot T}{W_\mu} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_\mu \cdot l_{ц} = \frac{R \cdot T}{\pi \cdot r_\mu^2 \cdot l_{ц}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_\mu \cdot l_{ц} = \frac{2 \cdot R \cdot T}{r_\mu}, \text{ Н/моль.} \quad (17)$$

Отношение центробежной силы $F_{ц}$ (14), действующей на объем газовой смеси W_μ в роторе центрифуги, к силе теплового давления газовой смеси F_d (17) будет иметь значение

$$\frac{F_{ц}}{F_d} = \frac{(\mu_k - \mu_b) \cdot \omega^2 \cdot r_0 \cdot r_\mu}{2 \cdot R \cdot T} = \frac{(\mu_k - \mu_b) \cdot Fr \cdot g \cdot r_\mu}{2 \cdot R \cdot T} \quad (18)$$

Анализ формул (5), (13) и (18) показывает, что формула (13) может быть записана в виде

$$K_p = e^{\bar{F}} = e^{\frac{(\mu_k - \mu_b) \cdot \omega^2 \cdot r_0 \cdot r_\mu}{2 \cdot R \cdot T}} = e^{\frac{(\mu_k - \mu_b) \cdot Fr \cdot g \cdot r_\mu}{2 \cdot R \cdot T}} \quad (19)$$

Таким образом, показатель степени в формуле (19) является отношением величины центробежной силы $F_{ц}$ к величине силы давления молекул газа в объеме один моль на стенки цилиндра высотой, равной длине ротора центрифуги F_d (в терминах динамики), или отношением величины работы, совершаемой центробежной силой $F_{ц}$ при перемещении разности удельных масс $\Delta\mu_k$ на расстояние $\frac{r_\mu}{2}$, к величине удельной энергии давления одного моля газовой смеси RT при температуре T , К (в терминах термодинамики).

Объем одного моля газа при температуре T , К, может быть определен по формуле

$$W_{\mu_0} = W_{\mu_0} \cdot \frac{T}{273}, \text{ м}^3/\text{моль,} \quad (20)$$

где $W_{\mu_0} = 22,4 \cdot 10^{-3}$, $\text{м}^3/\text{моль}$ – объём одного моля газа при температуре 0°C .

При температуре $T=293$ К и нормальном давлении один моль газовой смеси занимает объем

$$W_{\mu_0} = 22,4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{293}{273} = 0,024 \text{ м}^3. \quad (21)$$

При длине ротора центрифуги $l_{ц}=1,5$ м и $W_\mu=0,024$ м^3 радиус r_μ будет иметь величину

$$r_\mu = \sqrt{\frac{W_\mu}{\pi \cdot l_{ц}}} = \sqrt{\frac{0,024}{3,14 \cdot 1,5}} = 0,07 \text{ м.} \quad (22)$$

По аналогии с формулой (19) формулы (6) и (8) могут быть записаны в виде

$$q_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot l_{ц} \cdot Fr \cdot g \cdot r_\mu}{R \cdot T} \cdot \alpha_k \cdot C_{кв} \cdot (\mu_k - \mu_b), \text{ кг/с,} \quad (23)$$

$$q_w = \frac{2 \cdot Fr \cdot g \cdot r_\mu}{R \cdot T \cdot r_0^2} \cdot \alpha_k \cdot C_{кв} \cdot (\mu_k - \mu_b), \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}). \quad (24)$$

В соответствии с формулами (19), (23) и (24) роторная центрифуга DMS-1, используемая для разделения воздуха на азот и кислород, будет иметь следующие технологические характеристики:

$$K_p = e^{\frac{(0,032-0,0288) \cdot 21000 \cdot 9,8 \cdot 0,07}{2 \cdot 8,31 \cdot 293}} = 1,1, \quad (25)$$

$$q_m = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 21000 \cdot 9,8 \cdot 0,07}{8,31 \cdot 293} \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} \cdot 0,278 \cdot (0,032 - 0,0288) = 0,9 \cdot 10^{-5}, \text{ кг/с,} \quad (26)$$

$$q_w = \frac{2 \cdot 21000 \cdot 9,8 \cdot 0,07}{8,31 \cdot 293 \cdot (0,06)^2} \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} \cdot 0,278 \cdot (0,032 - 0,0288) = 53 \cdot 10^{-5}, \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}). \quad (27)$$

Относительная разница значений технологических характеристик роторной центрифуги DMS-1, вычисленных на формулам (2), (6), (8) и по формулам (19), (23), (24), составляет 1,8-13 %. Формулы (19), (23) и (24) удовлетворительно описывают процесс разделения воздуха на кислород и азот в роторной центрифуге DMS-1, поскольку величина радиуса ротора центрифуги DMS-1 $r_0=0,06$ м незначительно отличается от значения линейного размера $r_\mu=0,07$ м при длине ротора $l_{ц}=1,5$ м.

Расчетная продолжительность пребывания газовой смеси в роторной центрифуге DMS-1 $T_{ц}$ (с) может быть определена из условия

$$\Delta C_{кв} = T_{ц} \cdot q_w = C_{кв} (K_p - 1), \text{ кг/м}^3, \quad (28)$$

откуда

$$T_{ц} = \frac{C_{кв} \cdot (K_p - 1)}{q_w} = \frac{0,278 \cdot (1,1 - 1)}{53 \cdot 10^{-5}} = 52 \text{ с.} \quad (29)$$

Величина осевой скорости V_0 , м/с, движения газовой смеси в роторе центрифуги, обеспечивающая продолжительность ее обработки в центробежном поле $T_{ц}$ (с), будет иметь значение

$$V_0 = \frac{l_{ц}}{T_{ц}} = \frac{1,5}{54} = 0,028 \text{ м/с.} \quad (30)$$

Величина критерия Рейнольдса в роторе центрифуги

$$Re = \frac{V_o \cdot 2 \cdot r_o}{\gamma_b} = \frac{0,028 \cdot 2 \cdot 0,06}{15,1 \cdot 10^{-6}} = 223, \quad (31)$$

где $\gamma_b = 15,1 \cdot 10^{-6}$ м/с – величина коэффициента кинематической вязкости воздуха при $t = 20$ °С.

Поскольку $Re \leq Re_k = 2200$, в роторе центрифуги будет обеспечиваться ламинарный режим течения газовой смеси.

Для получения чистого кислорода, имеющего плотность $\rho_k = 1,33$ кг/м³, в пристеночном слое ротора центрифуги аппарат должен иметь величину коэффициента разделения:

$$K_{p\max} = \frac{\rho_k}{C_{кв}} = \frac{1,33}{0,278} = 4,8. \quad (32)$$

При величине коэффициента разделения $K_p = 1,1$ концентрация кислорода в газовой смеси в пристеночном слое ротора центрифуги составит:

$$C_{гп} = C_{кв} \cdot K_p = 0,278 \cdot 1,1 = 0,31 \text{ кг/м}^3. \quad (33)$$

Для получения чистого кислорода необходимо последовательно соединить $n=17$ ступеней центрифуги DMS-1, что нецелесообразно по экономическим соображениям.

Анализ формулы (24) показывает: интенсифицировать процесс разделения газовой смеси можно за счет уменьшения величины радиуса центробежного аппарата r_0 . При некоторых значениях радиуса r_0 и средней величине осевой скорости движения газовой смеси V_0 будет соблюдаться ламинарный режим течения в стволе аппарата.

Обеспечение ламинарного режима течения газовой смеси в стволе позволит использовать неподвижную камеру сепарации, а вращательно- поступательное движение создавать за счет тангенциальной подачи газовой смеси, что значительно упростит и удешевит конструкцию центробежного аппарата.

Для центробежного аппарата с тангенциальной подачей газовой смеси, имеющего величину радиуса $r_0 = 0,0005$ м ($d_0 = 0,001$ м), среднюю величину осевой скорости движения газовой смеси $V_0 = 32$ м/с, величину тангенциальной скорости движения газовой смеси $V_T = \frac{V_0}{\sqrt{2}} = 23$ м/с и длину ствола камеры сепарации $l_{ц} = 0,12$ м, значение критерия Рейнольдса составит:

$$Re = \frac{V_0 \cdot 2 \cdot r_0}{\gamma_b} = \frac{32 \cdot 2 \cdot 0,0005}{15,1 \cdot 10^{-6}} = 2119 < Re_k. \quad (34)$$

Величина критерия Фруда будет иметь значение

$$Fr = \frac{V_T^2}{r_0 \cdot g} = \frac{23^2}{0,0005 \cdot 9,8} = 107959 \approx 108000. \quad (35)$$

Размер радиуса r_{μ}

$$r_{\mu} = \sqrt{\frac{W_{\mu}}{\pi \cdot l_{ц}}} = \sqrt{\frac{0,024}{3,14 \cdot 0,12}} = 0,25 \text{ м}. \quad (36)$$

Величина коэффициента разделения

$$K_p = e^{\frac{(\mu_k - \mu_b) \cdot Fr \cdot g \cdot r_{\mu}}{2RT}} = e^{\frac{(0,032 - 0,0288) \cdot 108000 \cdot 9,8 \cdot 0,25}{2 \cdot 8,31 \cdot 293}} = 1,19. \quad (37)$$

Для получения чистого кислорода $\rho_k = 1,33$ кг/м³ необходимо последовательно соединить $n=9$ ступеней центробежных аппаратов радиусом $r_0 = 0,0005$ м.

Удельная объемная производительность центробежного аппарата в этом случае составит:

$$q_w = \frac{2 \cdot Fr \cdot g}{RT} \cdot \frac{r_{\mu}}{r_0^2} \cdot \alpha_k \cdot C_{кв} \cdot (\mu_k - \mu_b) = \frac{2 \cdot 108000 \cdot 9,8}{8,31 \cdot 293} \cdot \frac{0,25}{(0,0005)^2} \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} \cdot 0,278 \cdot (0,032 - 0,0288) = 14 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{с)}. \quad (38)$$

Расчетная длина камеры сепарации

$$l_k = \frac{V_o \cdot C_{кв} \cdot (K_p - 1)}{q_w} = \frac{32 \cdot 0,278 \cdot (1,19 - 1)}{14} = 0,12 \text{ м}. \quad (39)$$

Продолжительность процесса разделения воздуха на кислород и азот

$$T = \frac{l_k}{V_o} = \frac{C_{кв} \cdot (K_p - 1)}{q_w} = \frac{0,278 \cdot (1,19 - 1)}{14} = 0,0038 \text{ с}. \quad (40)$$

Технические характеристики аппаратов, используемых для разделения воздуха на кислород и азот в поле действия центробежных сил, представлены в таблице.

Технические характеристики аппаратов, используемых для разделения воздуха на кислород и азот в поле действия центробежных сил

Диаметр камеры сепарации $d_0 = 2r_0 \cdot 10^{-3}$ м	120	1	0,8	0,6	0,4
Критерий Фруда Fr	210000	108000	186000	417000	1490000
Тангенциальная скорость газовой смеси в пристеночной области камеры сепарации V_T , м/с	350	23	27	35	54
Коэффициент разделения газовой смеси K_p	1,10	1,19	1,35	2,18	4,80
Необходимое число последовательно работающих аппаратов для получения чистого кислорода n (шт)	17	9	6	2	1
Удельная объемная производительность аппарата по кислороду воздуха q_w , кг/(м ³ ·с)	0,0005	14	37	173	1872
Продолжительность процесса разделения воздуха на кислород и азот T , с	52	0,0038	0,0026	0,0019	0,0005
Длина камеры сепарации l_k , 10 ⁻³ мм	1500	120	120	90	50

Представленные в таблице данные показывают, что центробежный аппарат с неподвижной камерой сепарации, имеющей диаметр $d_0 = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м, может обеспечить величину критерия Фруда $Fr = 1490000$ при сохранении ламинарного режима вращательно-поступательного движения газовой смеси, в результате чего концентрация кислорода в газовой смеси в пристеночной области камеры сепарации достигнет максимального значения $C_{гп} = \rho_k = 1,33$ кг/м³. Новый технологический прием интенсификации процесса разделения газовых смесей в высокоградиентном центробежном поле за счет использования принципов вихревой микрофлюидики позволит существенно снизить себестоимость газообразного кислорода, получаемого из воздуха, и расширить

возможность его использования в пневматических системах аэрации станций биологической очистки сточных вод.

Список литературы

1. Биологическая очистка сточных вод нефтеперерабатывающих заводов / С.В. Степанов, А.К. Стрелков, В.Н. Швецов. – М.: АСВ, 2017. – 214 с.
2. Scott, Kemp R. Gas centrifuge theory and Development / Kemp R. Scott. // Science and Global security. – 2009. – Vol. 17. – P 1–19.

References

1. Biological treatment of wastewater from oil refineries / S.V. Stepanov, A.K. Strelkov, V.N. Shvetsov. – M.: ASV, 2017. – 214 p.
2. Scott, Kemp R. Gas centrifuge theory and Development / Kemp R. Scott. // Science and Global security. – 2009. – Vol. 17. – P 1–19.

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

Сафронов Максим Александрович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Водоснабжение, водоотведение
и гидротехника»
E-mail: mksafronov@rambler.ru

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

*Пензенский государственный
технологический университет*
Россия, 440039, г. Пенза,
проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а / 11,
тел. (8412) 49-54-41; факс (8412) 49-60-86

Яхкин Михаил Ильич,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник отдела
научных исследований
E-mail: yah@sura.ru

*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

Safronov Maxim Aleksandrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Water Supply, Sewerage and
Hydraulic Engineering»
E-mail: mksafronov@rambler.ru

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

Penza State Technological University
Russia, 440039, Penza,
1A / 11 Baidukova / Gagarin St.,
tel. (8412) 49-54-41; fax (8412) 49-60-86

Yakhkind Michael Il'ich,
Candidate of Sciences, Senior Researcher of
Scientific Research department
E-mail: yah@sura.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВСПЛЫВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВ В ДИНАМИЧЕСКИХ ВОДОВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРОЦЕССАХ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

С.Ю. Андреев, М.А. Сафронов, Н.Н. Ласьков, М.И. Яхкин

Приведены результаты теоретических исследований закономерностей всплывания воздушных пузырьков в водовоздушных смесях, используемых в технологических процессах очистки сточных вод. Показано, что размеры пузырька воздуха обуславливают возможность его всплывания в различных гидродинамических режимах. Получены математические зависимости, описывающие процессы всплывания пузырьков воздуха в различных режимах. Использование полученных зависимостей позволит оптимизировать процессы очистки сточных вод и сгущения их осадков.

Ключевые слова: пузырек воздуха, коэффициент дисперсности, дисперсный размер, режим всплывания, коэффициент гидравлического сопротивления, критерий Рейнольдса

MATHEMATICAL MODELING OF THE REGULARITIES OF BUBBLE POPPING IN DYNAMIC WATER-AIR MIXTURES USED IN FLOTATION WASTEWATER TREATMENT PROCESSES

S.Yu. Andreev, M.A. Safronov, N.N. Laskov, M.I. Yakhkind

The article presents the results of theoretical studies of the regularities of the rise of air bubbles in water-air mixtures used in technological processes of wastewater treatment. It is shown that the size of the air bubble determines the possibility of its floating in various hydrodynamic modes. The mathematical dependences describing the processes of air bubbles floating up in different modes are obtained. The use of the obtained dependencies will allow optimizing the processes of wastewater treatment and thickening of their sediments.

Keywords: air bubble, dispersion coefficient, dispersion size, floating mode, hydraulic resistance coefficient, Reynolds criterion

В настоящее время получили широкое распространение методы очистки сточных вод и сгущения осадков, предусматривающие использование технологических процессов флотации. Эффективность процесса флотации определяется размером, количеством и равномерностью распределения образующихся во флотационном объеме пузырьков воздуха. Оптимальными размерами пузырьков воздуха (величины их диаметра) в водовоздушной смеси, используемой при реализации метода пенной флотации, применяемого для отделения из водной среды дисперсных частиц, являются $d_n=0,04-0,1$ мм. При очистке сточных вод от растворенных поверхностно-активных веществ методом пенной сепарации могут быть использованы водовоздушные смеси, содержащие пузырьки воздуха диаметром более 2 мм.

Эффективность использования флотационных методов в процессах очистки сточных вод и сгущения их осадков не может быть обеспечена без объективной оценки свойств применяемых в них динамических двухфазовых систем «вода – воздух».

Основными технологическими показателями, характеризующими свойства динамической двухфазной системы «вода – воздух», формируемой в объеме флотатора, являются:

1) Коэффициент газонаполнения водовоздушной смеси φ

$$\varphi = \frac{W_r}{W_c} = \frac{W_r}{W_j + W_r} = \frac{H_c - H_{ж}}{H_c} = \frac{\Delta H}{H_c}, \quad (1)$$

где W_c , W_r , W_j – соответственно объем водовоздушной смеси; объем, занимаемый газовой фазой в водовоздушной смеси; объем, занимаемый жидкой фазой в водовоздушной смеси, m^3 ; $H_{ж}$, H_c , ΔH – соответственно высота слоя жидкости без подачи газа; высота водовоздушной смеси; повышение уровня водовоздушной смеси при подаче газовой фазы.

2) Удельный объем газовой фазы в водовоздушной смеси \bar{W}

$$\bar{W} = \frac{W_r}{W_j} = \frac{\varphi}{1 - \varphi}. \quad (2)$$

3) Средняя величина периода пребывания (обновления) газовой фазы во флотационном объеме T_r , с:

$$T_r = \frac{W_r}{Q_r} = \frac{W_j}{Q_r} \cdot \frac{\varphi}{1 - \varphi} = \frac{H_{ж} \cdot F_{\phi}}{F_{\phi} \cdot I} \bar{W} = \frac{H_{ж} \bar{W}}{I} = \frac{H_c}{v_n}, \quad (3)$$

где Q_r – расход газа, поступающего во флотационный объем, m^3/c ; $I = \frac{Q_r}{F_{\phi}}$ – скорость потока газа, m/c , проходящего через поперечное сечение флотационного объема

площадью F , m^2 ; $v_{нк}$ – средняя величина коллективной скорости всплывания пузырьков воздуха во флотационном объеме.

Величина коллективной скорости всплывания пузырьков воздуха в воде $v_{нк}$ отличается от величины средней скорости всплывания одиночного пузырька, имеющего средний диаметр d_n , в свободном объеме жидкости v_n . В.В. Кафаров рекомендует определять величину коллективной скорости всплывания пузырьков воздуха в воде в зависимости от величины коэффициента газонаполнения по формуле

$$v_{нк} = v_n \frac{1}{1 + 1,3\varphi^{0,333}}, \quad m/c. \quad (4)$$

Таким образом, определить основные свойства динамической двухфазной системы «вода – воздух», используемой во флотационном процессе, можно, проведя оценку режима всплывания одиночного пузырька воздуха в неограниченном объеме жидкости, установив при этом зависимость скорости всплывания v_n , m/c , от величины среднего диаметра пузырька воздуха d_n , m .

Режимы всплывания пузырька воздуха диаметром d_n в воде соответствуют режимам всплывания твердого шара диаметром $d_{ш}=d_n$, имеющего плотность ρ_r , kg/m^3 , равную плотности воздуха $\rho_b=1,2$ kg/m^3 [1, 2].

На рис. 1 представлены графики зависимости величины коэффициента гидравлического сопротивления ζ от числа Рейнольдса Re для твердого шара А и для воздушного пузырька В.

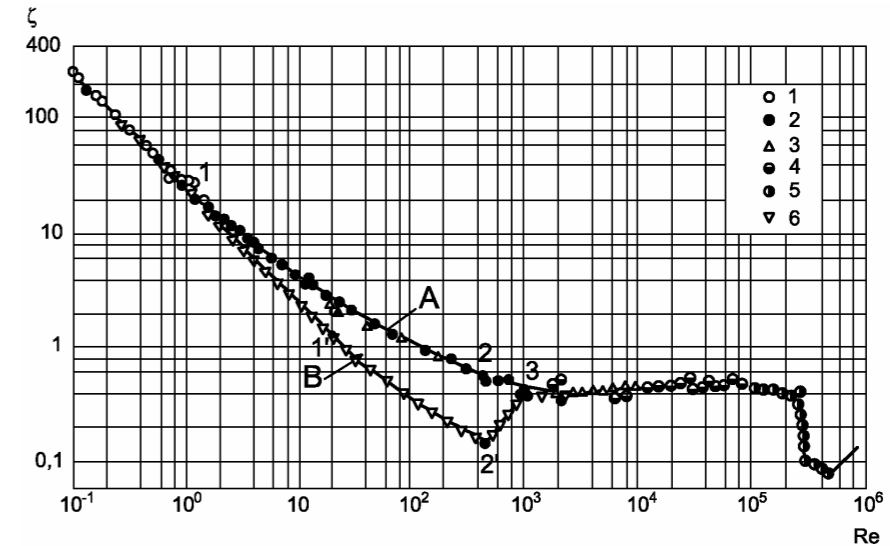


Рис. 1. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ζ от числа Рейнольдса Re :

А – для твердого шара, измерения:

1 – Шиллера-Шмиделя; 2 – Либстера; 3 – Аллена; 4,5 – Визельсбергера;

В – для воздушного пузырька: 6 – построен по данным Кутателадзе

На рис. 2 показан график зависимости скорости свободного всплывания пузырька воздуха в чистой воде v_n , m/c , в зависимости от величины его диаметра d_n , m , приведенный в работе (Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. М.: Энергия, 1976. 296 с.).

При всплывании пузырька воздуха в объеме воды можно выделить следующие режимы его движения:

1. Ламинарный режим всплывания пузырьков воздуха (область ползущего течения, вязкого обтекания, стоксовский режим всплывания).

Этот режим наблюдается при $Re \leq 1$ (графики левее граничной точки 1 на рис. 1 и 2). В рассматриваемой области пузырек воздуха сохраняет строго сферическую форму, всплывает в режиме, соответствующем режиму всплывания твердого шара, имеющего аналогичный диаметр и такую же плотность, и может рассматриваться как псевдотвердое шарообразное тело. Величина коэффициента гидравлического сопротивления

пузырька воздуха, всплывающего в этом режиме, линейно зависит от критерия Рейнольдса (график левее точки 1 на рис. 1) и может быть определена по формуле

$$\zeta = \frac{24}{Re}. \quad (5)$$

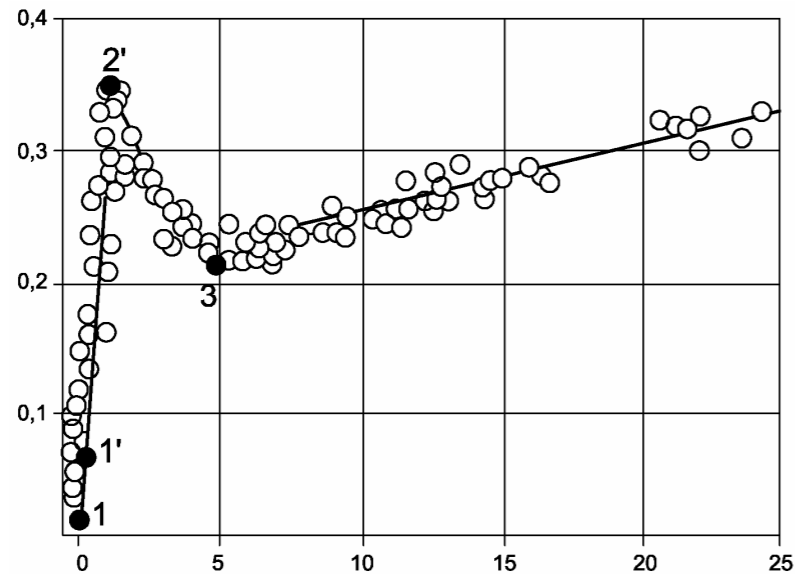


Рис. 2. Зависимость скорости свободного всплывания пузырька воздуха в чистой воде v_n от его диаметра d_n

Зависимость величины скорости всплывания пузырька v_n от его диаметра d_n в этом режиме описывается общеизвестной формулой Стокса.

$$v_n = \frac{1}{18} \frac{gd_n^2 (\rho - \rho_v)}{\nu \rho_v}, \text{ м/с}, \quad (6)$$

где $g=9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; ν – коэффициент кинематической вязкости воды, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ и ρ_v – соответственно плотность воды и плотность воздуха, кг/м^3 .

На верхней границе ламинарного режима всплывания пузырька воздуха величина критерия Рейнольдса имеет значение

$$Re = \frac{v_n \cdot d_n}{\nu} = 1. \quad (7)$$

Величина коэффициента ζ равна:

$$\zeta = \frac{24}{Re} = \frac{24}{1} = 24. \quad (8)$$

Подставив формулу (6) в формулу (7), получим:

$$\begin{aligned} Re &= \frac{1}{18} \frac{gd_n^2 (\rho - \rho_v)}{\nu \rho_v} \cdot \frac{d_n}{\nu} = \frac{1}{18} \frac{gd_n^3 (\rho - \rho_v)}{\nu^2 \rho_v} = \\ &= \frac{1}{18} \frac{9,8 \cdot d_n^3}{(1,01 \cdot 10^{-6})^2} \frac{998,2 - 1,2}{998,2} = 5,3 \cdot 10^{11} d_n^3 = 1. \end{aligned} \quad (9)$$

Отсюда

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{1}{5,3 \cdot 10^{11}}} = 0,00012 \text{ м}, \quad (10)$$

$$v_n = \frac{Re \cdot \nu}{d_n} = \frac{1 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6}}{0,00012} = 0,0084 \text{ м/с}. \quad (11)$$

2. Режим ламинарного всплывания пузырька воздуха со скользящим пристеночным слоем.

В работе (Дерягин Б.В. Кинематическая теория флотации малых частиц // Успехи химии. 1982. №51. С. 92–118) приводятся данные о том, что при всплывании пузырька воздуха в отличие от твердого шара наблюдается эффект проскальзывания окружающей жидкой пленки. Стоксовский режим всплывания сохраняется вплоть до $Re=20$ (точка 1' на рис. 1 и 2). В этом случае будут иметь место следующие равенства:

$$Re = \frac{1}{18} \frac{9,8 \cdot d_n^3}{(1,01 \cdot 10^{-6})^2} \frac{998,2 - 1,2}{998,2} = 5,3 \cdot 10^{11} \cdot d_n^3 = 20, \quad (12)$$

откуда

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{20}{5,3 \cdot 10^{11}}} = 0,00034 \text{ м}, \quad (13)$$

$$v_n = \frac{20 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6}}{0,00034} = 0,06 \text{ м/с}, \quad (14)$$

$$\zeta = \frac{24}{20} = 1,2. \quad (15)$$

3. Переходный режим всплывания пузырька воздуха.

Переходный режим всплывания пузырька воздуха наблюдается между точками 1' и 2' (см. рис. 1 и 2). В этом режиме всплывания пузырек сохраняет сферическую форму, но закон Стокса (формула (6)) перестает действовать.

Переходный режим всплывания твердого шара наблюдается между точками 1 и 2 (см. рис. 1). В статье [3] приводится формула Клячко, описывающая зависимость величины коэффициента гидравлического сопротивления твердого шара, всплывающего в переходном ζ режиме, от значения критерия Рейнольдса Re .

$$\zeta = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{1/3}}. \quad (16)$$

На верхней границе переходного режима всплывания как для твердого шара (точка 2, рис. 1), так и для пузырька воздуха (точка 2' на рис. 1 и 2) критерий Рейнольдса имеет величину $Re=500$.

В соответствии с формулой (16) при величине критерия Рейнольдса $Re=500$ коэффициент гидравлического сопротивления твердого шара будет иметь значение $\zeta=0,55$.

В точке 2' в соответствии с данными, представленными на рис. 2, скорость всплывания пузырька воздуха в воде имеет значение $v_n=0,34 \text{ м/с}$. В этом случае диаметр пузырька воздуха составляет:

$$d_n = \frac{Re \cdot \nu}{v_n} = \frac{500 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6}}{0,34} = 0,00149 \text{ м}. \quad (17)$$

В переходном режиме всплывания пузырька воздуха в воде зависимость величины скорости всплывания пузырька v_n от его диаметра d_n может быть описана формулой

$$v_n = 708 d_n^{1,174}, \text{ м/с}. \quad (18)$$

Во всех режимах пузырек воздуха всплывает в толще воды с постоянной скоростью v_n в результате уравнивания действующих на него сил:

– силы выталкивания (архимедовой силы), величина которой может быть определена по формуле

$$F_{\text{Ар}} = W_n g (\rho - \rho_v), \text{ Н}; \quad (19)$$

– силы гидравлического сопротивления жидкости движению пузырька

$$F_{\text{ГС}} = \omega_n \rho \zeta \frac{v_n^2}{2}, \text{ Н}, \quad (20)$$

где W_n – объем пузырька воздуха, м^3 (для пузырька сферической формы $W_n = \frac{\pi d_n^3}{6}$);

$\omega_n = \frac{\pi d_n^2}{4}$ – площадь поперечного сечения пузырька воздуха, м^2 .

Пузырек воздуха имеет следующие геометрические характеристики:

– коэффициент формы

$$K_\phi = \frac{S_n}{\omega_n}, \quad (21)$$

где S_n – площадь поверхности пузырька воздуха, м^2 ;

– дисперсный размер

$$\delta_n = \frac{W_n}{S_n}, \text{ м}; \quad (22)$$

– коэффициент дисперсности

$$K_d = \frac{d_n}{\delta_n}; \quad (23)$$

– удельная площадь поверхности пузырька воздуха

$$S_{\text{yn}} = \frac{S_n}{W_n} = \frac{1}{\delta_n}, \text{ м}^2/\text{м}^3; \text{ 1/м}. \quad (24)$$

В статье [4] приводятся данные о том, что в качестве показателя, описывающего геометрические характеристики зерен загрузки скорого фильтра, может быть использован коэффициент формы фильтрующей загрузки.

$$\alpha_\phi = \frac{S_{\text{yз}}}{S_{\text{yф}}} = \frac{S_{\text{yф}} d_3}{(1-m)}, \quad (25)$$

где m – коэффициент пористости (межзерновой пустотности) фильтрующего материала; d_3 – эквивалентный диаметр зерен фильтрующего материала; $S_{\text{yз}}$, $S_{\text{yэ}}$, $S_{\text{yф}}$ – соответственно средняя величина удельной площади поверхности зерна фильтрующего материала; удельная площадь поверхности шара с эквивалентным диаметром d_3 , м ; удельная площадь поверхности фильтрующей загрузки, $\text{м}^2/\text{м}^3$; $1/\text{м}$.

Поскольку

$$S_{\text{yз}} = \pi d_3^2 \frac{6}{\pi d_3^3} = \frac{6}{d_3} = \frac{1}{\delta_3}, \text{ 1/м}, \quad (26)$$

$$S_{\text{yэ}} = \frac{S_{\text{yф}}}{1-m} = \frac{1}{\delta_3}, \text{ 1/м}, \quad (27)$$

где δ_3 и δ_3 – соответственно дисперсный размер шара диаметром d_3 , м , и средняя величина дисперсного размера зерен фильтрующей загрузки, м , то коэффициент формы фильтрующей загрузки является относительным дисперсным размером

$$\alpha_\phi = \bar{\delta} = \frac{\delta_3}{\delta_3} \quad (28)$$

и относительным коэффициентом дисперсности

$$\bar{\delta} = \bar{K}_d = \frac{\delta_3}{\delta_3} = \frac{d}{d_3} \cdot \frac{K_{\text{дз}}}{6} = \frac{K_{\text{дз}}}{6}. \quad (29)$$

Для описания геометрических характеристик пузырька воздуха также могут быть использованы:

– относительный коэффициент дисперсности

$$\bar{K}_{\text{дп}} = \frac{K_d}{K_{\text{дш}}} = \frac{K_d}{6}; \quad (30)$$

– относительный коэффициент формы

$$\bar{K}_{\text{фп}} = \frac{K_{\text{фш}}}{K_\phi} = \frac{4}{K_\phi}, \quad (31)$$

где $K_{\text{дш}}=6$ и $K_{\text{фш}}=4$ – соответственно коэффициенты дисперсности и формы шара диаметром d_n , м .

Величина коэффициента гидравлического сопротивления ζ может быть определена из формул (19) и (20) с учетом $F_{\text{ар}}=F_{\text{гс}}$.

$$\zeta = \frac{W_n}{\omega_n} \cdot \frac{2g}{v_n^2} \cdot \frac{\rho - \rho_v}{\rho} = \frac{4W_n}{\pi d_n^2} \cdot \frac{2g}{v_n^2} \cdot \frac{\rho - \rho_v}{\rho}. \quad (32)$$

Для пузырька сферической формы формула (32) запишется в виде

$$\zeta = \frac{2}{3} \cdot \frac{2gd_n}{v_n^2} \cdot \frac{\rho - \rho_v}{\rho}. \quad (33)$$

В соответствии с формулой (33) в точке 2' всплывающий пузырек воздуха будет иметь следующее значение коэффициента гидравлического сопротивления:

$$\zeta = \frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot 9,8 \cdot 0,00149}{0,34^2} \cdot \frac{998,2 - 1,2}{998,2} = 0,17. \quad (34)$$

В переходном режиме всплывания пузырька воздуха в воде зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ζ от критерия Рейнольдса Re может быть описана формулой

$$\zeta = 7,39 Re^{-0,607}. \quad (35)$$

4. Турбулентный режим всплывания пузырька воздуха.

Турбулентный режим всплывания пузырька воздуха наблюдается между точками 2' и 3 (см. рис. 1 и 2). В этом режиме при увеличении диаметра пузырька воздуха более $d_n=1,44 \cdot 10^{-3}$ м происходит его деформация, в результате чего он изменяет свою форму и приобретает вид сплюсненного сфероида с большей осью, нормальной к направлению движения пузырька. Изменение формы пузырька приводит к увеличению коэффициента гидравлического сопротивления ζ . Происходит переход от вязкого сопротивления к сопротивлению изменившейся формы, в результате чего скорость всплывания пузырька уменьшается.

В соответствии с графиком, изображенным на рис. 2, пузырек воздуха в точке 3 имеет следующие характеристики: $v_n=0,21$ м/с; $d_n=0,005$ м. Величина критерия Рейнольдса в этой точке составляет:

$$Re = \frac{v_n d_n}{\nu} = \frac{0,22 \cdot 0,005}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 1089. \quad (36)$$

Турбулентный режим всплывания твердого шара наблюдается между точками 2 и 3 (см. рис. 1). В соответствии с графиком, изображенным на рис. 1, в точке 3 как твердый шар, так и пузырек воздуха диаметром $d_n=0,005$ м имеют следующие характеристики: $Re=1040$; $\zeta=0,4$.

Из формулы (32) следует, что пузырек воздуха в точке 3 имеет объем

$$W_n = \frac{\pi d_n^2}{4} \cdot \frac{\zeta v_n^2}{2g} \cdot \frac{\rho}{\rho - \rho_b} = \frac{3,14 \cdot 0,005^2}{4} \cdot \frac{0,4 \cdot 0,22^2}{2 \cdot 9,8} \cdot \frac{998,2}{998,2 - 1,2} = 1,9 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3. \quad (37)$$

Пузырек воздуха в точке 3 является сплюсненным сфероидом с большей осью, нормальной к направлению движения пузырька, и его можно представить в виде двух сегментов шара радиусом R , имеющих высоту h и площадь основания $\omega_n = \pi r_n^2$ (рис. 3).

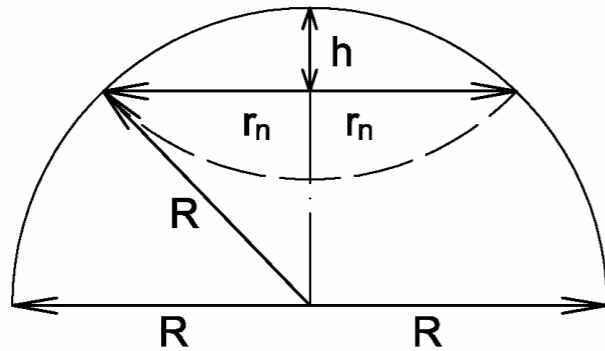


Рис. 3. Схема к определению геометрических характеристик сплюсненного сфероида с радиусом кривизны поверхности R , м

Размер высоты сегмента сфероида h может быть определен из равенства, полученного из уравнения Пифагора:

$$R - h = \sqrt{R^2 - r_n^2}, \text{ м}, \quad (38)$$

откуда

$$h = R - \sqrt{R^2 - r_n^2}, \text{ м}. \quad (39)$$

Объем двух половинок сфероида W_n и площадь их поверхности S_n можно определить из уравнений

$$W_n = 2\pi h^2 \left(R - \frac{1}{3} h \right), \text{ м}^3, \quad (40)$$

$$S_n = 2 \cdot 2\pi R h, \text{ м}^2. \quad (41)$$

При величине радиуса кривизны поверхности сфероида $R=0,0038$ м и $R=0,005$ м высота его половинки будет равна:

$$h = R - \sqrt{R^2 - r_n^2} = 0,0038 - \sqrt{0,0038^2 - \left(\frac{0,005}{2} \right)^2} = 0,000938 \text{ м}. \quad (42)$$

Объем сфероида W_n и площадь его поверхности S_n составят:

$$W_n = 2\pi h^2 \left(R - \frac{1}{3} h \right) = 2 \cdot 3,14 \cdot (0,000938)^2 \left(0,0038 - \frac{1}{3} 0,000938 \right) = 1,9 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3, \quad (43)$$

$$S_n = 4\pi R h = 4 \cdot 3,14 \cdot 0,0038 \cdot 0,000938 = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2. \quad (44)$$

Коэффициент формы сфероида

$$K_\phi = \frac{S_n}{\omega_n} = 4\pi R h \cdot \frac{4}{\pi d_n^2} = \frac{16R}{d_n^2} \left(R - \sqrt{R^2 - r_n^2} \right) = \frac{16R^2}{d_n^2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d_n^2}{4R^2}} \right) = \\ = 16 \frac{0,0038^2}{0,005^2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{0,005^2}{4 \cdot 0,0038^2}} \right) = 2,28. \quad (45)$$

Из (37) с учетом (24) следует, что

$$W_n = \frac{\pi d_n^2}{4} \cdot \frac{\zeta v_n^2}{2g} \cdot \frac{\rho}{\rho - \rho_b} = \delta_n S_n = \delta_n K_\phi \frac{\pi d_n^2}{4}, \text{ м}^3, \quad (46)$$

откуда

$$\delta_n = \frac{\zeta v_n^2}{2g K_\phi} \cdot \frac{\rho}{\rho - \rho_b} = \frac{0,4 \cdot 0,22^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 2,28} \cdot \frac{998,2}{998,2 - 1,2} = 0,00043 \text{ м}. \quad (47)$$

Величина коэффициента дисперсности в точке 3 согласно формуле (23) будет иметь значение

$$K_d = \frac{d_n}{\delta_n} = \frac{0,005}{0,00043} = 11,6. \quad (48)$$

Величина относительного коэффициента дисперсности пузырька воздуха в точке 3 составит:

$$\bar{K}_{дн} = \frac{K_d}{6} = \frac{11,6}{6} = 1,93. \quad (49)$$

Величина относительного коэффициента формы пузырька воздуха в точке 3 будет равна:

$$\bar{K}_{\phi n} = \frac{4}{K_\phi} = \frac{4}{2,28} = 1,75. \quad (50)$$

В турбулентном режиме всплывания пузырька воздуха в воде зависимость величины скорости всплывания v_n от диаметра d_n может быть описана формулой

$$v_n = 0,0327 d_n^{-0,36}, \text{ м/с}. \quad (51)$$

Зависимость величины коэффициента гидравлического сопротивления ζ пузырька воздуха от критерия Рейнольдса Re в этом режиме всплывания характеризуется формулой

$$\zeta = 1,83 \cdot 10^{-4} Re^{1,1}. \quad (52)$$

В турбулентном режиме всплывания твердого шара зависимость величины коэффициента гидравлического сопротивления ζ от критерия Рейнольдса Re может быть описана формулой

$$\zeta = 6,94 Re^{-0,409}. \quad (53)$$

5. Турбулентный режим всплывания пузырька воздуха в области автомодельности закона сопротивления.

Турбулентный режим всплывания пузырька воздуха наблюдается в области, расположенной справа от точки 3 (см. рис. 1 и 2).

Турбулентный режим всплывания твердого шара также наблюдается в области, расположенной справа от точки 3 (см. рис. 1).

Как для пузырька воздуха, так и для твердого шара в этой области коэффициент гидравлического сопротивления имеет постоянное значение

$$\zeta = 0,4 = \text{const.} \quad (54)$$

Зависимость величины скорости всплывания пузырька воздуха $v_{\text{п}}$ от его диаметра $d_{\text{п}}$ в этом режиме описывается формулой

$$v_{\text{п}} = 0,8d_{\text{п}}^{0,25}, \text{ м/с.} \quad (55)$$

Полученные закономерности, описывающие процесс всплывания пузырьков воздуха в различных гидродинамических режимах, позволяют адекватно оценивать свойства полученных водовоздушных смесей, содержащих эти пузырьки, и более эффективно использовать их в конкретных технологиях флотационной очистки сточных вод и сгущения осадков.

Список литературы

1. Andreev, S.Yu. Evaluating the patterns of air bubble rise in water-air mixtures used in natural and waste water treatment processes / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, I.A. Garkina // International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. Materials Science and Engineering 687. – 2019. – P. 50–74.
2. Андреев, С.Ю. Новая методика расчета процессов массопередачи кислорода воздуха в пневматических системах аэрации / С.Ю. Андреев, К.В. Лебединский, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 4 (45). – С. 144–155.
3. Симаков, Н.Н. Расчет обтекания и сопротивления шара в ламинарном и сильно турбулентном потоках / Н.Н. Симаков // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, № 4. – С. 16–20.
4. Кузнецов, Л.К. Технология фильтрации в физико-химических процессах водоподготовки / Л.К. Кузнецов, А.И. Габитов // Башкирский химический журнал. – 2009. – Т. 16, № 2. – С. 84–92.

References

1. Andreev, S.Yu. Evaluating the patterns of air bubble rise in water-air mixtures used in natural and waste water treatment processes / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, I.A. Garkina // International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. Materials Science and Engineering 687. – 2019. – P. 50–74.
2. Andreev, S.Yu. A new method for calculating the processes of mass transfer of air oxygen in pneumatic aeration systems / S.Yu. Andreev, K.V. Lebedinsky, V.A. Knyazev // Regional architecture and Construction. – 2020. – №. 4 (45). – P. 144–155.
3. Simakov, N.N. Calculation of the flow and resistance of the ball in laminar and strongly turbulent flows / N.N. Simakov // Journal of Technical Physics. – 2013. – Vol. 83, №. 4. – P. 16–20.
4. Kuznetsov, L.K. Filtration technology in physical and chemical processes of water treatment / L.K. Kuznetsov, A.I. Gabitov // Bashkir Chemical Journal. – 2009. – Vol. 16, № 2. – P. 84–92.

АРХИТЕКТУРА ARCHITECTURE

УДК [72+69] : 620.91 – 049.35

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

Береговой Александр Маркович,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Городское
строительство и архитектура»
E-mail: ambereg@rambler.ru

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

Снежкина Ольга Викторовна,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Начертательная геометрия
и графика»
E-mail: o.v.snejkina@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

Beregovoy Aleksander Markovich,
Doctor of Sciences,
Professor of the department «Urban
Construction and Architecture»
E-mail: ambereg@rambler.ru

Beregovoy Vitaliy Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Technology of Building Materials
and Wood Processing»
E-mail: vabereg@rambler.ru

Snezhkina Olga Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the Department «Descriptive
Geometry and Graphics»
E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПОМЕЩЕНИЙ

А.М. Береговой, В.А. Береговой, О.В. Снежкина

На основе трех расчетных моделей исследовалось влияние теплоаккумулирующей способности и тепловой инерции ограждений зданий, а также теплоустойчивости помещений на амплитуду колебаний температуры воздуха. Дана оценка теплоаккумулирующей способности наружных ограждений в зависимости от месторасположения в конструкции материалов разной плотности. Установлено влияние теплоемкости, тепловой инерции ограждений и коэффициента теплопоглощения их поверхности на тепловой режим помещения. Изучена теплоаккумулирующая способность массивной конструкции по типу пластины с равномерным распределением температур для компенсации тепловых потерь при отключении системы отопления.

Ключевые слова: теплоаккумулирующая конструкция, тепловая инерция ограждения, теплоемкость, теплоустойчивость помещения, амплитуда колебаний температуры

HEAT-ACCUMULATING STRUCTURES AND THERMAL REGIME OF INTERIOR SPACE

A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy, O.V. Snezhkina

On the basis of three computational models the influence of the heat storage capacity and thermal inertia of outer enclosures, as well as the heat stability of rooms on the amplitude of air temperature fluctuations were studied. The heat storage capacity of outer enclosures has been estimated, depending on the location of materials of different densities in the structure. The influence of the heat capacity, thermal inertia of outer enclosures and the coefficient of heat absorption of their surface on

the thermal regime of the room has been established. The heat storage capacity of a massive plate-type structure with a uniform temperature distribution to compensate for heat losses, when the heating system is switched off has been studied.

Keywords: heat storage structure, thermal inertia of the outer enclosure, heat capacity, heat stability of the room, the amplitude of temperature fluctuations

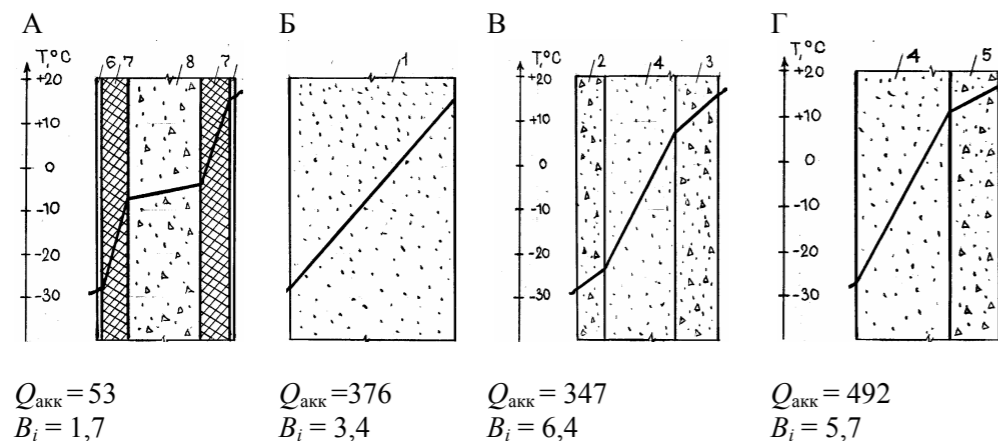
При проектировании зданий нового поколения (экодома, «здоровые» и «умные» здания) специалисты стали ориентироваться на предусмотренные нормами прогрессивные концептуальные направления в архитектуре и строительстве по снижению материалоемкости и энергосбережению. Это привело к использованию в проектной практике ограждающих конструкций, изготовленных из тонкостенных слоев и эффективных теплоизоляционных материалов (панели типа «сэндвич», ограждения с оставляемой опалубки из пенополистирола и др.). В реальных условиях эксплуатации при нестационарных воздействиях тепловых потоков такие конструкции не могут активно накапливать и отдавать воздуху помещений тепло, что препятствует формированию в них комфортного теплового режима.

В данной работе с использованием трех расчетных моделей исследовалось влияние теплоаккумулирующей способности и тепловой инерции ограждений зданий, а также теплоустойчивости помещений на амплитуду колебаний температуры воздуха и внутренней поверхности конструкций, непосредственно влияющую на тепловой режим помещений.

Применение ограждений с определенными теплотехническими свойствами и рациональным расположением в них конструктивных слоев позволяет обеспечить относительное постоянство температуры внутреннего воздуха, что способствует формированию теплового комфорта помещений в реальных условиях эксплуатации.

Конструктивный слой из материалов повышенной плотности (мелкозернистый бетон, тяжелый композит) имеет высокие значения теплопоглощения и объемной теплоемкости, а следующий за ним теплоизоляционный слой обеспечивает достаточный прогрев теплоаккумулирующего массива ограждения внутренним воздухом. Расположение последнего со стороны внутренней поверхности позволяет формировать стабильный тепловой режим помещений в зимнее время, на который влияют также коэффициент теплопоглощения внутренней поверхности B_i , Вт/(м²·°C), и величина теплоемкости конструкции $Q_{акк}$, кДж/(м³·°C) (см. рисунок).

Линии температур по сечению стен построены при расчетных значениях температур наружного и внутреннего воздуха соответственно -29 и +18 °C. Теплоемкость $Q_{акк}$, кДж/(м³·°C), определена для зон по глубине конструкций с положительной температурой [1].



Конструктивные схемы одно-, двух- и трехслойных наружных ограждающих конструкций:

1, 4 – ячеистый бетон; 2, 3, 8 – керамзитобетон; 5 – тяжелый композит; 6 – цементно-песчаная штукатурка; 7 – пенополистирол

Как следует из результатов расчета, среди конструкций, показанных на рисунке, в наибольшей мере относительное постоянство температуры внутреннего воздуха обеспечивает вариант по схеме Г с использованием тяжелого композита, а в наименьшей – вариант по схеме А из легкого бетона и пенополистирольной опалубки.

Влияние теплоустойчивости помещений на амплитуду колебаний температуры внутренней поверхности ограждающих конструкций, а следовательно, и воздушной среды исследовалось по методу В.Н. Богословского с использованием трех критериев: показателя теплоусвоения ограждающих конструкций $Y_{огр}$, амплитуды колебаний температуры поверхностей ограждающих конструкций A_τ и показателя теплоусвоения помещения $Y_{п}$:

$$Y_{огр} = \sum Y_x \cdot F_x,$$

$$A_\tau = A_q / \sum Y_{п} = A_q / \sum Y_x \cdot F_x,$$

$$Y_{п} = Y_{огр} = Y_x \cdot F_x,$$

где F_x – принятые в расчете площади ограждающих конструкций помещения, м²: наружная стена – 9,2; перекрытие – 24; пол – 24; окно – 2,8.

Результаты расчета показали, что в помещении, огражденном конструкциями с различными величинами плотности материала и показателем теплоусвоения помещения амплитуда колебаний температуры на внутренней поверхности этих конструкций A_τ может варьироваться в больших пределах. Так, при попадании на поверхность лучистого теплового потока мощностью 5 000 Вт показатель A_τ может составить 15 °C, если плотность материала ограждений $\gamma = 800$ кг/м³, а показатель теплоусвоения помещения $Y_{п} = 333$, и 3,55 °C при значениях $\gamma = 2 400$ кг/м³, $Y_{п} = 1407$.

Функциональный процесс во многих промышленных и общественных зданиях допускает использование в них легких (малотеплоинерционных) ограждающих конструкций. Наличие в проектом решении массивной теплоаккумулирующей конструкции, которую можно представить как пластину из материала большой плотности, позволило бы более активно осуществлять накопление тепловой энергии в здании.

По А.В. Лыкову, при граничных условиях первого рода уравнение теплопроводности для неограниченной пластины в случае равномерного распределения температуры имеет вид:

$$\frac{t - t_c}{t_o - t_c} = \frac{4}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m+1} \cdot \frac{1}{(2m-1)} \cos(2m-1) \pi \cdot \frac{x}{2R} \cdot \exp \left[-(2m-1)^2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{F_o}{4} \right],$$

где t , t_c , t_o – температуры тела пластины, окружающей среды, начальная температура тела пластины соответственно; R – характерный размер пластины, $R = \delta/2$; x – координата по толщине пластины; F_o – критерий Фурье, $F_o = \alpha \cdot z / R^2$; z – время, ч.

По Богословскому, средняя температура конструкции t_{cp} в конце перерыва в работе системы отопления определяется по формулам:

$$Q_{ак} = c_0 \cdot \gamma \cdot V (t_o - t_{cp}),$$

$$\theta_{cp} = \frac{t_{cp} - \tau_B}{t_o - \tau_B},$$

где θ_{cp} – средняя по объему пластины температура.

Для решения расчетной модели была принята теплоаккумулирующая конструкция из тяжелого бетона ($\gamma = 2300$ кг/м³, $\delta = 0,2$ м, $V = 12$ м³), расположенная в центре небольшого здания с размерами 5×5×3 м [2]. Величина t_o и температура воздуха помещения до момента отключения системы отопления равны 22 °C. Перерыв в работе

системы отопления $z = 12$ ч. По результатам расчета найдены следующие значения показателей: $F_o = 0,9$; $\alpha = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}$; $\theta_{cp} = 0,1$; $t_{cp} = 15, ^\circ\text{C}$; $Q_{ак} / Q_{от} = 0,66$.

Таким образом, рассмотренная теплоаккумулирующая конструкция перед перебоем в работе системы отопления может накопить достаточно большое количество тепла, составляющее две трети от того его количества, которое поступает из системы отопления за 12 ч.

Результаты исследований показали, что по своей способности обеспечивать относительное постоянство температуры внутреннего воздуха ограждающие конструкции из материалов большой плотности за счет теплопоглощения их поверхности и теплоемкости могут превосходить легкие ограждения более чем в 3 и 9 раз соответственно.

Список литературы

1. Береговой, А.М. Теплоаккумулирующие свойства материалов и конструкций в процессах формирования теплового режима помещений / А.М. Береговой, А.П. Прошин, В.А. Береговой // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2002. – №7. – С. 4–6.

2. Береговой, А.М. Теплоаккумулирующая конструкция для компенсации теплопотерь помещения / А.М. Береговой, М.А. Дерина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №1. – С. 102–106.

References

1. Beregovoy, A.M. Heat storage properties of materials and structures in the formation of a thermal mode of rooms / A.M. Beregovoy, A. P. Proshin, V. A. Beregovoy // News of higher educational institutions. Construction. – 2002. – No. 7. – P. 4–6.

2. Beregovoy, A.M. Heat storage construction for compensation of heat losses / A.M. Beregovoy, M.A. Derina // Regional architecture and engineering. – 2016. – №1. – P.102–106.