НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

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

Редакторы: М.А. Сухова
Н.Ю. Шалимова

Дизайн обложки Е.Г. Лапшина

Компьютерная верстка
Н.А. Сазонова

Перевод О.В. Гринцова

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

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

Подписной индекс:
36946 в каталоге Роспечати

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

Подписано к печати 26.09.2022.
Формат 60x84 1/8.
Уч.-изд.л. 28,25. Тираж 500 экз. Первый завод 100.
Заказ № 339.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

3(52)/2022

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ 5

Гришина А.Н.
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ СИНТЕТИЧЕСКИМИ НАНО- И МИКРОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ ГИДРОСИЛИКАТОВ ЦИНКА 5

Ерофеев В.Т., Максимова И.Н., Санягина Я.А., Ерофеева И.В.
ПОДБОР СОСТАВОВ ДЕКОРАТИВНО-ОТДЕЛОЧНЫХ ПОРОШКОВО-АКТИВИРОВАННЫХ БЕТОНОВ С ЗЕРНИСТОЙ ФАКТУРОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО РЕОЛОГИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ 16

Ерофеев В.Т., Максимова И.Н., Санягина Я.А., Ерофеева И.В.
ПРОЧНОСТЬ И МОРОЗОСТОЙКОСТЬ ДЕКОРАТИВНО-ОТДЕЛОЧНЫХ ПОРОШКОВО-АКТИВИРОВАННЫХ БЕТОНОВ С ЗЕРНИСТОЙ ФАКТУРОЙ ПОВЕРХНОСТИ 32

Максимова И.Н., Королев Е.В., Макридин Н.И.
ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ НА КОНСТРУКЦИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ РАННЕЙ СТАДИИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНОВ 46

Гаврилов М.А., Ерофеев В.Т.
РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЖИДКИМ КАУЧУКОМ 53

Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.
ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ 58

Логанина В.И., Зайцева М.В.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА СОСТАВОВ ДЛЯ ОТДЕЛКИ СТЕН ЗДАНИЙ 63

© Авторы публикаций, 2022
© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2022
© ПГУАС, 2022

Гордина А.Ф., Гуменюк А.Н., Полянских И.С., Гафипов А.Т.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА ФТОРАНГИДРИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ 69

Логанина В.И., Зайцева М.В.
ИЗВЕСТКОВЫЕ СОСТАВЫ ДЛЯ РЕСТАВРАЦИИ ШТУКАТУРКИ..... 80

Очкина Н.А.
ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТОГО ЦЕМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ГИДРАТАЦИИ..... 96

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ 101

Клюев С.В., Гарькин И.Н., Клюев А.В.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕРАЗРЕЗНЫХ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК 101

Бакушев С.В.
РАСЧЁТ ТОНКОГО НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОГО СТЕРЖНЯ 117

Снежкина О.В., Толушов С.А.
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ БАЛКИ В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ 126

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ 134

Еремкин А.И., Леонтьев В.А., Пономарева И.К.
ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ОБЩЕОБМЕННЫХ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНЫХ МЕТОДОВ ПО НАЛАДКЕ ВОЗДУШНОГО БАЛАНСА ЗДАНИЯ НА ПРИМЕРЕ МТРК «КОЛЛАЖ»..... 134

Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.
ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: ФОРМИРОВАНИЕ НАВЫКОВ УПРАВЛЕНИЯ 144

Кошев А.Н., Варенцов В.К., Кузина В.В.
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА В ПРОТОЧНОМ ТРЕХМЕРНОМ ЭЛЕКТРОДЕ ПРИ РЕГЕНЕРАЦИИ ОКИСЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ..... 153

Варенцов В.К., Кошев А.Н., Кузина В.В.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОДАХ ПРИ РЕГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ЖЕЛЕЗНЕНИЯ 161

Леонтьев В.А.
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БАЛАНСОВОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ПОТРЕБЛЕННОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ 166

Домке Э.Р., Жесткова С.А., Нелюбин Е.А.
РОЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВТОДОРОЖНОЙ АВАРИЙНОСТИ В РЕШЕНИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ РЕГИОНА.....171

Андреев С.Ю., Князев В.А., Лебединский К.В.
НОВАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСТЕНОЧНОГО СЛОЯ ЛАМИНАРНОГО И ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ В НАПОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДАХ 177

Андреев С.Ю., Князев В.А., Лебединский К.В.
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАБОТЫ НАПОРНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРУБОПРОВОДА В РЕЖИМЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИ ГЛАДКОГО ТРЕНИЯ.....188

Акифьев И.В., Еремкин А.И., Пономарева И.К.
АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГЛОНАСС ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....199

АРХИТЕКТУРА..... 213

Береговой А.М., Береговой В.А.
ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ЗДАНИЯ.....213

Акимова М.С., Карабанова Н.Ю., Антропов Д.В.
ТЕХНОЛОГИЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ГРАНИЦ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ ДЛЯ ПЛАНИРОВКИ ТЕРРИТОРИИ 218

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS 5

Grishina A.N.
EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF MODIFYING CEMENT MATERIALS WITH SYNTHETIC NANO- AND MICRO-SIZED PARTICLES OF HYDROSILICATES OF ZINC* 5

Erofeev V.T., Maksimova I.N., Sanyagin Ya.A., Erofeeva I.V.
SELECTION OF COMPOSITIONS OF DECORATIVE FINISHING POWDER-ACTIVATED CONCRETE WITH A GRAIN TEXTURE SURFACE BY RHEOLOGICAL PROPERTIES 16

Erofeev V.T., Maksimova I.N., Sanyagin Ya.A., Erofeeva I.V.
STRENGTH AND FROST RESISTANCE OF DECORATIVE AND FINISHING POWDER-ACTIVATED CONCRETE WITH GRAIN TEXTURE SURFACE 32

Maksimova I.N., Korolev E.V., Makridin N.I.
THE INFLUENCE OF HEAT AND MOISTURE TREATMENT INTENSITY ON STRUCTURAL STRENGTH OF THE EARLY STAGE OF STRUCTURE FORMATION AND HARDENING OF CONCRETE..... 46

Gavrilov M.A., Erofeev V.T.
RHEOLOGICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES MODIFIED WITH LIQUID RUBBER..... 53

Budylina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.
EXPERIENCE IN APPLYING SYSTEM ANALYSIS METHODS IN BUILDING MATERIALS SCIENCE 58

Loganina V.I., Zaytseva M.V.
QUALITY ASSURANCE OF COMPOSITIONS FOR FINISHING BUILDINGS WALLS 63

Gordina A.F., Gumenuk A.N., Polyanskikh I.S., Gafipov A.T.
IMPACT OF COMPLEX ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF FLUORANHYDRATE-BASED MATERIALS..... 69

Loganina V.I., Zaitseva M.V.
LIME COMPOSITIONS FOR STUCCO RESTORATION..... 80

Ochkina N.A.
HEAT RELEASE OF HIGH-ALUMINA CEMENT DURING HYDRATION..... 96

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS 101

Klyuev S.V., Garkin I.N., Klyuev A.V.
COMPARATIVE ANALYSIS OF UNCUT CRANE BEAMS 101

Bakushev S.V.
THIN NONLINEAR ELASTIC ROD CALCULATION.....117

Snezhkina O.V., Tolushov S.A.
REINFORCED CONCRETE BEAMS IN THE AREA OF TRANSVERSAL FORCES ACTION 126

ENGINEERING SYSTEMS 134

Eremkin A.I., Leontiev V.A., Ponomareva I.K.
FUNCTIONING OF GENERAL EXCHANGE VENTILATION SYSTEMS AND DEVELOPMENT OF ENGINEERING METHODS FOR ADJUSTING THE AIR BALANCE OF A BUILDING ON THE EXAMPLE OF COLLAGE SHOPPING CENTER.....134

Budylina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.
SIMULATION MODELS OF ERGATIC SYSTEMS IN CONSTRUCTION: DEVELOPING MANAGEMENT SKILLS...144

Koshev A.N., Varentsov V.K., Kuzina V.V.
MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF ELECTROCHEMICAL REDUCTION OF IRON IONS IN A FLOWING THREE-DIMENSIONAL ELECTRODE DURING THE REGENERATION OF OXIDIZED ELECTROLYTES.....153

Varentsov V.K., Koshev A.N., Kuzina V.V.
DETERMINATION OF MAIN PARAMETERS DETERMINATION OF THE MAIN PARAMETERS OF ELECTROCHEMICAL PROCESSES IN FLOW THREE-DIMENSIONAL ELECTRODES DURING THE REGENERATION OF IRON ELECTROLYTES.....161

Leontiev V.A.
IMPROVEMENT OF THE BALANCE METHOD OF CONSUMED THERMAL ENERGY CALCULATION.....166

Domke E.R., Zhestkov S.A., Nelubin E.A.
ROLE OF FORECASTING ROAD ACCIDENTS IN SOLVING CONSTRUCTION PROBLEMS IN THE PENZA REGION 171

Andreev S.Yu., Knyazev V.A., Lebedinskiy K.V.
NEW METHOD FOR CALCULATING HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE WALL LAYER OF LAMINAR AND TURBULENT FLUID FLOWS IN PRESSURE TECHNOLOGICAL PIPELINES 177

Andreev S.Yu., Knyazev V.A., Lebedinskiy K.V.
MATHEMATICAL MODELING OF THE OPERATION PROCESS OF A PRESSURE TECHNOLOGICAL PIPELINE IN THE MODE OF HYDRAULICALLY SMOOTH FRICTION 188

Akifev I.V., Eremkin A.I., Ponomareva I.K.
ANALYSIS OF GLONASS CAPABILITIES DEVELOPMENT FOR PERFORMING GEODETIC WORKS IN CONSTRUCTION AT THE PRESENT STAGE OF SATELLITE TECHNOLOGY DEVELOPMENT..... 199

ARCHITECTURE 213

Beregovoy A.M., Beregovoy V.A.
APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF ARCHITECTURAL AND CONSTRUCTION SOLUTION FOR AN ENERGY–EFFICIENT BUILDING.....213

Akimova M.S., Karabanova N.Y., Antropov D.V.
TECHNOLOGY OF SETTING THE BOUNDARIES OF SETTLEMENTS FOR PLANNING OF TERRITORY 218

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.54: 666.971.16 DOI 10.54734/20722958_2022_3_5

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, тел.: +7 (499) 183-44-38; +7 (499) 188-04-00
Гришина Анна Николаевна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник НОЦ «Наноматериалы и нанотехнологии»
E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru

National Research Moscow State University of Civil Engineering
Russia, 129337, Moscow, 26, Yaroslavskoe shosse, tel: +7 (499) 183-44-38; +7 (499) 188-04-00
Grishina Anna Nikolaevna, Candidate of Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of Scientific and Educational Center «Nanomaterials and Nanotechnology»
E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ СИНТЕТИЧЕСКИМИ НАНО- И МИКРОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ ГИДРОСИЛИКАТОВ ЦИНКА*

А.Н. Гришина

Приведены результаты оценки эффективности модифицирования цементных композитов нано- и микроразмерными частицами гидросиликатов цинка на основании исследований кинетики гидратации композиционного цемента. Полученные результаты демонстрируют, что введение силикатных наномодификаторов в систему, содержащую силикатные микроразмерные добавки, может приводить к замедлению гидратации цемента на ранних этапах структрообразования. При этом в зависимости от концентрации и размера наночастиц интенсивность блокирования гидратации цемента может изменяться. В результате наномодифицирования изменяется состав продуктов гидратации композиционного цементного камня. Для ускорения гидратации в раннем возрасте цементных материалов, содержащих силикатный микроразмерный модификатор, предлагается использование наномодификаторов не силикатной природы.

Ключевые слова: гидратация, кинетика процесса, композиционный цемент, наномодификатор, гидросиликаты цинка, продукты гидратации

* 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 # FSWG2020-0007).

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF MODIFYING CEMENT MATERIALS WITH SYNTHETIC NANO- AND MICRO-SIZED PARTICLES OF HYDROSILICATES OF ZINC*

A.N. Grishina

The article presents the results of evaluating the effectiveness of modifying cement composites with nano- and microsized particles of zinc hydrosilicates based on studies of the kinetics of composite cement hydration. The obtained results demonstrate that the introduction of silicate nanomodifiers into a system containing silicate microsized additives can lead to a slowdown in cement hydration at the early stages of structure formation. The intensity of cement hydration blocking can vary depending on the concentration and size of nanoparticles. As a result of nanomodification, the composition of the hydration products of the composite cement stone changes. To accelerate the hydration at an early age of cement materials containing a silicate microsized modifier, it is proposed to use nanomodifiers of a non-silicate nature.

Keywords: hydration, process kinetics, composite cement, nanomodifier, zinc hydrosilicates, hydration products

Повышение эксплуатационных свойств строительных композитов в сочетании со снижением расхода портландцемента продолжает быть актуальной материаловедческой и экологической задачей. Ее решение позволяет не только снизить углеродный след при производстве строительных материалов, но и обеспечить более широкое использование вторичных ресурсов различных производств, в том числе строительства: компоненты рециклингового бетона, портландцементы с низкой активностью и др.

Часто в качестве минеральных добавок используются различные природные и синтетические вещества, в основном силикатной природы [1–4]. В частности, синтезированные гидросиликаты различных металлов, отличающиеся постоянством химического состава, продемонстрировали эффективность при получении композиционных цементных вяжущих специального и общестроительного назначения [5–7]. Однако их применение позволяет модифицировать структуру материала только на микроразмерном уровне, оставляя возможным наномодифицирование; в результате, согласно работам [7, 8], появляется возможность дополнительно повысить физико-механические и эксплуатационные свойства материалов. Однако силикатные минеральные добавки могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на скорость гидратации портландцемента и прочность цементного камня [9, 10]. Так, в работе [11] показано, что избыток силикатной фазы может привести к блокированию гидратации портландцемента. Таким образом, формулируется классическая оптимизационная задача, в которой целевой функцией является прочность материала (цементного камня), а граничными условиями – с одной стороны, недостаток силикатной минеральной добавки, имеющей различную дисперсность и способной на различных структурных уровнях оказывать влияние на плотность структуры цементного камня, будет приводить к недоиспользованию потенциала материала, а с другой стороны – избыток силикатной фазы, особенно если учитывать высокую активность наночастиц, будет создавать условия для блокирования гидратации портландцемента, что может являться причиной снижения степени гидратации и прочности искусственного камня.

Для исследования целесообразности наномодифицирования композиционного вяжущего, содержащего портландцемент и микроразмерную минеральную добавку на основе гидросиликатов бария и цинка, и определения области оптимального содержания минеральных добавок необходимо установить и сравнить особенности гидратационных процессов, протекающих в композиционном цементном тесте, а также при формировании камня в присутствии нано- и микроразмерных гидросиликатных минеральных добавок. В качестве индикатора для оценки структурообразования на данном этапе исследования целесообразно использовать минералогический и химический составы искусственного камня.

Для исследований были изготовлены композиционные цементы на основе портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н (ГОСТ 31108-2016), микроразмерных гидросиликатов

бария в количестве 10 % от массы портландцемента, микроразмерных гидросиликатов цинка в количестве 2 % от массы портландцемента. Приготовление композиционного вяжущего осуществлялось путем совместного помола компонентов в шаровой мельнице до среднего размера частиц 6...8 мкм. Из композиционного вяжущего изготавливалось тесто нормальной густоты при В/Ц = 0,32. В качестве воды затворения использовался коллоидный раствор гидросиликатов цинка [12]. Контрольным составом являлся тот же состав композиционного вяжущего, затворенный водопроводной водой, соответствующей ГОСТ Р 51232-98 «Вода питьевая».

Анализ кинетики гидратации композиционного вяжущего проводили на основе данных дифференциального термического анализа и инфракрасной спектроскопии композиционного цементного камня в возрасте 1; 3-4; 7; 14 и 28 суток. Типичная термограмма композиционного цементного камня приведена на рис. 1, а в табл. 1 – результаты исследования в указанном временном диапазоне.

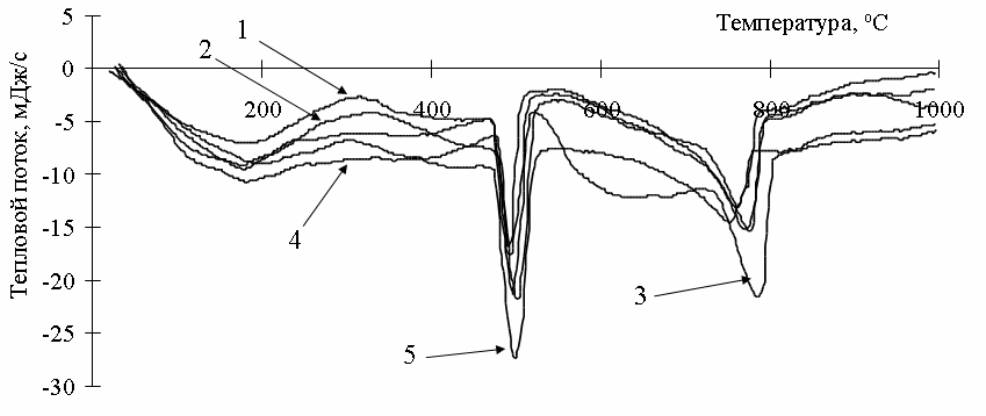


Рис. 1. Термограмма композиционного цементного камня, модифицированного гидросиликатами бария и гидросиликатами цинка (2,0 %):
1 – в возрасте 1 сутки; 2 – в возрасте 3 суток; 3 – в возрасте 7 суток; 4 – в возрасте 14 суток; 5 – в возрасте 28 суток

Данные рис. 1 показывают, что на термограмме идентифицируются 3 аномалии, типичные для цементных систем. Известно [13, 14], что аномалия при 130…150 °С указывает на степень гидратации цемента, а аномалия при ~175 °С характерна для составов, содержащих CSH (II). Также известно, что аномалия при 160…180 °С соответствует разложению гидросульфоалюмоферрита кальция. На большинстве полученных термограмм достаточно сложно отделить термоэффекты от разложения каждого из указанных веществ, хотя отмечается изменение формы аномалии и температуры минимума. Экзотермический эффект при температуре 330-340°С указывает на протекание процессов кристаллизации непрореагировавшего выщелоченного клинкерного кремнезема в портландцементе [15]. Содержание портландита в материале можно оценить по изменению аномалии при 450-500 °С; при этом следует учитывать, что она может как возрастать по мере увеличения степени гидратации портландцемента, так и уменьшаться за счет связывания портландита аморфными гидросиликатами металлов. Так как указанная аномалия характеризует разложение только одного минерала, то она наиболее удобна для анализа процессов гидратации. Разложение гидросиликатов и карбоната кальция происходит при близкой по значению температуре – 750…780 °С. Если учесть, что карбонат образуется только в поверхностном слое образцов и при пробоподготовке, то указанная аномалия может быть косвенно использована для оценки содержания гидросиликатов кальция в материале.

Величины эндотермических эффектов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Данные дифференциального термического анализа
(количество поглощенной теплоты, Дж/г)

Продолжительность структурообразования, сутки	Температура разложения, °С		
	132-188	480-500	764-786
1	2	3	4
2 % гидросиликатов цинка			
1	-36,7	-28,0	-41,9
3	-27,7	-36,8	-54,8
7	-24,8	-42,9	-39,7
14	-13,5	-48,4	-51,6
28	-26,9	-58,8	-49,5
$C(Fe(OH)_3)$= 0,3 % α_s^* = 0,5			
1	-17,5	-6,6	-13,4
4	-83,2	-21,7	-35,3
7	-71,1	-16,3	-37,9
14	-74,9	-21,1	-36,6
28	-72,2	-30,8	-33,4
$C(Fe(OH)_3)$= 0,3 % α_s = 1,0			
1	-34,0	-7,2	-12,3
4	-31,3	-29,7	-35,5
7	-10,1	-34,4	-38,8
14	-22,3	-34,9	-35,7
28	-36,9	-35,4	-34,2
$C(Fe(OH)_3)$= 0,3 % α_s = 1,5			
1	-53,4	-17,1	-23,8
4	-49,4	-21,9	-36,7
7	-25,3	-25,7	-42,1
14	-44,2	-35,7	-37,8
28	-9,9	-31,9	-42,1
$C(Fe(OH)_3)$= 0,5 % α_s = 0,5			
1	-16,3	-17,3	-25,5
4	-26,1	-30,5	-41,5
7	-27,3	-33,3	-36,6
14	-38,0	-30,6	-36,6
28	-39,8	-35,0	-30,3
$C(Fe(OH)_3)$= 0,5 % α_s = 1,0			
1	-27,8	-17,0	-25,7
4	-31,1	-25,9	-40,1
7	-18,3	-32,2	-42,2
14	-25,1	-34,4	-37,7
28	-16,8	-35,1	-27,9
$C(Fe(OH)_3)$= 0,5 % α_s = 1,5			
1	-28,7	-12,7	-20,1
4	-25,8	-26,7	-36,5
7	-21,9	-28,7	-36,3
14	-49,3	-27,7	-33,9
28	-21,0	-33,5	-28,9
$C(Fe(OH)_3)$= 0,7 % α_s = 0,5			
1	-35,6	-9,7	-15,5
4	-35,3	-22,5	-34,6
7	-23,3	-26,9	-36,0

Окончание табл. 1

1	2	3	4
14	-18,9	-30,8	-35,0
28	-20,7	-35,1	-32,0
$C(Fe(OH)_3)$= 0,7 % α_s = 1,0			
1	-40,2	-8,3	-15,1
4	-55,2	-22,7	-32,3
7	-40,9	-20,6	-37,5
14	-33,4	-28,5	-34,9
28	-24,6	-33,3	-31,7
$C(Fe(OH)_3)$ = 0,7 % α_s = 1,5			
1	-36,1	-7,4	-13,2
4	-15,9	-25,8	-33,7
7	-16,1	-25,4	-33,1
14	-19,9	-31,2	-33,9
28	-14,3	-31,6	-33,7

Примечание. * – $\alpha_s = [Na^+]/[Cl^-]$ в составе наномодификатора, получаемого с использованием кислого золя гидроксида железа и водного раствора гидросиликатов натрия. Методика синтеза приведена в работе [16].

Данные табл. 1 демонстрируют, что введение наноразмерных гидросиликатов цинка позволяет снизить величину эндоэффекта при разложении портландита на 66...91 % при достижении марочного возраста наномодифицированного композиционного вяжущего. Однако в возрасте 1 суток содержание портландита существенно отличается: так, при $C(Fe(OH)_3)$ = 0,3 % и α_s = 0,5 и 1,0 количество портландита ниже в 3,92...4,26 раза (группа 1); при $C(Fe(OH)_3)$ = 0,7 % и α_s = 1,0 или α_s = 1,5 – в 3,36...3,77 раза (группа 2); при $C(Fe(OH)_3)$ = 0,7 % и α_s = 0,5 – в 2,88 раза (группа 3); при $C(Fe(OH)_3)$ = 0,5 % и α_s = 1,5 – в 2,21 раза (группа 4); $C(Fe(OH)_3)$ = 0,5 % и α_s = 0,5 и 1,0, а также $C(Fe(OH)_3)$ = 0,3 % и α_s = 1,5 – в 1,62...1,65 раза (группа 5). Таким образом, в первые сутки наноразмерные гидросиликаты цинка существенно воздействуют на скорость гидратации портландцемента. При этом значительное влияние оказывают особенности состава и концентрации наномодификатора: параметры $C(Fe(OH)_3)$ и α_s.

В другие периоды структурообразования композиционный цементный камень с наноразмерным модификатором на основе гидросиликатов цинка любого состава имеет меньшую концентрацию портландита, чем в составе без наномодификатора. При этом изменение концентрации портландита имеет нелинейный характер.

Аналогично изменяется и концентрация гидросиликатов кальция (аномалия при температуре 764-786 °С). Однако наноразмерный модификатор может изменять механизм гидратации и приводить к образованию большего количества продуктов, разлагающихся при температуре 132-188 °С. Так как проводилась остановка гидратации портландцемента, то свободная вода в образцах отсутствует. Это позволяет сравнивать величины их эндотермических эффектов при 132-188 °С. На 1 сутки твердения во всех наномодифицированных составах, кроме $C(Fe(OH)_3)$ = 0,3 % и α_s = 1,5, площадь аномалии меньше, чем в составе без наномодификатора. Однако по мере твердения площадь аномалии при 132-188 °С увеличивается. Так, при использовании наноразмерных модификаторов, изготовленных при $C(Fe(OH)_3)$ = 0,3 % и α_s = 0,5 и 1,5; $C(Fe(OH)_3)$ = 0,5 % и α_s = 0,5 и α_s = 1,5; $C(Fe(OH)_3)$ = 0,7 % и α_s = 1,0, наблюдается суммарное увеличение содержания продуктов, разлагающихся в указанном диапазоне температур.

Аналогичный характер наблюдается для суммарных площадей аномалий в исследованном временном интервале. Так, при $C(Fe(OH)_3)$ = 0,3 % суммарная площадь аномалий при α_s = 0,5 составляет -475,5 Дж/г, при α_s = 1,0 – -318,1 Дж/г, а при α_s = 1,5 – -287,0 Дж/г; при $C(Fe(OH)_3)$ = 0,5 % – -291,1; -292,6; -345,8 Дж/г, соответственно, а при $C(Fe(OH)_3)$ = 0,7 % – -364,6 Дж/г; -302,4 и -249,9 Дж/г, соответственно (рис. 2).

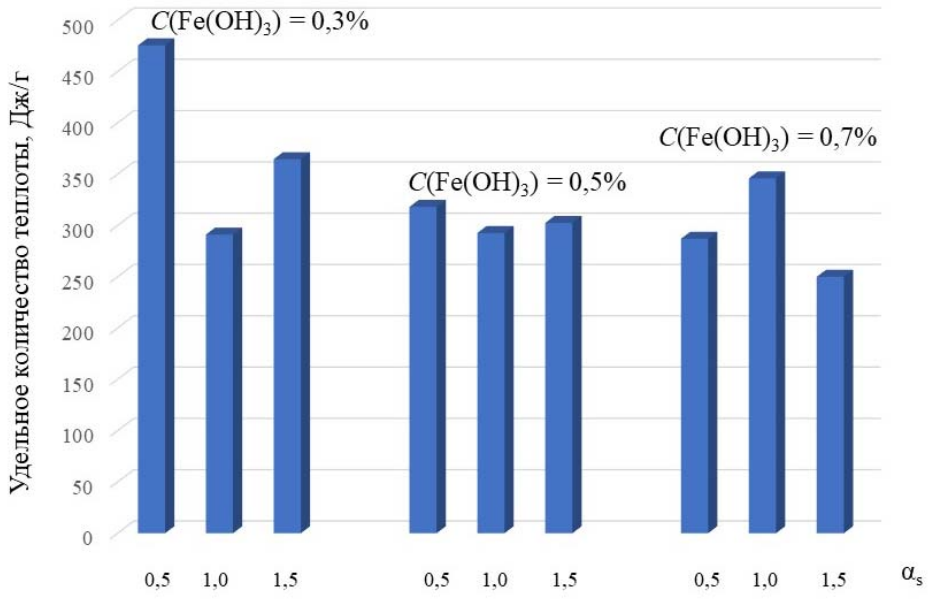


Рис. 2. Удельные абсолютные величины суммарных теплот аномалий, характеризующих продукты гидратации портландцемента, модифицированного нано- и микроразмерными частицами гидросиликатов цинка

Таким образом, при $C(Fe(OH)_3) = 0{,}3$ % и $C(Fe(OH)_3) = 0{,}7$ % с увеличением величины α_s уменьшается количество продуктов, разлагающихся при 132-188 °С. Указанное свидетельствует об изменениях в гидратации портландцемента. Однако, учитывая, что первая аномалия совмещает несколько откликов, которые затруднительно разделить (необходимо привлечение нескольких методов), дополнительно провели исследование указанных составов методом ИК-спектроскопии. Общий вид ИК-спектров и величины максимумов откликов представлены на рис. 3, в табл. 2 и 3.

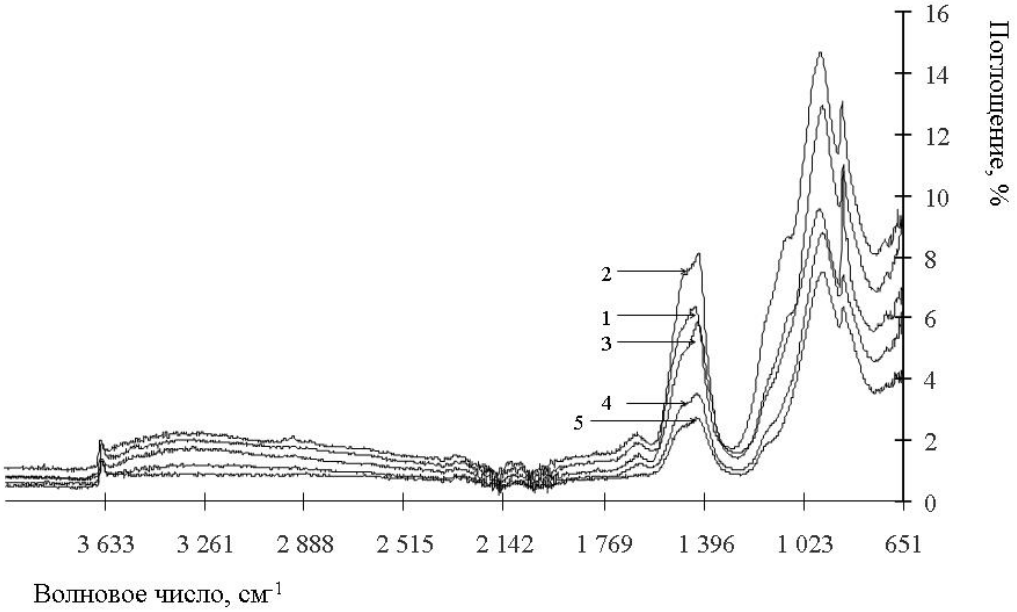


Рис. 3. ИК-спектры композиционного цементного камня, модифицированного гидросиликатами бария и гидросиликатами цинка (2,0 %):
1 – в возрасте 1 сутки; 2 – в возрасте 3 суток; 3 – в возрасте 7 суток; 4 – в возрасте 14 суток; 5 – в возрасте 28 суток

Таблица 2

ИК-спектрограммы цементного камня, модифицированного нано- и микроразмерными гидросиликатами бария и цинка (интенсивности откликов указаны в %)

Возраст, сутки	Волновое число, см$^{-1}$						
	1634-38	1457-61	1411-20	1066-92	940-965	874	714-695
1	2	3	4	5	6	7	8
$C(Fe(OH)_3)$= 0,3 % α_s = 0,5							
1	0,28	7,23	7,65	6,55	5,26	8,45	0,76
4	0,25	3,46	4,26	–	7,34	5,17	–
7	0,24	5,18	6,53	–	7,76	6,52	–
14	0,19	3,03	3,54	–	8,03	5,12	–
28	0,20	2,12	2,40	–	8,02	5,21	–
$C(Fe(OH)_3)$= 0,3 % α_s = 1,0							
1	0,71	3,85	3,86	5,06	8,71	7,08	0,75
4	0,21	2,99	3,16	–	8,00	5,30	–
7	0,11	3,19	3,40	–	8,03	6,02	–
14	0,22	2,21	2,36	–	6,56	5,39	–
28	0,13	2,53	2,67	–	6,90	4,63	–
$C(Fe(OH)_3)$= 0,3 % α_s = 1,5							
1	0,26	4,42	4,51	9,06	7,71	8,89	1,49
4	0,26	3,89	3,74	–	7,35	5,25	0,28
7	0,18	4,13	4,78	–	3,01	5,06	0,14
14	0,14	3,14	3,74	–	6,61	4,67	0,35
28	–	2,63	3,06	–	8,45	5,68	–
$C(Fe(OH)_3)$= 0,5 % α_s = 0,5							
1	0,17	2,85	2,78	4,43	7,04	5,56	0,07
4	0,07	3,14	3,25	–	7,59	5,58	–
7	0,14	3,15	3,36	–	7,88	4,95	–
14	0,12	2,65	2,77	–	8,13	5,43	–
28	0,13	2,50	2,58	–	9,24	5,56	–
$C(Fe(OH)_3)$= 0,5 % α_s = 1,0							
1	0,14	3,52	3,54	5,14	8,29	5,33	0,23
4	0,16	4,08	4,29	–	8,85	6,58	–
6	0,15	3,12	3,30	–	8,16	5,34	–
14	0,00	2,35	2,44	–	5,87	4,67	–
28	0,13	2,92	3,01	–	8,80	5,80	–
$C(Fe(OH)_3)$= 0,5 % α_s = 1,5							
1	0,05	3,19	3,18	4,95	7,54	7,16	–
4	0,20	3,16	3,37	–	7,48	5,20	–
7	1,28	2,91	3,06	–	8,63	5,33	–
14	–	2,91	3,10	–	7,82	5,58	–
28	–	2,44	2,58	–	7,35	4,99	–
$C(Fe(OH)_3)$= 0,7 % α_s = 0,5							
1	0,15	5,27	5,41	5,65	7,13	7,82	0,24
4	0,15	3,52	3,77	–	7,37	5,26	–
7	0,12	2,95	3,15	–	7,47	5,02	–
14	0,27	3,41	5,15	–	8,56	5,82	–
28	–	2,00	2,02	–	6,31	4,02	–
$C(Fe(OH)_3)$= 0,7 % α_s = 1,0							
1	0,10	7,13	7,57	6,45	5,38	8,32	0,60
4	0,25	3,58	4,28	–	6,94	5,21	–
7	0,28	3,76	4,58	–	7,26	5,65	–
14	–	1,51	4,12	–	8,07	4,87	–

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
28	–	2,84	3,34	–	8,01	6,02	–
$C(Fe(OH)_3)$= 0,7 % α_s = 1,5							
1	0,18	8,06	8,01	6,75	5,33	9,25	0,73
4	0,18	4,14	4,38	–	6,99	5,83	0,33
7	0,23	3,84	4,04	–	7,93	5,61	–
14	0,25	2,86	3,01	–	7,26	4,84	–
28	–	–	3,12	–	7,74	6,04	–

Таблица 3

Интенсивности откликов ИК-спектрограмм микромодифицированного композиционного вяжущего, %

Возраст, сутки	Волновое число, см$^{-1}$					
	1634-38	1411-20	1066-92	940-965	874	714-695
2,0 % гидросиликатов цинка						
1	0,44	4,52	4,57	9,10	6,56	–
3	0,36	6,67	3,17	5,73	6,44	–
7	0,41	5,87	–	8,24	2,47	–
14	0,24	2,45	–	5,59	3,65	–
28	0,08	1,85	–	5,09	3,56	–

Совместный анализ табл. 2 и 3 показывает, что в составе получаемых искусственных камней есть соединения, имеющие связи, колеблющиеся при волновых числах 1634-38; 1457-61; 1411-20; 1066-1092; 940-965; 874 и 714-695 см$^{-1}$. Отличием состава, содержащего наноразмерные гидросиликаты цинка, является наличие ярко выраженного отклика при волновом числе 714-695 см$^{-1}$. Остальные полосы всех исследованных составов наблюдаются при одинаковой длине волны, но имеют различную интенсивность, а также отмечается смещение совместного отклика при 1457-61 и 1411-20 см$^{-1}$ в сторону отклика при 1457-61 см$^{-1}$. В целом, следует отметить, что для большинства откликов отмечается снижение интенсивности с увеличением возраста материала. Также происходят процессы, приводящие к исчезновению аномалий при 1066-92 и 714-695 см$^{-1}$, которые, вероятно, указывают на содержание в материале гипсового камня.

Таким образом, в контрольном составе на 3 сутки твердения наблюдается присутствие гипса, который еще не полностью связался в эттрингит, а при использовании наномодификаторов на основе гидросиликатов цинка – на 4 сутки твердения. Однако концентрация гипса через 1 сутки гидратации выше при применении наномодификаторов, что согласуется с данными дифференциального термического анализа. Низкая скорость гидратации наблюдается при использовании наномодификатора, изготовленного при $C(Fe(OH)_3)$ = 0,3 % и α_s = 1,5. Также следует отметить, что наличие гипса вносит вклад в первую аномалию термограмм, что затрудняет оценку количества продуктов гидратации вяжущего. Сравнительно высокая скорость связывания гипса наблюдается при использовании наномодификатора на основе гидросиликатов цинка, синтезированных при $C(Fe(OH)_3)$= 0,5 % и α_s = 0,5 или α_s = 1,5.

Интенсивность колебаний связей при 940-965 см$^{-1}$ в наномодифицированных составах имеет свои отличия. Так, для контрольного состава отмечается снижение интенсивности указанной аномалии во времени, а для наномодифицированных составов – реализуется как снижение, так и увеличение (иногда сравнительное постоянство интенсивности этой аномалии). Указанное подтверждает предположение, сделанное по данным дифференциального термического анализа, а именно образование другого продукта гидратации. На это указывает и широкая сдвоенная аномалия, наблюдающаяся для наномодифицированного цементного камня с максимумами около ~1430 и ~1480 см$^{-1}$ и обусловленная колебаниями, локализованными на связях О–Н в гидрок-

сильных группах и в молекулах воды, входящих в структуру C–S–H-геля. Остальные аномалии, вероятно, соответствуют минералам клинкера; так, аномалия при ~880 см$^{-1}$ соответствует четырехкальциевому алюмофериту C_4AF.

Обобщая результаты проведенных исследований, можно заключить, что использование силикатных фаз для модифицирования цементных систем имеет ограничения, в частности дополнительное модифицирование цементных материалов, содержащих силикатный микроразмерный модификатор, наноразмерными частицами гидросиликатов цинка в исследованном диапазоне параметров является неэффективным из-за блокирования гидратации портландцемента избыточным содержанием силикатной фазы. Однако реализация структурного подхода для таких систем возможна с использованием не силикатных наночастиц. Для таких цементных материалов – портландцемента, содержащего силикатный микроразмерный модификатор, – следует использовать наноразмерные частицы иной химической природы.

Список литературы

1. Александров, А.О. О применении термоактивированной золы-уноса для замены цемента в строительстве / А.О. Александров // Цемент и его применение. – 2017. – № 3. – С. 88–91.

2. Климов, В.Е. Использование отвальных золошлаков, получаемых при сжигании углей Кузнецкого бассейна, в качестве активной минеральной добавки к цементу (например золошлаков Ново-Кемеровского ТЭЦ) / В.Е. Климов // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2010. – № 3 (15). – С. 38–47.

3. Демьяненко, О.В. Исследование свойств цементного камня с комплексной добавкой / О.В. Демьяненко, Н.О. Копаница, Ю.С. Саркисов, Н.П. Горленко // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 147–156.

4. Джаббарова, Н.Э. Влияние металлургических шлаков на свойства цемента и бетонов на его основе / Н.Э. Джаббарова, К.К. Алиев // Наука, техника и образование. – 2021. – № 1 (76). – С. 11–14.

5. Козин, А.В. Влияние волластонита на механические свойства бетона / А.В. Козин, Р.С. Федюк, Ю.Ю. Ильинский, С.Б. Ярусова, П.С. Гордиенко, А.М. Мохаммад // Строительные материалы и изделия. – 2020. – Т. 3, № 5. – С. 34–42.

6. Логанина, В.И. Структурообразование цементного камня в присутствии добавки на основе аморфных алюмосиликатов / В.И. Логанина, И.В. Жерновский, К.В. Жегера // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 3 (56). – С. 142–148.

7. Королев, Е.В. Химический состав наномодифицированного композиционного вяжущего с применением нано- и микроразмерных гидросиликатов бария / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.Б. Сатюков // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 90–103.

8. Артамонова, О.В. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Часть 1. Общие проблемы фундаментальности, основные направления исследований и разработок / О.В. Артамонова, Е.М. Чернышов // Строительные материалы. – 2013. – № 9. – С. 82–90.

9. Артамонова, О.В. Исследование кинетики набора прочности модифицированного цементного камня / О.В. Артамонова, О.Б. Кукина // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2014. – № 2 (9). – С. 83–93.

10. Артамонова, О.В. Эффективность применения комплексных наноразмерных добавок для цементных систем / О.В. Артамонова, Г.С. Славчева, Е.М. Чернышов // Неорганические материалы. – 2017. – Т. 53, № 10. – С. 1105–1110.

11. Артамонова, О.В. Исследование количественного состава наноразмерных систем SiO_2–H_2O, синтезированных золь-гель-методом / О.В. Артамонова, О.Р. Сергуткина // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строитель-

ного университета. Серия: Физико-химические проблемы строительного материаловедения и высокие технологии. – 2011. – № 3–4. – С. 13–21.

12. Grishina, A. Nanomodifier based on zinc hydrosilicates for cement systems / A. Grishina, E. Korolev // AIP Conference Proceedings. Prospects of Fundamental Sciences Development, PFSD-2016: Proceedings of the XIII International Conference of Students and Young Scientists. – 2016. – P. 020016.

13. Горшков, В. С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.

14. Тейлор, Х. Химия цемента: пер. с англ./ Х. Тейлор. – М.: Мир, 1996. – 560 с.

15. Королёв, А.С. Цементно-полимерные гидроизоляционные растворы / А.С. Королёв, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов. – URL: http://sbcmi.ru/tsementno-polimernie-gidroizilyatsionnie-rastvori/ Дата обращения 13.05.2022.

16. Гришина, А.Н. Жидкостекольные строительные материалы специального назначения / А.Н. Гришина, Е.В. Королев. – М.: НИУ МГСУ, 2015. – 224 с.

References

1. Alexandrov, A.O. On the use of thermally activated fly ash to replace cement in construction / A.O. Alexandrov // Cement and its application. – 2017. – No. 3. – P. 88–91.

2. Klimov, V.E. The use of dump ash slag obtained by burning coal of the Kuznetsk basin as an active mineral additive to cement (for example, ash slag of the Novo-Kemerovo CHP) / V.E. Klimov // ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes. – 2010.– № 3 (15). – P. 38–47.

3. Demyanenko, O.V. Investigation of the properties of cement stone with a complex additive / O.V. Demyanenko, N.O. Kopanitsa, Yu.S. Sarkisov, N.P. Gorlenko // Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. – 2020. – Vol. 22, No. 4. – P. 147–156.

4. Jabbarova, N.E. The influence of metallurgical slags on the properties of cement and concrete based on it / N.E. Jabbarova, K.K. Aliyev // Science, Technology and education. – 2021. – № 1 (76). – P. 11–14.

5. Kozin, A.V. The influence of wollastonite on the mechanical properties of concrete / A.V. Kozin, R.S. Fedyuk, Yu.Yu. Ilyinsky, S.B. Yarusova, P.S. Gordienko, A.M. Mohammad // Building materials and products. – 2020. – Vol. 3. – No. 5. – P. 34–42.

6. Loganina, V.I. Structure formation of cement stone in the presence of an additive based on amorphous aluminosilicates / V.I. Loganina, I.V. Zhernovsky, K.V. Zhegera // Bulletin of Civil Engineers. – 2016. – № 3 (56). – P. 142–148.

7. Korolev, E.V. Chemical composition of a nanomodified composite binder using nano- and micro-sized barium hydrosilicates / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.B. Satyukov // Nanotechnologies in construction: scientific online journal. – 2014. – Vol. 6, No. 4. – P. 90–103.

8. Artamonova, O.V. Concepts and foundations of technologies for nanomodification of structures of building composites. Part 1. General problems of fundamentality, the main directions of research and development / O.V. Artamonova, E.M. Chernyshov // Building materials. – 2013. – № 9. – P. 82–90.

9. Artamonova, O.V. Investigation of the kinetics of strength gain of modified cement stone / O.V. Artamonova, O.B. Kukina // Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science. – 2014. – № 2 (9). – P. 83–93.

10. Artamonova, O.V. Efficiency of application of complex nanoscale additives for cement systems / O.V. Artamonova, G.S. Slavcheva, E.M. Chernyshov // Inorganic materials. – 2017. – Vol. 53, No. 10. – P. 1105–1110.

11. Artamonova, O.V. Investigation of the quantitative composition of nanoscale SiO_2 – H_2O systems synthesized by sol-gel method / O.V. Artamonova, O.R. Sergutkina // Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering.

Series: Physico-chemical problems of building materials science and high technologies. – 2011. – No. 3–4. – P. 13–21.

12. Grishina, A. Nanomodifier based on zinc hydrosilicates for cement systems / A. Grishina, E. Korolev // AIP Conference Proceedings. Prospects of Fundamental Sciences Development, PFSD-2016: Proceedings of the XIII International Conference of Students and Young Scientists. – 2016. – P. 020016.

13. Gorshkov, V. S. Methods of physico-chemical analysis of binders / V.S. Gorshkov, V.V. Timashev, V.G. Savelyev. – M.: Higher School, 1981. – 335 p.

14. Taylor, X. Chemistry of cement: translated from English / X. Taylor. – M.: Mir, 1996. – 560 p.

15. Korolev, A.S. Cement-polymer waterproofing solutions / A.S. Korolev, L.Ya. Kramar, B.Ya. Trofimov. –URL: http://sbcmi.ru/tsementno-polimernie-gidroizilyatsionnie-rastvori / Date of appeal 13.05.2022.

16. Grishina, A.N. Liquid glass construction materials for special purposes / A.N. Grishina, E.V. Korolev. – M.: NRU MGSU, 2015. – 224 p.

УДК 691.32:666.972.1 DOI 10.54734/20722958_2022_3_16

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
Россия, 430005, Саранск, ул. Большевистская, д. 68

Ерофеев Владимир Трофимович,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы и технологии», академик РААСН
E-mail: Erofeevvt@bk.ru

Санягина Яна Андреевна,
соискатель кафедры «Строительные материалы и технологии»
E-mail: sanyagina@mail.ru

Ерофеева Ирина Владимировна,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Строительные материалы и технологии»
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

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

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

Mordovian State University named after N.P. Ogarev
Russia, 430005, Saransk, 68, Bolshevistskaya St.

Erofeev Vladimir Trofimovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the Department «Building Materials and Technologies», Academician of the RAASN
E-mail: Erofeevvt@bk.ru

Sanyagina Yana Andreevna,
Competitor of the department «Building materials and technologies»
E-mail: sanyagina@mail.ru

Erofeeva Irina Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Senior Researcher at the Department of Building Materials and Technologies
E-mail: ira.erofeeva.90@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 «Management of quality and technology of construction production»
E-mail: maksimovain@mail.ru

ПОДБОР СОСТАВОВ ДЕКОРАТИВНО-ОТДЕЛОЧНЫХ ПОРОШКОВО-АКТИВИРОВАННЫХ БЕТОНОВ С ЗЕРНИСТОЙ ФАКТУРОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО РЕОЛОГИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ

В.Т. Ерофеев, И.Н. Максимова, Я.А. Санягина, И.В. Ерофеева

Показано, что в последние годы в отечественной и мировой практике широкое применение нашли самоуплотняющиеся бетонные смеси, отличающиеся высокой удобоукладываемостью без применения вибрационного воздействия. Приведены результаты исследования по подбору составов декоративно-отделочных порошково-активированных бетонов с зернистой фактурой поверхности по реологическим свойствам.

Рассчитаны структурные и реотехнологические показатели порошково-активированных бетонов. Показано, что с точки зрения реотехнологических показателей наиболее качественными представляются составы 2 и 1, чуть менее качественными 4 и 3, составы 2 и 1 являются самоуплотняющимися бетонами с осадкой конуса 27,4 и 28,5 см, что соответствует американскому стандарту SF2. Очевидна закономерность в достижении близких значений условных реологических матриц ($И^{ВД}_{П_Т}$, $И^{ВДП_Т}_{П_З}$), равных соответственно 1,67–1,97 и 1,78–1,98, что свидетельствует о том, что объемное содержание водно-дисперсно-тонкозернистой суспензионной составляющей для самоуплотняющихся порошково-активированных песчаных бетонов должно быть в диапазоне 60 %. Только при высоком содержании водно-дисперсно-тонкозернистой суспензии будет обеспечиваться абсолютная саморастекаемость.

Из полученных значений условных реологических критериев порошково-активированных бетонов следует, что все они значительно больше единицы и характеризуют существенное превышение объемов реологических матриц над объемами тонкозернистых, грубозернистых компонентов, которые вмещаются в них с большими раздвижками частиц и зерен.

Ключевые слова: декоративный бетон, зернистая фактура, порошковая активация, реологические свойства, объемные концентрации матриц, матрицы различных родов, соотношения избытков

SELECTION OF COMPOSITIONS OF DECORATIVE FINISHING POWDER-ACTIVATED CONCRETE WITH A GRAIN TEXTURE SURFACE BY RHEOLOGICAL PROPERTIES

V.T. Erofeev, I.N. Maksimova, Ya.A. Sanyagin, I.V. Erofeeva

It is shown that in recent years in domestic and world practice, self-compacting concrete mixtures have been widely used, which are characterized by high workability without the use of vibration exposure. The results of a study of compositions selection for decorative-finishing powder-activated concrete with a granular surface texture according to rheological properties are presented.

Structural and rheotechnological parameters of powder-activated concretes are calculated. It is shown that from the point of rheotechnological indicators, compositions 2 and 1 seem to be the most qualitative, compositions 4 and 3 are slightly less qualitative, compositions 2 and 1 are self-compacting concretes with a cone draft of 27.4 and 28.5 cm, which corresponds to the American standard SF2. There is an obvious regularity in achieving close values of conditional rheological matrices, equal to 1.67–1.97 and 1.78–1.98, respectively, which indicates that the volume content of the water-dispersed-fine-grained suspension component for self-compacting powder-activated sand concrete should be in the range of 60 %. Only with a high content of water-dispersed-fine-grained suspension absolute self-flowing will be ensured.

From the obtained values of the conditional rheological criteria of powder-activated concretes, it follows that all of them are much greater than unity and characterize a significant excess of the volumes of rheological matrices over the volumes of fine-grained, coarse-grained components that fit they hold with large separation of particles and grains.

Keywords: decorative concrete, granular texture, powder activation, rheological properties, volumetric concentrations of matrices, matrices of various kinds, excess ratios

Введение

Известно, что наиболее эффективным показателем конкурентоспособности продукции является уровень качества, который складывается из технического состояния продукции и полезности товара для потребителя через функциональные, социальные, эстетические, эргоэкономические, экологические свойства [1–8]. Качество выражает потребительские свойства изделий, выявляемые в процессе потребления. В современном бетоноведении предъявляются высокие требования к качеству бетонных и железобетонных изделий, что достигается за счет применения передовых физико-химических и технологических знаний при создании новых материалов, а также уточнения уже имеющихся или введения новых характеристик материала, позволяющих совершенствовать методы проектирования и расчета конструкций и технологии их производства и тем самым более полно использовать конструкционные возможности бетона [9–14]. Для упрощения процедуры оценки качества, выражая его единым обобщенным показателем, применяют различные методы. Наиболее часто для подбора состава строительных материалов используются многопараметрическая оптимизация и методология квалиметрии [15, 16].

В последние годы в отечественной и мировой практике широкое применение нашли самоуплотняющиеся бетонные смеси, отличающиеся высокой удобоукладываемостью без применения вибрационного воздействия [17–24]. Современное строи-

тельство уже невозможно представить без их использования. Благодаря своим уникальным реологическим свойствам, таким, как хорошая текучесть, высокая устойчивость к расслоению и эффективное удаление воздуха, самоуплотняющийся бетон активно применяется в первую очередь в тех областях строительства, где использование вибрации при формировании железобетонных конструкций вызывает определенные технические сложности, например при проведении работ в жилых районах, где существуют жесткие требования к шумоизоляции, а также при формировании изделий с высокой плотностью арматуры или сложной геометрией. Раньше при производстве железобетонных изделий для удобоукладываемости бетонной смеси в формы использовались вибраторы, которые служили источником постоянного шума, а для более быстрого затвердения применялась технология пропаривания, что влекло за собой значительные расходы на дорогостоящее оборудование. Производство самоуплотняющихся составов бетонных смесей менее затратное; к настоящему времени разработано большое количество различного вида оборудования как для их приготовления, так и для укладки [25].

Актуальными являются исследования, направленные на получение строительных материалов и изделий с новыми свойствами, например обеспечивающих экологическую безопасность; расширение использования добавок, придающих поверхностям специальные свойства, и т.д. Среди них известны химически стойкие, биостойкие, самоочищающиеся декоративные и другие изделия и покрытия [26–30]. Одной из эффективных технологий для внедрения в строительстве также является 3D-печать, осуществляемая методом послойной экструзии в соответствии с заданной трехмерной цифровой моделью [31, 32].

С применением инновационных технологий могут быть изготовлены разнообразные материалы и изделия архитектурно-строительного назначения с улучшенными декоративными свойствами. Декоративные бетоны с зернистой фактурой поверхности могут быть получены с применением бросовых отсевов камнедробления карьеров, которых накопилось в стране более 6 млрд т, из них можно получить все высоко- и тонкодисперсные наполнители и песок-заполнитель.

Вопросам подбора составов бетона с рациональным расходом вяжущего посвящено большое количество работ [33–37]. В бетонах оптимальной структуры необходимо, чтобы цементным тестом была не только покрыта поверхность зерен заполнителя, но и заполнены оставшиеся пустоты между ними. Для этого используется принцип последовательного заполнения пустот, согласно которому зерна более мелких фракций попадают в пустоты между зернами крупного заполнителя, не вызывая его раздвижку [38]. Известно, что с уменьшением пустотности между зернами мелкого заполнителя (песок) сокращается расход вяжущего, а прочность раствора повышается [39–41].

Одним из наиболее эффективных способов регулирования реологических свойств и агрегатной устойчивости цементных композитов, в том числе декоративных, является применение веществ, обладающих поверхностной активностью на границе твердое тело – раствор. В промышленности строительных материалов эти вещества получили название пластификаторов и суперпластификаторов (СП). Введение пластифицирующих добавок способствует увеличению прочности цементного камня за счет снижения величины водоцементного отношения [42–44].

Из основ физической химии следует, что в бетонной смеси необходимо иметь достаточное количество высококонцентрированной водно-дисперсной смеси (матрицы), которую с помощью пластификатора можно превратить из агрегативно-неустойчивой в агрегативно-устойчивую. При этом следует руководствоваться основным правилом: увеличение объема дисперсной фазы обеспечивается без увеличения расхода цемента, а добавлением порошкового наполнителя в количестве 40–70 %, а в малоцементном бетоне – до 90–100 % [45–47]. При таком высоком содержании дисперсного порошка, например молотого кварцевого песка, возрастает объем водно-цементно-минеральной смеси и достигается высокое разжижающее действие СП. При

этом также необходимо руководствоваться предельными значениями объемной концентрации твердой фазы C_V:

$$C_V = \frac{V_{\text{ТВ}}}{V_{\text{ТВ}} + V_{\text{В}}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{ТВ}}$ – объем твердой фазы – цемента, молотого песка, тонкого песка, песка-заполнителя, щебня; $V_{\text{В}}$ – объем воды.

Калашников В.И. считает, что важной задачей при выборе минеральных добавок в качестве микронаполнителей цементных бетонов является определение не только их реотехнологической активности в сравнении с цементными системами, но и реакционной активности по отношению к цементным системам с точки зрения связывания гидролизной извести, выделяющейся при гидратации цемента, и возможности образования контактов срастания по бездефектным поверхностям микрокристаллов, формирующихся на поверхности гидратирующихся частиц цемента и микронаполнителя.

На первоначальном этапе подбора состава бетона необходима оценка реотехнологических свойств компонентов на предмет их разжижаемости с помощью различных суперпластификаторов не только индивидуальных цементных и минеральных суспензий, но и их композиций.

Цель и задачи исследований

Целью исследований является подбор составов декоративно-отделочных порошково-активированных бетонов с зернистой фактурой поверхности по реологическим свойствам.

Задачи исследований:

1. Осуществить анализ литературы по бетонам нового поколения с выделением структурных и реотехнологических свойств порошково-активированных бетонов.
2. Подобрать компоненты для формирования порошково-активированных бетонов с учетом минимизации стоимости, обеспечения требуемой визуальной картины зернистой фактуры поверхности бетона, обеспечения высокой реологии бетонных смесей на основе выбранных компонентов.
3. Произвести расчет структурных и реотехнологических показателей декоративно-отделочных порошково-активированных бетонов и выбрать оптимальные составы по технологическим свойствам.
4. Выполнить экспериментальные исследования порошково-активированных бетонов в зависимости от вида применяемого суперпластификатора с использованием различных наполнителей.
5. Определить объемы различных матриц, объемные содержания водно-дисперсной, водно-дисперсно-тонкозернистой и растворной составляющих, относительные избытки объемов условных реологических матриц в декоративных порошково-активированных бетонах.

Материалы и методы

В настоящих исследованиях были изучены реотехнологические свойства цементных композитов нескольких видов и нескольких видов дисперсных наполнителей в суспензиях, пластифицированных пластификаторами различного типа. Подбор компонентов осуществлялся с учетом совокупности следующих параметров: стоимости компонентов, обеспечения требуемой визуальной картины зернистой фактуры поверхности бетона, обеспечения высокой реологии бетонных смесей на основе выбранных компонентов.

Наполнителями и заполнителями, в том числе вышеуказанного типа, служили: в качестве тонкодисперсного компонента, повышающего объем реологической матрицы I ряда, – микрокварц Лебединского горно-обогатительного комбината, а в качестве

наполняющих компонентов, в том числе обеспечивающих зернистую фактуру поверхности, – отсевы дробления гранита фр. 0–5,0 мм и купершлак фр. 0–2,5 мм. Вяжущим служил египетский белый цемент (СЕМ 52,5). В качестве ГП применялись материалы как отечественного (Хидетал γ-9), так и зарубежного (Melflux 1641) производства.

Стоит отметить, что под оценкой реотехнологических свойств подразумеваются исследования инженерных свойств бетонных смесей, что дает представление о консистенции, удобоукладываемости, текучести бетонных смесей, и не предусматривается определение классических показателей реологии: пластической вязкости, предельного напряжения – сдвига, периода релаксации и ретардации напряжений и т.п.

Для определения реотехнологических показателей бетонной смеси нами был использован стандартный конус (ГОСТ 10181–2014).

При многообразии экспериментов были предложены четыре состава с оптимизированными реологическими матрицами по содержанию цемента, микрокварца (песка молотого), тонкого песка фр. 0–0,63 мм и песка-заполнителя фр. 0,63–2,5 мм и фр. 0,63–5,0 мм.

Исследуемые составы, различающиеся видом суперпластификатора и количественным содержанием наполняющих компонентов, приведены в табл. 1–4. Здесь же указаны кроме массовых содержаний объемное содержание компонентов, а также осадки стандартного конуса.

Таблица 1

Реотехнологические свойства декоративных порошково-активированных песчаных бетонов. Состав № 1

Наименование компонентов	Дисперсно-фракционный состав	На 1 м^3, кг	Объем на 1 м^3, л	В/Ц, В/Т	P кг/м^3	$\frac{П_М}{Ц}$	$\frac{П_Т}{Ц}$	$\frac{П_З}{Ц}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Цемент 600 ДО Египетский	3800 см^2/г	500	161	0,4	$P_{вл}$ 1 сутки 2420	0,6	1,3	1,97
Melflux 1641 0,9 % от Ц	—	4,5	3			$\frac{\sum П}{Ц} = 3,916$		
Микрокварц (песок молотый)	3400 см^2/г	300	113	0,081	$P_{теор}$ 2431	$И^{ВД}_{П_Т} = 1,889$ $И^{ВДП_Т}_{П_З} = 1,971$		
Отсев камнедробления гранитный	0-0,63 мм	416	154					
					$K_{уп}$ 0,995	$V_{ВД} = 474$ $V_{ВДП_Т} = 724,9$ $V_{раст} = 1092,7$ $C^V_{ВД} = 43,28$ % $C^V_{ВДП_Т} = 66,18$ % $C^V_{раст} = 99,76$ %		
	0,63-5,0 мм	864	319					
Купершлак	0-0,63 мм	252	96,9					
				ОК$_{ст}$= =28,5 см				
	0,63-2,5 мм	126	48,4					
$\sum M_{сух}$ $\sum V_{сух}$ Вода	—	2462,5 — 200	— 895,3 200					
$M_{б.с}$		2662,5	—					
$V_{б.с}$		—	1095,3					

Таблица 2

Реотехнологические свойства декоративных порошково-активированных песчаных бетонов. Состав № 2

Наименование компонентов	Дисперсно-фракционный состав	На 1 м^3, кг	Объем на 1 м^3, л	В/Ц, В/Т	P кг/м^3	$\frac{П_М}{Ц}$	$\frac{П_Т}{Ц}$	$\frac{П_З}{Ц}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Цемент 600 ДО Египетский	3800 см^2/г	500	161	0,56	$P_{вл}$ 1 сутки 2326	0,4	1,4	2,11
Хидетал γ-9 1,2 % от Ц	—	6	4,6			$\frac{\sum П}{Ц} = 3,916$		
Микрокварц (песок молотый)	3400 см^2/г	200	75,5	0,113	$P_{теор}$ 2335	$И_{П_т}^{ВД} = 1,97$ $И_{П_з}^{ВДП_т} = 1,98$		
Отсев камнедробления гранитный	0-0,63 мм	450	165					
					$K_{уп}$ 0,996	$V_{ВД} = 516,5$ $V_{ВДП_т} = 778,4$ $V_{раст} = 1170,8$ $C_{ВД}^{V} = 43,94$ % $C_{ВДП_т}^{V} = 66,19$ % $C_{раст}^{V} = 99,61$ %		
	0,63-5,0 мм	930	344					
Купершлак	0-0,63 мм	252	96,9					
				ОК$_{ст}$=11 см				
	0,63-2,5 мм	126	48,4					
$\sum M_{сух}$ $\sum V_{сух}$ Вода	—	2464 — 280	— 895,4 280					
$M_{б.с.}$		2744	—					
$V_{б.с.}$		—	1175,4					

Таблица 3

Реотехнологические свойства декоративных порошково-активированных песчаных бетонов. Состав № 3

Наименование компонентов	Дисперсно-фракционный состав	На 1 м^3, кг	Объем на 1 м^3, л	В/Ц, В/Т	P кг/м^3	$\frac{П_М}{Ц}$	$\frac{П_Т}{Ц}$	$\frac{П_З}{Ц}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Цемент 600 ДО Египетский	3800 см^2/г	500	161	0,4	$P_{вл}$ 1 сутки 2415	0,4	1,4	2,1 1
Melflux 1641 0,9 % от Ц	—	4,5	3			$\frac{\sum П}{Ц} = 3,916$		
Микрокварц (песок молотый)	3400 см^2/г	200	75,5	0,081	$P_{теор}$ 2434	$И_{П_т}^{ВД} = 1,67$		

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Отсев камнедробления гранитный	0-0,63 мм	450	165			$И_{П_з}^{ВДП_т} = 1,78$		
	0,63-5,0 мм	930	344		$K_{уп}$ 0,992	$V_{ВД} = 436,5$ $V_{ВДП_т} = 698,4$ $V_{раст} = 1090,8$ $C_{ВД}^{V} = 39,91$ % $C_{ВДП_т}^{V} = 63,85$ % $C_{раст}^{V} = 99,73$ %		
Купершлак	0-0,63 мм	252	96,9					
				ОК$_{ст}$= =27,4 см				
	0,63-2,5 мм	126	48,4					
$\sum M_{сух}$ $\sum V_{сух}$ Вода	—	2462,5 — 200	— 893,8 200					
$M_{б.с.}$		2662,5	—					
$V_{б.с.}$		—	1093,8					

Таблица 4

Реотехнологические свойства декоративных порошково-активированных песчаных бетонов. Состав № 4

Наименование компонентов	Дисперсно-фракционный состав	На 1 м^3, кг	Объем на 1 м^3, л	В/Ц, В/Т	P кг/м^3	$\frac{П_М}{Ц}$	$\frac{П_Т}{Ц}$	$\frac{П_З}{Ц}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Цемент 600 ДО Египетский	3800 см^2/г	500	161	0,42	$P_{вл}$ 1 сутки 2395	0,4	1,4	2,11
Melflux 1641 0,4 % от Ц	—	2	1,5			$\frac{\sum П}{Ц} = 3,912$		
Хидетал γ-9 0,6 % от Ц	—	3	2,5					
Микрокварц (песок молотый)	3400 см^2/г	200	75,5	0,085	$P_{теор}$ 2418	$И_{П_т}^{ВД} = 1,7$ $И_{П_з}^{ВДП_т} = 1,81$		
Отсев камнедробления гранитный	0-0,63 мм	448	165					
	0,63-5,0 мм	930	344		$K_{уп}$ 0,990	$V_{ВД} = 446,5$ $V_{ВДП_т} = 708,4$ $V_{раст} = 1100,8$ $C_{ВД}^{V} = 40,41$ % $C_{ВДП_т}^{V} = 64,12$ % $C_{раст}^{V} = 99,64$ %		
Купершлак	0-0,63 мм	252	96,9					
				ОК$_{ст}$= =10,2 см				
	0,63-2,5 мм	126	48,4					
$\sum M_{сух}$ $\sum V_{сух}$ Вода	—	2461 — 210	— 894,8 210					
$M_{б.с}$		2671	—					
$V_{б.с}$		—	1104,8					

Были рассчитаны объемы различных матриц, объемные содержания водно-дисперсной, водно-дисперсной тонкозернистой и растворной составляющих в бетонах нового поколения. Эти результаты также приведены в табл. 1–4. Технология расчета показателей приводится ниже.

Расчет структурных и реотехнологических показателей декоративно-отделочных порошково-активированных бетонов

Расчет структурных и реотехнологических показателей декоративно-отделочных порошково-активированных бетонов нового поколения, а также относительных избытков объемов условных реологических матриц производится методами, предложенными В.И. Калашниковым.

Объемы различных матриц в зависимости от их типа будут рассчитываться по следующим формулам:

I рода: $$V_{\text{I}} = V_{\text{Ц}} + V_{\text{П}_{\text{М}}} + V_{\text{В}}; \quad (2)$$

II рода: $$V_{\text{II}} = V_{\text{I}} + V_{\text{П}_{\text{Т}}}; \quad (3)$$

III рода: $$V_{\text{III}} = V_{\text{II}} + V_{\text{П}_{\text{З}}}, \quad (4)$$

где $V_{\text{Ц}}$ – объем цемента на 1000 л бетонной смеси; $V_{\text{П}_{\text{М}}}$ – объем микрокварца (песка молотого) на 1000 л; $V_{\text{В}}$ – объем воды на 1000 л; $V_{\text{П}_{\text{Т}}}$ – объем тонкого песка на основе отсевов камнедробления гранитного камня и купершлака фракции 0–0,63 мм на 1000 л; $V_{\text{П}_{\text{З}}}$ – объем песка-заполнителя на основе фракции 0,63–2,5 мм на 1000 л.

Объем бетонной смеси ($V_{\text{бет.см.}}$) составляет 1000 л.

Для сравнения вычисляются объемы матриц в бетоне старого поколения с приведенным выше составом:

I рода: $$V_{\text{I}} = V_{\text{Ц}} + V_{\text{В}}; \quad (5)$$

III рода: $$V_{\text{III}} = V_{\text{I}} + V_{\text{П}_{\text{Т}}}. \quad (6)$$

Были рассчитаны объемные содержания водно-дисперсной, водно-дисперсно-тонкозернистой растворной суспензионных составляющих в пластифицированных порошково-активированных щебеночных бетонах нового поколения. Оценка объемного содержания водно-дисперсной ($C^{V}_{\text{ВД}}$), водно-дисперсно-тонкозернистой ($C^{V}_{\text{ВДП}_{\text{Т}}}$) и растворной ($C^{V}_{\text{раст.}}$) суспензионных составляющих в пластифицированных порошково-активированных щебеночных бетонах нового поколения осуществлялась по формулам:

$$C^{V}_{\text{ВД}} = \frac{V_{\text{Ц}} + V_{\text{П}_{\text{М}}} + V_{\text{В}}}{V_{\text{бет.см.}}} \cdot 100\%; \quad (7)$$

$$C^{V}_{\text{ВДП}_{\text{Т}}} = \frac{V_{\text{Ц}} + V_{\text{П}_{\text{М}}} + V_{\text{В}} + V_{\text{П}_{\text{Т}}}}{V_{\text{бет.см.}}} \cdot 100\%; \quad (8)$$

$$C^{V}_{\text{раст}} == \frac{V_{\text{Ц}} + V_{\text{П}_{\text{М}}} + V_{\text{В}} + V_{\text{П}_{\text{Т}}} + V_{\text{П}_{\text{З}}}}{V_{\text{бет.см.}}} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Объемные концентрации исследованных бетонных смесей варьируют в следующих пределах: $C^V_{\text{ВД}}$ – от 39,91 до 43,94 %, $C^V_{\text{ВДП}_\text{Т}}$ – от 63,85 до 66,19 % и $C^V_{\text{раст}}$ – от 99,61 до 99,76 %.

Только у одной композиции в самоуплотняющихся смесях объемная концентрация водно-дисперсной суспензии практически составляет менее 40 %. Даже в смесях, жесткая консистенция которых обусловлена изменением содержания наполнителя, объемная концентрация водно-дисперсно-тонкозернистой суспензии составляет более 60 %. Во всех бетонных смесях оптимального состава объемная концентрация растворной составляющей одинакова и составляет гораздо более 60 %, что принципиально отличает разработанные бетоны от традиционных, в которых объемные концентрации $C^V_{\text{ВД}}$ и $C^V_{\text{раст.}}$ находятся в пределах 24–26 % и 54–57 % соответственно.

Для топологического анализа всех видов разработанных бетонов и традиционных бетонов старого поколения воспользуемся безразмерными реологическими критериями [44–47]. Для порошкового бетона первый критерий – относительный избыток объема условной реологической матрицы I рода $\text{И}^{\text{ВД}}_{\text{П}_\text{Т}}$, т.е. относительное превышение объема водно-дисперсной системы $V_{\text{ВД}}$ над абсолютным объемом тонкого песка $V_{\text{П}_\text{Т}}$, – вычисляется по формуле

$$И^{\text{ВД}}_{\text{П}_\text{Т}} = V_{\text{ВД}} \big/ V_{\text{П}_\text{Т}} = \left(V_{\text{Ц}} + V_{\text{П}_\text{М}} + V_{\text{В}}\right) \big/ V_{\text{П}_\text{Т}}\ , \qquad (10)$$

где $V_{\text{Ц}}$, $V_{\text{П}_\text{М}}$, $V_{\text{В}}$, $V_{\text{П}_\text{Т}}$ – абсолютные объемы соответственно цемента, воды, песка молотого, песка тонкого.

В порошково-активированных песчаных бетонах нового поколения имеются две реологические матрицы: водно-дисперсная матрица I рода и водно-дисперсно-тонкозернистая матрица II рода, включающая цемент, микрокварц (песок молотый), тонкий песок и воду. Тонкий песок в этой матрице участвует в реологическом процессе, обеспечивая в матрице I рода перемещение зерен песка-заполнителя. Последний располагается дискретно в матрице второго рода с обеспечением текучести системы без стерических препятствий. Относительный избыток объема реологической матрицы второго рода над абсолютным объемом песка-заполнителя $\text{И}^{\text{ВДП}_\text{Т}}_{\text{П}_\text{З}}$ вычисляется по формуле

$$\text{И}^{\text{ВДП}_\text{Т}}_{\text{П}_\text{З}} = V_{\text{ВДП}_\text{Т}} \big/ V_{\text{П}_\text{З}} = \left(V_{\text{Ц}} + V_{\text{П}_\text{М}} + V_{\text{В}} + V_{\text{П}_\text{Т}}\right) \big/ V_{\text{П}_\text{З}}\ , \qquad (11)$$

где $V_{\text{Ц}}$, $V_{\text{П}_\text{М}}$, $V_{\text{В}}$, $V_{\text{П}_\text{Т}}$, $V_{\text{П}_\text{З}}$ – абсолютные объемы соответственно цемента, песка молотого, воды, песка тонкого, песка-заполнителя.

Избыток реологической матрицы второго рода также обеспечивает необходимые расстояния между зернами песка-заполнителя. При узкой гранулометрии песка теоретический расчет расстояний может быть близок к реальному. При более широкой гранулометрии строится кривая распределения гранулометричекого состава и рассчитываются расстояния между зернами, находящимися в узких фракциях. Топологические картины размещения частиц в узких фракциях затем совмещаются в единую топологическую картину с алгоритмом максимизации свободного пространства. Однако такой подход относится к задачам компьютерного материаловедения, что, несомненно, может быть полезным для изучения топологии бетонов нового поколения и оптимизации гранулометрического состава компонентов.

Для бетонов старого поколения эти критерии могут быть не избытками объемов реологических матриц над объемами песка и щебня, а недостатками. Они рассчитываются по формулам:

$$\text{И}^{\text{ЦД}}_{\text{П}_\text{З}} = V_{\text{ЦД}} \big/ V_{\text{П}_\text{З}} = \left(V_{\text{Ц}} + V_{\text{В}}\right) \big/ V_{\text{П}_\text{З}}\ , \qquad (12)$$

$$И_{Щ}^{ЦДП} = V_{ЦДП} \big/ V_{Щ} = \left(V_{Ц} + V_{В} + V_{П_З}\right) \big/ V_{Щ} \,. \qquad (13)$$

Анализ экспериментальных результатов

Из результатов исследования следует, что с точки зрения реотехнологических показателей все составы показали достаточно высокое качество. По полученным в результате расчета значениям условных реологических матриц I и II рода наиболее качественными представляются составы 2 и 1, чуть менее качественными 4 и 3. Составы 2 и 1 являются самоуплотняющимися бетонами с осадкой конуса 27,4 и 28,5 см, что соответствует американскому стандарту SF2. Очевидна закономерность в достижении близких значений условных реологических матриц $\left(И_{П_Т}^{ВД}, И_{П_З}^{ВДП_Т}\right)$, равных соответственно 1,67–1,97 и 1,78–1,98. Это свидетельствует о том, что объемное содержание водно-дисперсно-тонкозернистой суспензионной составляющей ($C_{ВДТ}$) для самоуплотняющихся порошково-активированных песчаных бетонов должно быть в диапазоне 60 %. Только при высоком содержании водно-дисперсно-тонкозернистой суспензии будет обеспечиваться абсолютная саморастекаемость.

Различие составов 2 и 1 заключается в том, что в составе 1 повышен объем условной реологической матрицы I рода за счет большего количества микрокварца (300 кг/м^3) относительно состава 2 (200 кг/м^3). При сохранении суммы масс всех компонентов в составе 2 часть микрокварца заменяется отсевом камнедробления для большего насыщения зернистыми компонентами бетонной смеси и обеспечения целостной визуальной картины поверхности. В результате этого совсем незначительно падают реотехнологические и физико-технические показатели (см. табл. 1, 2). При этом в таких самоуплотняющихся бетонных смесях важно обеспечить агрегативную устойчивость и предотвратить седиментацию частиц.

Как видно из значений условных реологических критериев порошково-активированных бетонов, все они значительно больше единицы и характеризуют существенное превышение объемов реологических матриц над объемами тонкозернистых, грубозернистых компонентов, которые вмещаются в них с большими раздвижками частиц и зерен.

В бетоне старого поколения $И_I$<1, что свидетельствует о недостатке объема цементно-водного теста (матрицы I рода), и такая бетонная смесь будет жесткой или малопластичной.

Выводы

1. В последние годы в отечественной и мировой практике широкое применение нашли самоуплотняющиеся бетонные смеси, отличающиеся высокой удобоукладываемостью без применения вибрационного воздействия.С применением инновационных технологий могут быть изготовлены разнообразные материалы и изделия архитектурно-строительного назначения с улучшенными декоративными свойствами.

2. Из основ физической химии следует, что в бетонной смеси необходимо иметь достаточное количество высококонцентрированной водно-дисперсной смеси (матрицы), которую с помощью пластификатора можно превратить из агрегативно-неустойчивой в агрегативно-устойчивую. При этом следует руководствоваться основным правилом: увеличение объема дисперсной фазы обеспечивается без увеличения расхода цемента, а добавлением порошкового наполнителя в количестве 40–70 %, а в малоцементном бетоне – до 90–100 %.

3. Проведены исследования по подбору составов декоративно-отделочных бетонов с зернистой фактурой поверхности по реологическим свойствам. Вяжущим служил египетский белый цемент, в качестве микронаполнителя использовался микрокварц, а тонкого песка – отсевы дробления гранита и купершлак фр. 0–0,63 мм, и эти же компоненты – в качестве песка-заполнителя фр. 0,63–5 мм и 0,63–2,5 мм. Смеси пластифицировались суперпластификаторами нового поколения отечествен-

ного и зарубежного производства. На первоначальном этапе подбора состава бетона необходима оценка реотехнологических свойств компонентов на предмет их разжижаемости с помощью различных суперпластификаторов не только индивидуальных цементных и минеральных суспензий, но и их композиций.

4. Определены структурные и реотехнологические показатели порошково-активированных бетонов: объемы различных матриц, объемные содержания водно-дисперсной, водно-дисперсно-тонкозернистой и растворной составляющих, относительные избытки объемов условных реологических матриц в декоративных порошково-активированных бетонах.

5. Из результатов исследования следует, что с точки зрения реотехнологических показателей наиболее качественными представляются составы 2 и 1. Эти два состава являются самоуплотняющимися бетонами с осадкой конуса 27,4 и 28,5 см, что соответствует американскому стандарту SF2. Очевидна закономерность в достижении близких значений условных реологических матриц ($И^{ВД}_{П_Т}$, $И^{ВДП_Т}_{П_З}$), равных соответственно 1,67–1,97 и 1,78–1,98. Это свидетельствует о том, что объемное содержание водно-дисперсно-тонкозернистой суспензионной составляющей ($C_{ВДТ}$) для самоуплотняющихся порошково-активированных песчаных бетонов должно быть в диапазоне 60 %. Только при высоком содержании водно-дисперсно-тонкозернистой суспензии будет обеспечиваться абсолютная саморастекаемость.

6. Различие составов 2 и 1 заключается в том, что в составе 1 повышен объем условной реологической матрицы I рода за счет большего количества микрокварца (300 кг/м^3) относительно состава 2 (200 кг/м^3). При сохранении суммы масс всех компонентов в составе 2 часть микрокварца заменяется отсевом камнедробления для большего насыщения зернистыми компонентами бетонной смеси и обеспечения целостной визуальной картины поверхности. В результате этого совсем незначительно падают реотехнологические и физико-технические показатели (см. табл. 1, 2). В таких самоуплотняющихся бетонных смесях важно обеспечить агрегативную устойчивость и предотвратить седиментацию частиц.

7. Все значения условных реологических критериев порошково-активированных бетонов значительно больше единицы и характеризуют существенное превышение объемов реологических матриц над объемами тонкозернистых, грубозернистых компонентов, которые вмещаются в них с большими раздвижками частиц и зерен.

8. В бетоне старого поколения $И_I<1$, что свидетельствует о недостатке объема цементно-водного теста (матрицы I рода), и такая бетонная смесь будет жесткой или малопластичной.

Список литературы

1. Интеллектуальный динамичный бетон / Б. Барраган, Х. Ронсеро, Р. Магаротто [и др.] // CP1 Междунар. бетон.пр-во. – 2011. – №2.– С. 58–67.

2. Антонов, В.Б. Концепция «Микозы как антропогенно-очаговые заболевания»: теоретическое и практическое значение / В.Б. Антонов // Проблемы мед.экологии. – 2005. – Т. 7, № 2. – С. 43.

3. Слепян, Э.И. Экологический риск / Э.И. Слепян// Регон. экология. – 2002. – № 1–2. – С. 62–82.

4. Баженов, Ю.М. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы / Ю.М. Баженов, Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // Строит.материалы. – 2014. – № 3. – С. 6–14.

5. Вильдяева, М.В. Влияние биоповреждений в зданиях на здоровье человека / М.В. Вильдяева // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. – С. 351–354.

6. Противодействие биоповреждениям на этапах строительства, эксплуатации и ремонта в жилых и производственных помещениях / В.Т. Ерофеев, Д.А. Светлов,

С.В. Казначеев [и др.] ; под общ. ред. акад. РААСН В. Т. Ерофеева. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. − 172 с.

7. Ерофеев, В.Т. Экономическая эффективность повышения долговечности строительных конструкций / В.Т. Ерофеев, А.В. Дергунова // Строительные материалы. – 2008. – № 2. – С. 88–89.

8. Казначеев, В.Н. Экология человека. Основные проблемы / В.Н. Казначеев. – М.: Наука, 1988. – 32 с.

9. Чернышов, Е.М. Приложения нанохимии в технологии твердофазных строительных материалов: научно-инженерная проблема, направления и примеры реализации / Е.М. Чернышов, О.В. Артамонова, Д.Н. Коротких [и др.] // Строит. материалы.– 2008. – № 2. – С. 32–36.

10. Калашников, В.И. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов // Изв. вузов. Стр-во. – 2016. – № 4. – С. 38–37.

11. Ушеров-Маршак, А.В. Бетоноведение: современные этюды / А.В. Ушеров-Маршак. – Харьков : Раритеты Украины, 2016. – 135 с.

12. Прочность и параметры разрушения цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.П. Скачков. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. – 360 с.

13. Структура и конструкционная прочность цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.П. Скачков. – М.: Изд-во АСВ, 2017. – 400 с.

14. Меры ползучести высокопрочных мелкозернистых бетонов на основе МБ / Н.И. Карпенко, С.С. Каприелов, Е.Н. Кузнецов [и др.] // Вестн. Отд-ния строит. наук РААСН. – 2004. – Вып. 8. – С. 203–214.

15. Ушеров-Маршак, А.В. Калориметрия цемента и бетона: Избр. тр. / А.В. Ушеров-Маршак. – Харьков: Факт, 2002. – 183 с.

16. Тихомиров, В.Б. Планирование и анализ эксперимента / В.Б. Тихомиров. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 263 с.

17. Калашников, В.И. Влияние вида супер- и гиперпластификаторов на реотехнологические свойства цементно-минеральных суспензий, порошковых бетонных смесей и прочностные свойства бетонов / В.И. Калашников, Е.В. Гуляева, Д.М. Валиев // Изв. вузов. Стр-во. – 2011. – № 12. – С. 40–45.

18. Каприелов, С.С. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона / С.С. Каприелов, А.В. Шенфельд, Ю.Р. Кривобородов // Бетон и железобетон. – 1992. – № 7. – С. 4–7.

19. Каприелов, С.С. Комплексный модификатор бетона марки МБ-01 / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, В.Г. Батраков // Бетон и железобетон. –1997.– № 5.– С. 38–41.

20. Каприелов, С.С. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций / С.С. Каприелов, И.А. Чилин // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: науч. тр. III Всерос. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону: в 7 т. – М.: МГСУ, 2014. – Т. 3. – С. 158–164.

21. Новые модифицированные бетоны в конструкциях высотных зданий / С.С. Каприелов, А.В. Шенфельд, Г.С. Кардумян // II Международный форум архитектуры, строительства, реконструкции городов, строительных технологий и материалов (11–13 нояб. 2008 г., Москва). – М., 2008. – С. 29–38.

22. Самоуплотняющийся бетон с мелкоизмельченным карбонатом кальция / И.Пайарес, Х. Барбара, Б. Барраган, Г. Рамос // Междунар. бетон.пр-во. – 2012. – № 1. – С. 34–38.

23. Самоуплотняющиеся бетоны с низким удельным расходом цемента на единицу прочности бетона / Е.В. Гуляева, С.В. Аксенов, И.В. Ерофеева, В.И. Калашников // Наука и инновации. Строительство и архитектура : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф.: в 23 т. – София, 2014. – Т. 10. – С.38–40.

24. Якунин, Ю.И. Производство самоуплотняющегося бетона с помощью оборудования «SKAKOA/S» / Ю.И. Якунин // Технологии бетонов. – 2008. – №4. – С. 38–39.

25. The effect of titanium dioxide sol stabilizer on the properties ofphotocatalytic composite material / M.V.Antonenko, Y.N. Ogurtsova, V.V. Strokova, E.N. Gubareva // S.V. Klyuev[et al.] (eds.). BUILDINTECH BIT. – 2020. – LNCE95. – P. 16–22. – Doi:10.1007/978-3-030-54652-6_3 (Scopus).

26. Connection of water permeability with a number of physical properties of polymers / A.A. Askadskii, T.V. Zhdanova, I.F. Andreev [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 263, art. 01022.

27. Superplasticizer effect on cement paste structure and concrete freeze-thaw resistance / K.V. Shuldyakov, L.Ya. Kramar, B.Ya.Trofimov, I.M. Ivanov // Advanced Materials in Technology and Construction (AMTC-2015): AIP Conference Proceedings. – 2016. – 1698. – P. 070011–1–070011–6.

28. Биологическое сопротивление бетонов / В.И. Соломатов, В.Т. Ерофеев, В.И. Смирнов [и др.]. – Саранск: Изд-во Морд. ун-та, 2001. – 196 с.

29. Защита зданий и сооружений от биоповреждений биоцидными препаратами на основе гуанидина / под ред. П.Г. Комохова, В.Т. Ерофеева, Г.Е. Афиногентова. – СПб.: Наука, 2010. – 192 с.

30. Mukhametrakhimov, R. Influenceofthetechnological properties of cement-sand mortar on the quality of 3D printed products / R. Mukhametrakhimov, L. Lukmanova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 890. – P. 012082.

31. Ерофеев, В.Т. Эпоксидный композит с углеродными структурами ваддитивной технологии изготовления изделий для текстильной промышленности / В.Т. Ерофеев, Т.Ф. Ельчищева, М.В. Макарчук// Технология текстильной промышленности. – 2022. – № 2 (398). – С. 346–354.

32. Фаликман, В.Р. Нормативные сроки службы бетонных и железобетонных конструкций и принципы их проектирования по параметрам долговечности / В.Р. Фаликман, В.Ф. Степанова // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 6. – С. 13–22.

33. Хархардин, А.Н. Критический размер микро- и наночастиц, при котором проявляются их необычные свойства / А.Н. Хархардин, В.В. Строкова, М.И. Кожухова // Изв. вузов. Стр-во. – 2012. – № 10. – С. 109–115.

34. Чернышов, Е.М. Модифицирование структуры цементного камня микро- и наноразмерными частицами кремнезема (вопросы теории и приложений) / Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // Строит. материалы, оборудование и технологии XXI века. – 2008. – № 5. – С. 30–32.

35. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементных бетонов / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховской, М. И. Бруссер. – М.: Стройиздат, 1983. – 254 с.

36. Калашников, В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2008. – № 10. – С. 4–6.

37. Охотин, В.В. Лабораторные опыты по составлению дорожных грунтовых смесей по принципу наименьшей пористости / В. В. Охотин. – М.: Транспечать, 1928. – 32 с.

38. Баженов, В.К. К вопросу подбора состава бетона с рациональным расходом вяжущего / В.К. Баженов // Технологии бетонов. – 2008. – № 4. – С. 60–61.

39. Белов, В.В. Методология проектирования оптимальных структур цементных бетонов / В.В. Белов, И.В. Образцов, П.В. Куляев // Строит. материалы. – 2013. – № 3. – С.17–21.

40. Армополимербетон в транспортном строительстве / В.И. Соломатов, В.И. Клюкин, Л.Ф. Кочнева [и др.]. – М.: Транспорт, 1979. – 232 с.

41. Вовк, А.И. Суперпластификаторы в бетоне: анализ химии процессов / А.И. Вовк // Технологии бетонов. – 2007. – № 2. – С. 8–9; № 3. – С. 12–14; № 4. – С. 8–9.

42. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами / В.И. Калашников, М.Н. Мороз, О.В. Тараканов [и др.] // Строит. материалы. – 2014. – № 9. – С. 70–75.

43. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – М.: Технопроект, 1998. – 768 с.

44. Бетоны нового поколения с низким удельным расходом цемента на единицу прочности / В.И. Калашников, С.В. Ананьев, В.Л. Хвастунов, М.Н. Мороз // Вестн. Отд-ния строит. наук. – 2010. – Вып. 14, т. 2. – С. 27–32.

45. Kalashnikov, V.I. Selecting the type of control setting composite cement-ash binder / V.I. Kalashnikov, E.A. Belyakova, R.N. Moskvin // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 1631–1635. Doi:10.1016/j.proeng.2016.07.143.

46. Калашников, В.И. Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения / В.И. Калашников // Бетон и железобетон. – 2012. – № 1. – С. 82.

47. Калашников, В.И. Что такое порошково-активированный бетон нового поколения / В.И. Калашников // Строит.материалы. – 2012. – № 10.– С. 70–71.

References

1. Intelligent dynamic concrete / B. Barragan, X. Roncero, R. Magarotto [et al.] // SR1 Intern. concrete.pr-in. – 2011. – No. 2. – P. 58–67.

2. Antonov, V.B. The concept of “Mycoses as anthropogenic focal diseases”: theoretical and practical significance / V.V. B. Antonov // Problems of medical ecology. – 2005. – Vol. 7, No. 2. – P. 43.

3. Slepyan, E.I. Ecological risk / E.I. Slepyan// Regon. ecology. – 2002. – No. 1–2. – P. 62–82.

4. Bazhenov, Yu.M. Structural materials design: defining principles and technological platforms / Yu.M. Bazhenov, E.M. Chernyshov, D.N. Korotkikh. – 2014. – No. 3. – P. 6–14.

5. Vildyaeva, M.V. Influence of biodamages in buildings on human health / M.V. Vildyaeva // Actual issues of architecture and construction: materials of the XV Intern. sci.-tech. conf. – Saransk: Publishing House of Mordov. un-ta, 2017. – P. 351–354.

6. Counteraction to biodamage at the stages of construction, operation and repair in residential and industrial premises: textbook / V.T. Erofeev, D.A. Svetlov, S.V. Kaznacheev [and others]; under total ed. acad. RAASN V.T. Erofeeva. – Saransk: Publishing House of Mordov. un-ta, 2017. – 172 p.

7. Erofeev, V.T. Economic efficiency of increasing the durability of building structures / V.T. Erofeev, A.V. Dergunova // Building materials. – 2008. – No. 2. – P. 88–89.

8. Kaznacheev, V.N. Human Ecology. Main problems / V.N. Kaznacheev. – M.: Nauka, 1988. – 32 p.

9. Chernyshov, E.M. Applications of nanochemistry in the technology of solid-phase building materials: scientific and engineering problem, directions and examples of implementation / E.M. Chernyshov, O.V. Artamonova, D.N. Korotkikh [et al.] // Building materials. – 2008. – No. 2. – P. 32–36.

10. Kalashnikov, V.I. Suspension-filled concrete mixes for powder-activated concretes of a new generation / V.I. Kalashnikov, V.T. Erofeev, O.V. Tarakanov // Izv. universities. Construction. – 2016. – No. 4. – P. 38–37.

11. Usherov-Marshak, A.V. Concrete science: modern studies / A.V. Usherov-Marshak. – Kharkov: Rarities of Ukraine, 2016. – 135 p.

12. Strength and fracture parameters of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Yu.P. Skachkov. – Saransk: Mordov Publishing House. un-ta, 2015. – 360 p.

13. Structure and structural strength of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Yu.P. Skachkov. – M.: Izd. ACB, 2017. – 400 p.

14. Karpenko, N.I. Creep measures for high-strength fine-grained concretes based on MB / N.I. Karpenko, S.S. Kaprielov, E.N. Kuznetsov // Vestn. The department is building. Sciences RAASN. – 2004. – Iss. 8. – P. 203–214.

15. Usherov-Marshak, A.V. Calorimetry of cement and concrete: Izbr. tr. / A.V. Usherov-Marshak. – Kharkov: Fact, 2002. – 183 p.

16. Tikhomirov, V.B. Planning and analysis of the experiment / V.B. Tikhomirov. – M.: Light industry, 1974.– 263 p.

17. Kalashnikov, V.I. Influence of the type of super- and hyperplasticizers on the rheotechnological properties of cement-mineral suspensions, powder concrete mixtures and strength properties of concretes / V.I. Kalashnikov, E.V. Gulyaeva, D.M. Valiev // Izv. universities. Construction – 2011. – No. 12. – P. 40–45.

18. Kaprielov, S.S. Influence of the structure of cement stone with microsilica and superplasticizer additives on the properties of concrete / S.S. Kaprielov, A.V. Shenfeld, Yu.R. Krivoborodov. – 1992. – No. 7. – P. 4–7.

19. Kaprielov, S.S. Complex concrete modifier brand MB-01 / S.S. Kaprielov, A.V. Sheinfeld, V.G. Batrakov // Concrete and reinforced concrete. – 1997. – No. 5. – P. 38–41.

20. Kaprielov, S.S. Ultra-high-strength self-compacting fibrous concrete for monolithic structures / S.S. Kaprielov, I.A. Chilin // Concrete and reinforced concrete – a look into the future: scientific. tr. III All-Russian. (II Intern.) Conf. on concrete and reinforced concrete: in 7 vols. – M.: MGSU, 2014. – Vol. 3. – P. 158–164.

21. New modified concretes in the structures of high-rise buildings / S.S. Kaprielov, A.V. Shenfeld, G.S. Kardumyan // II International Forum of Architecture, Construction, Urban Reconstruction, Building Technologies and Materials (November 11–13. 2008, Moscow). – M., 2008. – P. 29–38.

22. Self-compacting concrete with finely ground calcium carbonate / I. Piares, J. Barbara, B. Barragan, G. Ramos // Intern. concrete.pr-in. – 2012. – No. 1. – P. 34–38.

23. Gulyaeva? E.V. Self-compacting concretes with low specific consumption of cement per unit of concrete strength / E.V. Gulyaeva, S.V. Aksenov, I.V. Erofeeva, V.I. Kalashnikov // Science and Innovations. Building and architecture: materials of the XII Intern. scientific-practical. conf. : in 23 volumes. – Sofia, 2014. – Vol. 10. – P.38–40.

24. Yakunin, Yu. I. Production of self-compacting concrete with the help of equipment "SKAKOA/S" / Yu. I. Yakunin // Tekhnologii betonov. – 2008. – No. 4. – P. 38–39.

25. The effect of titanium dioxide sol stabilizer on the properties ofphotocatalytic composite material / M.V. Antonenko, Y.N. Ogurtsova, V.V. Strokova, E.N. Gubareva; S.V. Klyuev [et al.] (eds.). BUILDINTECH BIT. – 2020. – LNCE95. – P. 16–22. – Doi:10.1007/978-3-030-54652-6_3 (Scopus).

26. Connection of water permeability with a number of physical properties of polymers / A.A. Askadskii, T.V. Zhdanova, I.F. Andreev[et al.]// E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 263, art. 01022.

27. Superplasticizer effect on cement paste structure and concrete freeze-thaw resistance / K.V. Shuldyakov, L.Ya. Kramar, B.Ya.Trofimov, I.M. Ivanov // Advanced Materials in Technology and Construction (AMTC-2015): AIP Conference Proceedings. – 2016. – 1698. – P. 070011–1–070011–6.

28. Biological resistance of concretes / V.I. Solomatov, V.T. Erofeev, V I. Smirnov [and others]. – Saransk: Publishing house of the Mord.un, 2001. – 196 p.

29. Protection of buildings and structures from biodamage by biocidal preparations based on guanidine / ed. P.G. Komohova, V.T. Erofeeva, G.E. Afinogentov. – St. Petersburg: Nauka, 2010. – 192 p.

30. Mukhametrakhimov, R. Influenceofthetechnological properties of cement-sand mortar on the quality of 3D printed products / R. Mukhametrakhimov, L. Lukmanova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 890. – P. 012082.

31. Erofeev, V.T. Epoxy composite with carbon structures of additive manufacturing technology for the textile industry / V.T. Erofeev, T.F. Elchishcheva, M.V. Makarchuk // Technology of the textile industry. – 2022. – No. 2 (398). – P. 346–354.

32. Falikman, V.R. Normative terms of service of concrete and reinforced concrete structures and principles of their design in terms of durability / V.R. Falikman, V.F. Stepanova // Industrial and civil construction. – 2019. – No. 6. – P. 13–22.

33. Kharkhardin, A.N. Critical size of micro- and nanoparticles at which their unusual properties are manifested / A.N. Kharkhardin, V.V. Strokova, M.I. Kozhukhova // Izv. universities. Construction. – 2012. – No. 10. – P. 109–115.

34. Chernyshov, E.M. Modifying the structure of cement stone with micro- and nanosized particles of silica (questions of theory and applications) / E.M. Chernyshov, D.N. Korotkikh // Stroit. materials, equipment and technologies of the XXI century. – 2008. – No. 5. – P. 30–32.

35. Sheikin, A.E. Structure and properties of cement concrete / A.E. Sheikin, Yu.V. Chekhovskoy, M.I. Brusser. – M.: Stroyizdat, 1983. – 254 p.

36. Kalashnikov, V.I. Calculation of compositions of high-strength self-compacting concretes / V.I. Kalashnikov // Building materials. – 2008. – No. 10. – P. 4–6.

37. Okhotin, V.V. Laboratory experiments on the preparation of road soil mixtures according to the principle of least porosity / V.V. Okhotin. – M.: Transpechat, 1928. – 32 p.

38. Bazhenov, V.K. On the issue of selecting the composition of concrete with a rational consumption of binder / V.K. Bazhenov // Tekhnologii betonov. – 2008. – No. 4. – P. 60–61.

39. Belov, V.V. Methodology for designing optimal structures of cement concretes / V.V. Belov, I.V. Obraztsov, P.V. Kulyaev // Stroit. materials. – 2013. – No. 3. – P.17–21.

40. Reinforced polymer concrete in transport construction / V.I. Solomatov, V.I. Klyukin, L.F. Kochneva [et al.]. – M.: Transport, 1979. – 232 p.

41. Vovk, A.I. Superplasticizers in concrete: analysis of process chemistry / A.I. Vovk // Tekhnologii betonov. – 2007. – No. 2. – P. 8–9; No. 3. – P. 12–14; No. 4. – P. 8–9.

42. New ideas about the mechanism of action of superplasticizers co-milled with cement or mineral rocks / V.I. Kalashnikov, M.N. Moroz, O.V. Tarakanov [et al.] // Stroit. materials. – 2014. – No. 9. – P. 70–75.

43. Batrakov, V.G. Modified concretes. Theory and practice / V.G. Batrakov. – M.: Technoproekt, 1998. – 768 p.

44. Kalashnikov, V.I. Concrete of a new generation with low specific consumption of cement per unit of strength / V.I. Kalashnikov, S.V. Ananiev, V.L. Khvastunov, M.N. Moroz // Vestn. The department is building. Sciences. – 2010. – Issue. 14, vol. 2. – P. 27–32.

45. Kalashnikov, V.I. Selecting the type of control setting composite cement-ash binder / V.I. Kalashnikov, E.A. Belyakova, R.N. Moskvin // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 1631–1635. Doi:10.1016/j.proeng.2016.07.143.

46. Kalashnikov, V.I. How to turn concretes of the old generation into high-performance concretes of the new generation / V.I. Kalashnikov // Concrete and reinforced concrete. – 2012. – No. 1. – P. 82.

47. Kalashnikov, V.I. What is powder-activated concrete of a new generation / V.I. Kalashnikov // Stroit. materialy. – 2012. – No. 10. – P. 70–71.

УДК 691.32:666.972.1 DOI 10.54734/20722958_2022_3_32

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
Россия, 430005, Саранск, ул. Большевистская, д. 68
Ерофеев Владимир Трофимович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы и технологии», академик РААСН
E-mail: Erofeevvt@bk.ru
Санягина Яна Андреевна, соискатель кафедры «Строительные материалы и технологии»
E-mail: sanyagina@mail.ru
Ерофеева Ирина Владимировна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Строительные материалы и технологии»
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д.28, тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77
Максимова Ирина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление качеством и технология строительного производства»
E-mail: maksimovain@mail.ru

Mordovian State University named after N.P. Ogarev
Russia, 430005, Saransk, 68, Bolshevistskaya St.
Erofeev Vladimir Trofimovich, Doctor of Sciences, Professor, Head of the Department «Building Materials and Technologies», Academician of the RAASN
E-mail: Erofeevvt@bk.ru
Sanyagina Yana Andreevna, Competitor of the department «Building materials and technologies»
E-mail: sanyagina@mail.ru
Erofeeva Irina Vladimirovna, Candidate of Sciences, Senior Researcher at the department of Building Materials and Technologies
E-mail: ira.erofeeva.90@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 «Management of quality and technology of construction production»
E-mail: maksimovain@mail.ru

ПРОЧНОСТЬ И МОРОЗОСТОЙКОСТЬ ДЕКОРАТИВНО-ОТДЕЛОЧНЫХ ПОРОШКОВО-АКТИВИРОВАННЫХ БЕТОНОВ С ЗЕРНИСТОЙ ФАКТУРОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.Т. Ерофеев, И.Н. Максимова, Я.А. Санягина, И.В. Ерофеева

Прочность как комплексная механическая характеристика, включающая сочетание критериев прочности, надежности и долговечности, является важнейшим параметром качества структуры бетона как активного и самого массового строительного материала конструкционного назначения. Значительное количество объектов строительства из бетона и железобетона возводится в южных и северных регионах, характеризующихся экстремальными природно-климатическими условиями. Здания и сооружения в условиях эксплуатации подвергаются циклическим механическим нагрузкам различного вида и климатическим воздействиям, характеризующимся циклическими проявлениями отрицательных и знакопеременных темпеатур. В этой связи являются актуальными исследования, направленные на создание декоративных конструкционных материалов, обладающих повышенной прочностью и плотностью, высокой морозостойкостью. Управление процессами структурообразования, плотностью структуры цементного бетона возможно за счет введения в бетонную смесь суперпластифицирующих и активных минеральных добавок. Целью исследований является подбор составов декоративно-отделочных порошково-активированных бетонов с зернистой фактурой поверхности по показателям прочности и морозостойкости. Для проведения эксперимента использовали портландцемент египетский белый, пластификатором служил препарат Melflux 1645, в качестве микронаполнителя – микрокварц, в качестве напол-

няющих компонентов, придающих изделиям декоративные свойства, – гранитные высевки и купершлак. При этом в качестве тонкого песка использовались фр. 0–0,63 мм, а песка-заполнителя применялись гранитные высевки фр. 0,63–5 мм и купершлак фр. 0,63–2,5 мм. Испытания на прочность и морозостойкость проводили в соответствии с действующими нормативными документами. В результате выполнения исследований выявлены высокие показатели прочности и морозостойкости декоративных порошково-активированных бетонов с зернистой фактурой поверхности.

Ключевые слова: декоративный бетон, зернистая фактура, порошковая активация, физико-механические свойства, прочность, морозостойкость

STRENGTH AND FROST RESISTANCE OF DECORATIVE AND FINISHING POWDER-ACTIVATED CONCRETE WITH GRAIN TEXTURE SURFACE

V.T. Erofeev, I.N. Maksimova, Ya.A. Sanyagin, I.V. Erofeeva

Strength as a complex mechanical characteristic, including a combination of strength, reliability and durability, is the most important quality parameter of the concrete structure as an active and mass building material for structural purposes. A significant number of construction projects made of concrete and reinforced concrete are being built in the southern and northern regions, characterized by extreme natural and climatic conditions. Buildings and structures under operation conditions are subjected to cyclic mechanical loads of various types and climatic influences, characterized by cyclic manifestations of negative and alternating temperatures. In this regard, studies aimed at creating decorative structural materials with increased strength and density, high frost resistance are relevant. The control of the processes of structure formation, the density of cement concrete structure is possible due to the introduction of superplasticizing and active mineral additives into the concrete mixture. The purpose of the research is the selection of compositions of decorative and finishing powder-activated concretes with a granular surface texture in terms of strength and frost resistance. For the experiment, Egyptian white Portland cement was used, Melflux 1645 served as a plasticizer, microquartz was used as a microfiller, granite screenings and cooper slag were used as filling components that give decorative properties to the products. At the same time, fr. 0–0.63 mm, and granite siftings fr. 0.63–5 mm and cooper slag fr. 0.63–2.5 mm. Strength and frost resistance tests were carried out in accordance with the current regulatory documents. As a result of the research, high indicators of strength and frost resistance of decorative powder-activated concretes with a granular surface texture were revealed.

Keywords: decorative concrete, granular texture, powder activation, physical and mechanical properties, strength, frost resistance

Введение

Конструкционная прочность как комплексная механическая характеристика, включающая сочетание критериев прочности, надежности и долговечности, является важнейшим параметром качества структуры бетона как активного и самого массового строительного материала конструкционного назначения [1–4].

В современном строительстве все отчетливее проявляется тенденция применения высокопрочных материалов, в частности бетонов. За последние десятилетия в отдельных странах прочность используемых товарных бетонов возросла в полтора раза,и ставятся задачи ее повышения в два-три раза (до уровня 100–150 МПа) в ближайшие десятилетия [5–9].

Значительное количество объектов строительства возводится в южных и северных регионах, характеризующихся экстремальными природно-климатическими условиями. Здания и сооружения в условиях эксплуатации подвергаются циклическим механическим нагрузкам и климатическим воздействиям. Обследование конструкций, работающих в условиях нестационарных режимов среды Волгоградской области, показало, что после 15–20 лет эксплуатации конструкции практически перестают удовлетворять требованиям норм [10]. Еще в большей степени материалы и конструкции подвержены разрушениям от циклических воздействий отрицательных и знакопеременных

температур [11, 12]. В этом случае к строительным материалам и изделиям предъявляются специальные эксплуатационные требования. Так, например, долговечность дорожных тротуарных покрытий и подобных элементов транспортных коммуникаций и благоустройства в основном оценивается показателями морозостойкости и прочности [11–13].

В этой связи являются актуальными исследования, направленные на создание конструкционных материалов, обладающих повышенной прочностью и плотностью, высокой морозостойкостью. Управление процессами структурообразования, плотностью структуры цементного бетона возможно за счет введения в бетонную смесь суперпластифицирующих и активных минеральных добавок [14–18]. В строительной отрасли при изготовлении различных строительных изделий используются декоративные бетоны [19–22]. Исходя из этого, приходим к выводу, что особую ценность представляют комплексные исследования по формированию плотной и стабильной во времени структуры декоративных бетонов при циклическом физико-механическом воздействии. Как известно, кроме требований прочности и морозостойкости затвердевшего бетона необходимо также обеспечить требуемую удобоукладываемость бетонных смесей. Этому показателю в большей степени соответствуют порошково-активированные бетоны.

Одним из перспективных направлений в строительстве зданий и сооружений повышенной архитектурной выразительности является использование декоративных порошково-активированных бетонов, обладающих рациональным рецептурным составом. Подбор таких составов осуществляется по принципу последовательного заполнения пустот [23–28].

В ранее выполненных исследованиях разрабатывалась рецептура порошково-активированных бетонов с вышеуказанными компонентами по реотехнологическим свойствам [29], а на данном этапе исследовались физико-механические свойства композитов и их долговечность.

Причиной высокой прочности бетонов нового поколения (БНП) является не только наличие порошковой составляющей. Для усиления действия суперпластификатора (СП) в БНП должен быть тонкозернистый песок фракции 0,16–0,63 мм, способный разжижаться пластификаторами в водной вытяжке цементного теста. Адсорбция (хемосорбция) катиона кальция на отрицательно заряженных частицах кварца превращает поверхность в положительно заряженную [30–32].

Для архитектурно-декоративных бетонов, эксплуатирующихся в условиях атмосферных воздействий, одним из основных критериев качества при оценке долговечности и срока службы без потери прочностных и эстетических показателей является морозостойкость. Изучению стойкости бетонов к воздействию мороза в водонасыщенном состоянии и повышению их морозостойкости посвящено большое число исследований в нашей стране и за рубежом [33–40]. Большинство исследователей считает, что основополагающей причиной морозной деструкции цементных бетонов является фазовый переход воды в лед, сопровождающийся увеличением ее объема и возникновением напряжений в жестком каркасе. Величина В/Ц существенно влияет на пористость и морозостойкость бетона. При этом также установлено, что тонкомолотые добавки, введенные в количестве до 25–30 % от массы цемента, способствуют повышению морозостойкости бетона из-за более качественного заполнения пустот между зернами мелкого заполнителя. К тому же сокращение удельного расхода цемента на единицу объема бетона уменьшает относительный объем цементного камня и снижает внутренние напряжения от непроявившейся капиллярной усадки, и тем самым повышаются трещиностойкость матрицы бетона и его морозостойкость [34–37, 41, 42]. Капиллярная усадка высокопрочных реакционно-порошковых бетонов, так как они растекаются при влажности 10 %, а объем капиллярных пор в бетоне небольшой, и усадочные деформации, определенные после длительного твердения, незначительны [41, 42].

Как правило, для бетонов старого поколения марка по морозостойкости не превышает F 300–400, что является вполне достаточным для прогнозируемой высокой

долговечности бетонов [43], но для архитектурно-декоративных бетонов в таком случае период эксплуатации до исчезновения декоративной выразительности поверхностей значительно сокращается.

Для жестких условий эксплуатации разрабатываемые бетоны должны выдерживать более 1000 циклов попеременного замораживания-оттаивания. Поэтому изначально при подборе состава стояла задача не только получения высокопрочного бетона с низким значением водопоглощения, но и существенного повышения морозостойкости без использования специальных воздухововлекающих добавок, увеличивающих стоимость бетона.

Цель и задачи исследований

Целью исследований является подбор составов декоративно-отделочных порошково-активированных бетонов с зернистой фактурой поверхности по показателям прочности и морозостойкости.

Задачи исследований:

1. Составить обзор литературы по бетонам нового поколения с выделением структурных и прочностных свойств, а также морозостойкости порошково-активированных бетонов.
2. Подобрать компоненты для формирования порошково-активированных бетонов с учетом минимизации стоимости, обеспечения требуемой визуальной картины зернистой фактуры поверхности бетона, обеспечения высокой реологии бетонных смесей на основе выбранных компонентов.
3. Произвести расчет структурных и реотехнологических показателей составов декоративно-отделочных порошково-активированных бетонов и выбрать оптимальную рецептуру по технологическим свойствам с установлением объемного содержания различных матриц, объемного содержания водно-дисперсной, водно-дисперсно-тонкозернистой и растворной составляющих, относительных избытков объемов условных реологических матриц в декоративных порошково-активированных бетонах.
4. Выполнить экспериментальные исследования порошково-активированных бетонов в зависимости от вида применяемогосуперпластификатора (СП) и используемых суперпластификатора и наполнителей по показателям прочности и морозостойкости.

Материалы и методы

Состав бетона для экспериментальных исследований выбирался с учетом достигнутых результатов по определению прочностных и гигрометрических показателей при подборе составов.

В настоящем исследовании были изучены прочность и морозостойкость цементных композитов, пластифицированных ГП зарубежного (Melflux 1641) и отечественного (Хидетал γ-9) производства.

Наполнителями и заполнителями, в том числе вышеуказанного типа, служили: в качестве микродисперсного компонента, повышающего объем реологической матрицы I рода, – микрокварц Лебединского горно-обогатительного комбината, в качестве наполняющих компонентов, обеспечивающих зернистую фактуру поверхности, – отсевы дробления гранита фр. 0–5 мм и купершлак. При этом данные компоненты использовались двух фракций: тонкий песок фр. 0–0,63 мм из гранитных высевок купершлака; песок-заполнитель фр. 0,63–5 мм из отсевов дробления гранитного щебня и купершлак фр. 0,63–2,5 мм. Вяжущим служил египетский белый цемент (CEM 52,5).

Подбор компонентов осуществлялся с учетом совокупности следующих параметров: стоимости, требуемой визуальной картины зернистой фактуры поверхности бетона, высокой реологии бетонных смесей.

Для определения прочностных показателей и морозостойкости бетонов были использованы соответствующие нормативные документы (ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 18105-2018, ГОСТ 10060-2012).

Исследуемые составы, различающиеся видом суперпластификатора и количественным содержанием наполняющих компонентов, представлены в [29]. В этой же работе приведены кроме массовых содержаний объемные содержания компонентов, а также осадки стандартного конуса.

Для проведения эксперимента была изготовлена серия образцов-кубов с размером ребра 100 мм. Состав бетона представлен белым цементом, микрокварцем, отсевом дробления гранита фракции 0–5 мм и частицами купершлака фракции 0–2,5 мм. Бетонная смесь была самоуплотняющейся с осадкой конуса 27,4 см, объемное содержание водно-дисперсной суспензии $C_{ВД}$ составляло 43,65 %, содержание водно-дисперсно-тонкозернистой $C_{ВДТ}$ – 69,8 % (при условном распределении всей воды затворения на каждую суспензию). Объемная концентрация твердой фазы в объеме бетонной смеси равна 81,7 %.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Исследованы физико-технические свойства порошково-активированных бетонов четырех составов. Путем испытания стандартных образцов получены показатели прочности при сжатии и изгибе и комплексные показатели для оценки эффективности материалов четырех составов (табл. 1).

Таблица 1

Составы для испытаний

Компонента	Дисперсно-фракционный состав	Содержание компонентов бетона на 1 м^3			
		1	2	3	4
Цемент 600 ДО Египетский	3800 см^2/г	161	161	161	161
Melflux1641 0,9 % от Ц	-	3	-	3	1,5
Хидетал γ9 1,2 % от Ц	-	-	4,6	-	2,5
Микрокварц	3400 см^2/г	113	75,5	75,5	75,5
Отсев камнедробления	0-0,63 мм	154	165	165	165
	0,63-5,0 мм	319	344	344	344
Купершлак	0-0,63 мм	96,9	96,9	96,9	96,9
	0,63-2,5 мм	48,4	48,4	48,4	48,4

Для оценки экономических показателей отдельных рецептур находим удельный расход цемента на единицу прочности при сжатии и изгибе:

$$Ц^{уд}_{R_{сж}} = \frac{Ц}{R_{сж}}, \text{ кг/МПа}, \quad (1)$$

$$Ц^{уд}_{R_{и}} = \frac{Ц}{R_{и}}, \text{ кг/МПа}. \quad (2)$$

Удельная прочность на единицу расхода цемента определялась по формулам:

$$R^{уд}_{ц R_{сж}} = \frac{R_{сж}}{Ц}, \text{ МПа/кг}; \; R^{уд}_{ц R_{и}} = \frac{R_{и}}{Ц}, \text{ МПа/кг}. \quad (3)$$

Также определялось соотношение прочностных показателей при сжатии и изгибе:

$$K = R_{сж}/R_{и}. \quad (4)$$

Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2

Прочность декоративных порошково-активированных песчаных бетонов

N состава	Прочность при сжатии МПа, сут			Прочность при изгибе МПа, сут			Характеристики (для прочности в 28 суток)			
	1	7	28	1	7	28	$Ц^{уд}_{R_{сж}}$	$R^{уд}_{цR_{сж}}$	$Ц^{уд}_{R_и}$	$R_{сж}/R_и$
1	41	–	98	6,1	–	11,6	5,1	0,196	45,4	8,28
2	20	–	61	4,1	–	7,4	8,19	0,122	67,5	8,24
3	37	–	90	6,1	–	11	5,55	0,180	45,4	8,18
4	31	–	78	5,1	–	9,8	6,41	0,156	51	7,96

Из табл. 2 следует, что по убыванию прочностных свойств исследуемые составы выстраиваются в следующий ряд: № 1, 3, 2, 4. Для исследования прочности и морозостойкости выбран состав № 3.

Результаты комплексных исследований свойств бетона состава № 3 с учетом [29] приведены в табл. 3.

Таблица 3

Свойства декоративных порошково-активированных песчаных бетонов состава № 3

Наименование компонентов	Дисперсно-фракционный состав	На 1 м^3, кг	Объем на 1 м^3, л	в/ц, в/т	P, кг/м^3	$\frac{П_М}{Ц}$	$\frac{П_Т}{Ц}$	$\frac{П_З}{Ц}$	Прочность (МПа) через, сут	
									1	28
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Цемент 600 ДО Египетский	3800 см^2/г	500	161	0,4	$P_{вл}$ 1 сутки 2415	0,4	1,4	2,1 1	$R_{сж}$=3 7 $R_и$= 6,1	$R_{сж}$=9 0 $R_и$= 1 1
Melflux 1641 0,9 % от Ц	—	4,5	3			$\frac{\Sigma П}{Ц} = 3,916$			$Ц^{уд}_{R_{сж}} = 5,55$	
Микрокварц	3400 см^2/г	200	75,5	0,081	$P_{теор}$ 2434	$И^{ВД}_{П_т} = 1,67$ $И^{ВДТ}_{П_з} = 1,78$			$R^{уд}_{цR_{сж}} = 0,18$	
Отсев камне-дробления гранитный	0-0,63 мм	450	165		Куп 0,992	$V_{ВД} = 436,5$ $V_{ВДП_т} = 698,4$ $V_{раст} = 1090,8$ $C^V_{ВД} = 39,91$ % $C^V_{ВДП_т} = 63,85$ % $C^V_{раст} = 99,73$ %			$Ц^{уд}_{R_и} = 45,4$ $R_{сж}/R_и = 8,18$	
	0,63-5,0 мм	930	344							
Купершлак	0-0,63 мм	252	96,9							
				$ОК_{ст}$=27,4 см						
	0,63-2,5 мм	126	48,4							

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\sum M_{сух}$ $\sum V_{сух}$ Вода	—	2464 — 200	— 894,4 200							
$M_{б.с}$		2664	—							
$V_{б.с}$		—	1094							

Из табл. 3 следует, что все значения объемных содержаний компонентов и условных реологических матриц бетонов принимали в соответствии с ранее разработанными рецептурами и с новыми представлениями о порошково-активированных бетонах с повышенным содержанием суспензионных составляющих.

Рассчитаны безразмерные параметры соотношений сырьевых компонентов и критерии условных реологических матриц, имеющие следующие значения:

$$П / Ц = 3,55;\ R_{Ц}^{УД} = 0,418\ МПа/кг;\ И_{П_т}^{ВД} = 1,67;\ И_{П_з}^{ЦДП} = 1,78.$$

Необходимо отметить, что изменение этих критериев в сторону их незначительного уменьшения или повышения приводит к снижению прочностных показателей на 10–20 %. Важно то, что достигнут чрезвычайно низкий удельный расход цемента на единицу прочности бетона при сжатии ($Ц_{R_{сж}}^{уд}$ = 2,39 кг/МПа) и растяжении при изгибе ($Ц_{R_и}^{уд}$ = 21,3 кг/МПа). Соотношение прочностных показателей $R_и / R_{сж}$ = 0,112.

Учитывалась и предположительная корректность прогноза высокой морозостойкости в зависимости от кинетики водопоглощения, которое, к слову, составляло через четверо суток менее 1,5 % по массе. После двух недель испытания это значение составляло 1,98 % и превышало 4-суточное водопоглощение приблизительно на 25–28 %. То есть при такой кинетике водопоглощения на протяжении достаточно длительного времени остается большое количество свободных пор после водонасыщения бетона в течение четырех суток перед испытанием на морозостойкость. Известно, что при замерзании объем воды увеличивается на 9,6 %; поэтому можно смело прогнозировать, что почти трехкратное превышение объема свободных пор над приращением объема воды при переходе ее в лед будет способствовать чрезвычайно высокой морозостойкости.

Определение морозостойкости осуществляли согласно ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» по 3-й ускоренной методике при насыщении образцов 5%-м водным раствором хлорида натрия. Испытания проводили в независимой лаборатории производственного предприятия ООО «Пензенское управление строительства» в морозильной камере отечественного производства типа КТХ-14 при температуре минус 50 °С по режиму: 8 часов замораживания, 16 часов оттаивания.

Результаты эксперимента показали, что после 1000 циклов попеременного замораживания-оттаивания масса образцов уменьшилась в среднем на 0,7 %. При этом не было заметно явных признаков внешней деструкции – сколов углов образцов, шелушения поверхности (см. рисунок), что позволяет предполагать наличие минимальных деструктивных процессов в структуре бетона и небольшого изменения прочности. Кроме того, такой результат гарантирует сохранение визуальной архитектурной привлекательности поверхности бетона на протяжении длительного периода эксплуатации в условиях воздействия жестких средовых факторов.

а б

Внешний вид образцов архитектурно-декоративного порошково-активированного бетона:
а – образец, насыщенный в солевом растворе;
б – образец после 1 000 циклов замораживания-оттаивания

После 1 000 циклов попеременного замораживания-оттаивания образцы были испытаны на прочность: нормативный предел прочности на сжатие исследуемого бетона после 28 суток твердения в нормально-влажностных условиях составлял 85 МПа; к моменту окончания испытания образцы, хранившиеся в солевом растворе, имели прочность 92 МПа. При этом образцы, подвергшиеся испытаниям, имели прочность 90 МПа (после 1 000 циклов замораживания-оттаивания). То есть потеря прочности составила чуть более 2 %, что находится в пределах ошибки опыта и соответствует требованиям ГОСТ.

Таким образом, разработанный и предложенный к реализации состав архитектурно-декоративного бетона соответствует требуемым свойствам по прочности и морозостойкости. Полученные результаты дают основание для назначения предельных уровней нагрузок на бетон разнообразных покрытий, а также для установления требований к свойствам бетона при его проектировании с учетом условий эксплуатации.

Выводы

1. В последние годы в отечественной и мировой практике широкое применение нашли самоуплотняющиеся бетонные смеси, отличающиеся высокой удобоукладываемостью без применения вибрационного воздействия. С применением инновационных технологий могут быть изготовлены в том числе разнообразные материалы и изделия архитектурно-строительного назначения с улучшенными декоративными свойствами.
2. Из основ физической химии следует, что в бетонной смеси необходимо иметь достаточное количество высококонцентрированной водно-дисперсной смеси (матрицы), которую с помощью пластификатора можно превратить из агрегативно-неустойчивой в агрегативно-устойчивую. При этом следует руководствоваться основным правилом: увеличение объема дисперсной фазы обеспечивается без увеличения расхода цемента, а добавлением порошкового наполнителя в количестве 40–70 %, а в малоцементном бетоне – до 90–100 %.
3. На первоначальном этапе подбора состава бетона необходима оценка реотехнологических свойств компонентов на предмет их разжижаемости с помощью различных суперпластификаторов не только индивидуальных цементных и минеральных суспензий, но и их композиций. Поэтому на начальном этапе проведены исследования

структурных и реотехнологических показателей порошково-активированных бетонов. Приведены объемы различных матриц, объемные содержания водно-дисперсной, водно-дисперсно-тонкозернистой и растворной составляющих, относительные избытки объемов условных реологических матриц в декоративных порошково-активированных бетонах.

4. При выполнении исследования вяжущим служил египетский белый цемент, микронаполнителем – микрокварц, в качестве наполняющих компонентов, придающих изделиям декоративные свойства, – гранитные высевки и купершлак. При этом в качестве тонкого песка использовались фр. 0–0,63 мм, а песка-заполнителя – гранитные высевки фр. 0,63–5 мм и купершлак фр. 0,63–2,5 мм. Смеси пластифицировались суперпластификатором нового поколения зарубежного производства Melflux 1641.

5. В результате проведения испытаний на прочность и морозостойкость выявлены высокие показатели данных свойств у декоративных бетонов.

6. Причиной высокой прочности бетонов нового поколения является не только наличие порошковой составляющей. Для усиления действия СП в БНП должен быть тонкозернистый песок фракции 0,16–0,63 мм, способный разжижаться пластификаторами в водной вытяжке цементного теста.

7. Результаты эксперимента показали, что после 1000 циклов попеременного замораживания и оттаивания масса образцов уменьшилась в среднем на 0,7 %. При этом не было заметно явных признаков внешней деструкции, что позволяет предполагать наличие минимальных деструктивных процессов в структуре бетона и небольшого изменения прочности. Кроме того, такой результат гарантирует сохранение визуальной архитектурной привлекательности поверхности бетона на протяжении длительного периода эксплуатации в условиях воздействия жестких средовых факторов.

8. После 1000 циклов попеременного замораживания-оттаивания образцы были испытаны на прочность: нормативный предел прочности на сжатие исследуемого бетона после 28 суток твердения в нормальных влажностных условиях составлял 85 МПа; к моменту окончания испытания образцы, хранившиеся в солевом растворе, имели прочность 92 МПа. При этом образцы, подвергшиеся испытаниям, имели прочность 90 МПа (после 1000 циклов замораживания-оттаивания). То есть потеря прочности составила чуть более 2 %, что находится в пределах ошибки опыта и соответствует требованиям ГОСТ.

9. Таким образом, разработанный и предложенный к реализации состав архитектурно-декоративного бетона соответствует свойствам по прочности и морозостойкости. Полученные результаты дают основание для назначения предельных уровней нагрузок на бетон разнообразных покрытий, а также для установления требований к свойствам бетонов при проектировании с учетом условий их эксплуатации.

Список литературы

1. Прочность и параметры разрушения цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.П. Скачков. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. – 360 с.

2. Структура и конструкционная прочность цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.П. Скачков. – М.: Изд-во АСВ, 2017. – 400 с.

3. Меры ползучести высокопрочных мелкозернистых бетонов на основе МБ / Н.И. Карпенко, С.С. Каприелов, Е.Н. Кузнецов [и др.]// Вестник Отд-ния строит. наук РААСН. – 2004. – Вып. 8. – С. 203–214.

4. Кондращенко, В.И. Оценка условий формирования макроструктуры высокопрочных легких бетонов с позиций механики разрушения / В.И. Кондращенко, В.Н. Ярмаковский // Вестник Отд-ния строит. наук РАСН. – 2007. – Вып. 11. – С. 320–328.

5. Калашников, В.И. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов // Изв. вузов. Стр-во. – 2016. – № 4. – С. 38–37.

6. Самоуплотняющийся бетон с мелкоизмельченным карбонатом кальция / И. Пайарес, Х. Барбара, Б. Барраган, Г. Рамос // Междунар. бетон. пр-во. – 2012. – № 1. – С. 34–38.

7. Калашников, В.И. Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения / В.И. Калашников // Бетон и железобетон. – 2012. – № 1. – С. 82.

8. Калашников, В.И. Что такое порошково-активированный бетон нового поколения / В. И. Калашников // Строит. материалы. – 2012. – № 10. – С. 70–71.

9. Дейзе, Т. Переход с технологии Mikrodur к технологии Nanodur. Применение стандартных цементов в практике производства бетонов со сверхвысокими эксплуатационными свойствами / Т. Дейзе, О. Хоркунг, М.Меломан // Бетонный завод. – 2004. – № 3. – С.4–11.

10. Маренков, В.А. Влияние климатического фактора на потери предварительного натяжения в арматуре напрягаемых элементов / В.А. Маренков, О.Г. Тарасов // Строительные материалы. – 2006. –№12. – С. 55–57.

11. Добшиц, Л.М. Физико-математическая модель разрушения бетона при переменном замораживании и оттаивании / Л.М. Добшиц // Жилищ. стр-во. – 2017. – № 2. – С. 30–36.

12. Матвеева, О.И. Цементные бетоны с композитным фиброармированием для автомобильных дорог, эксплуатируемых в климатических условиях Якутии / О.И. Матвеева, И.Г. Васильев, И.Р. Павлюкова // Бетон и железобетон – взгляд в будущее : науч. тр. III Всерос. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону: в 7 т. – М. : МГСУ, 2014. – Т. 3. – С. 173–182.

13. Салл, М. Мелкозернистые бетоны с органоминеральной добавкой для дорожного строительства / М. Салл, Е.С. Рыбинцева, Г.А. Ткаченко // Строит. материалы. – 2009. – № 7. – С.18–20.

14. Наногидросиликатные технологии в производстве бетонов / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, М.Н. Мороз [и др.] // Строит.материалы. – 2014. – № 5. – С. 88–91.

15. Роль дисперсных и тонкозернистых наполнителей в бетонах нового поколения / В.И. Калашников, О.В. Суздальцев, Р.А. Дрянин, Г.П. Сехпосян // Изв. вузов. Стр-во. – 2014. – № 7. – С. 11–21.

16. Баженов, Ю.М. Мелкозернистый бетон, модифицированный комплексной микродисперсной добавкой / Ю.М. Баженов, Н.П. Лукутцова, Е.Г. Карпиков // Вестн. МГСУ. – 2013. – № 2. – С. 94–100.

17. Бердов, Г.И. Активирование цементной суспензии для получения высококачественного бетона / Г.И. Бердов, А.Н. Машкин // Изв. вузов. Стр-во. – 2007.– № 7. – С. 28–31.

18. Каушанский, В.Е. Получение цемента с активными минеральными добавками на основе алюмосиликатных горных пород / В.Е. Каушанский, Л.С. Самощенко, О.Ю. Баженова[и др.] // Цемент и его применение. – 2000.– № 3. – С. 28–30.

19. Реснер, О. Новые возможности в области дизайна архитектурных фасадов / О. Реснер // Междунар. бетон. про-во. – 2013. – № 6. – С. 152–155.

20. Цветы из бетона / BetonMarketingDeutschland, 40699, Erkrath, Germany // Междунар. бетон. пр-во. – 2013. – № 5. – С. 24–26.

21. Визуализация фото и графики на бетонной поверхности / ReckliGmbh, 44268, Херне, Германия // Междунар. бетон. пр-во. – 2014. – № 3. – С. 173.

22. Бетонные поверхности с фотокаталитической активацией / Dyckerhoff AG, 65203 Wiesbaden, Deutschland / Междунар. бетон. пр-во. – 2013. – № 6. – С. 18.

23. Влияние порошкового гидрофобизатора на прочность и водопоглощение архитектурно-декоративных бетонов нового поколения / О.В. Суздальцев, В.И. Калашников, М.Н. Мороз, И.В. Ерофеева // Молодой ученый. – 2015. – № 5 (85). – С. 186–189.

24. Фаликман, В.Р. Отечественный опыт производства и применения самоуплотняющегося бетона / В.Р. Фаликман, В.В. Денискин, О.О. Калашников, В.Ю. Сорокин // Национальная Ассоциация Ученых. – 2015. – № 2–3 (7). – С. 68–73.

25. Хархардин, А.Н. Критический размер микро- и наночастиц, при котором проявляются их необычные свойства / А.Н. Хархардин, В.В. Строкова, М.И. Кожухова // Изв. вузов. Стр-во. – 2012. – № 10. – С. 109–115.

26. Чернышов, Е.М. Модифицирование структуры цементного камня микро- и наноразмерными частицами кремнезема (вопросы теории и приложений) / Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // Строит. материалы, оборудование и технологии XXI века. – 2008. – № 5. – С. 30–32.

27. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементных бетонов / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховской, М.И. Бруссер. – М.:Стройиздат, 1983. – 254 с.

28. Калашников, В.И. Расчет составов высокопрочных самовосстанавливающихся бетонов / В.И. Калашников / Строит.материалы. – 2008. – № 10. – С. 4–6.

29. Ерофеев, В.Т. Подбор составов декоративно-отделочных порошково-активированных бетонов с зернистой фактурой поверхности по реологическим свойствам / В.Т. Ерофеев, И.Н. Максимова, Я.А. Санягина, И.В. Ерофеева // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 3. – С. 16–32.

30. Гусев, Б.В. Наноструктурирование бетонных материалов / Б.В. Гусев // Пром. и гражд. стр-во. – 2016. – № 1. – С. 7–9.

31. Урьев, Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы / Н.Б. Урьев. – М.: Химия, 1980. – 320 с.

32. Мчедлов-Петросян, О.П. Особенности минералообразования кристаллогидратов в присутствии минеральных тонкодисперсных наполнителей / О.П. Мчедлов-Петросян, А.Г. Ольгинский // Экспериментальное исследование минералообразования. – М.: Наука, 1971. – С.262–268.

33. Performance Properties of High-Density Impermeable Cementitious Paste / R.S. Fediuk, R.A. Timokhin, A.V. Mochalov [et al.] // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2019. – Vol. 31(4). – P. 04019013

34. Composite Binders for Concretes with Improved Impact Endurance / R.S. Fediuk, A.V. Mochalov, D.N. Pezin, Yu.L. Liseitsev // Inorganic Materials: Applied Research. – 2019. – Vol. 10, № 5. – P. 1177–1184.

35. Structuring Behavior of Composite Materials Based on Cement, Limestone, and Acidic Ash / R.S. Fediuk, A.V. Mochalov, A.V. Bituev, M.E. Zayakhanov // Inorganic Materials. – 2019. – Vol. 55, № 10. – P. 1079–1085.

36. Пауэрс, Т.К. Физическая структура портландцементного теста / Т.К. Пауэрс // Химия цементов. – М.:Стройиздат, 1969. – С. 300–319.

37. Калашников, В.И. Капиллярная усадка высокопрочных реакционно-порошковых бетонов и влияние масштабного фактора / В.И. Калашников // Строит. материалы. – 2010. – № 5. – С.52–53.

38. Фаликман, В.Р. Строительно-технические свойства особо высокопрочных быстротвердеющих бетонов / В.Р. Фаликман, Ю.В. Сорокин, О.О. Калашников // Бетон и железобетон. – 2004. – № 5. – С. 5–10.

39. Шейкин, А.Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости / А.Е. Шейкин, Л.М. Добшиц. – Л. :Стройиздат, 1989. – 128 с.

40. Добшиц, Л. М. Долговечность бетонов транспортных сооружений / Л.М. Добшиц // Транспорт. стр-во. – 1995. – № 3. – С. 17–20.

41. Добшиц, Л.М. Влияние свойств цемента на морозоустойчивость бетонов / Л.М. Добшиц, В.И. Соломатов // Бетон и железобетон. – 1999. – № 3. – С. 19–21.

42. Калашников, В.И. Морозостойкость окрашенных архитектурно-декоративных порошково-активированных песчаных бетонов / В.И. Калашников, О.В. Суздальцев, М.Н. Мороз, В.В. Пауск // Строит.материалы. – 2015. – № 3. – С. 16–19.

43. Величко, Е.Г. Морозостойкость бетона с оптимизированным дисперсным составом / Е. Г. Величко // Строит.материалы. – 2012. – № 2. – С. 81–83.

References

1. Strength and fracture parameters of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Yu.P. Skachkov. – Saransk: Mordov Publishing House. un-ta, 2015. – 360 p.

2. Structure and structural strength of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Yu.P. Skachkov. – M.: Publishing House of ASV, 2017. – 400 p.

3. Measures of creep of high-strength fine-grained concretes based on MB / N.I. Karpenko, S.S. Kaprielov, E.N. Kuznetsov [et al.]// Vestnik Otd. Sciences RAASN. – 2004. – Issue. 8. – P. 203–214.

4. Kondrashchenko, V.I. Evaluation of the conditions for the formation of the macrostructure of high-strength lightweight concrete from the standpoint of fracture mechanics / V.I. Kondrashchenko, V.N. Yarmakovsky // Bulletin of the Building Department. Sciences RASN. – 2007. – Issue. 11. – P. 320–328.

5. Kalashnikov, V.I. Suspension-filled concrete mixes for powder-activated concretes of a new generation / V.I. Kalashnikov, V.T. Erofeev, O.V. Tarakanov // Izv. universities. Constructionю – 2016. – No. 4. – P. 38–37.

6. Self-compacting concrete with finely ground calcium carbonate / I. Piares, J. Barbara, B. Barragan, G. Ramos // Intern. concrete. pr-in. – 2012. – No. 1. – P. 34–38.

7. Kalashnikov, V.I. How to turn old-generation concretes into new-generation high-performance concretes/V.I. Kalashnikov // Concrete and reinforced concrete. – 2012. – No. 1. – P. 82.

8. Kalashnikov, V.I. What is powder-activated concrete of a new generation / V.I. Kalashnikov // Stroit. materials. – 2012. – No. 10. – P. 70–71.

9. Deise, T. Transition from Mikrodur technology to Nanodur technology. The use of standard cements in the practice of producing concrete with ultra-high performance properties / T. Deise, O. Horkung, M. Meloman // Concrete Plant. – 2004. – No. 3. – P.4–11.

10. Marenkov, V.A. Influence of the climatic factor on the loss of pretension in the reinforcement of prestressed elements / V.A. Marenkov, O.G. Tarasov // Building materials. – 2006. – №12. – P. 55–57.

11. Dobshits, L.M. Physico-mathematical model of concrete destruction during variable freezing and thawing / L.M. Dobshits // Housing Construction. – 2017. – No. 2. – P. 30–36.

12. Matveeva, O.I. Cement concrete with composite fiber reinforcement for highways operating in the climatic conditions of Yakutia / O.I. Matveeva, I.G. Vasiliev, I.R. Pavlyukova // Concrete and reinforced concrete – a look into the future: scientific . tr. III All-Russian. (II Intern.) Conf. on concrete and reinforced concrete: in 7 volumes. – M.: MGSU, 2014. – Vol. 3. – P. 173–182.

13. Sall, M. Fine-grained concretes with an organomineral additive for road construction / M. Sall, E.S. Rybintseva, G.A. Tkachenko // Stroit. materials. – 2009. – No. 7. – P.18–20.

14. Kalashnikov, V.I. Nanohydrosilicate technologies in concrete production / V.I. Kalashnikov, V.T. Erofeev, M.N. Moroz [etc.] // Stroit. materialy. – 2014. – No. 5. – P. 88–91.

15. Kalashnikov, V.I. The role of dispersed and fine-grained fillers in new generation concretes / V.I. Kalashnikov, O.V. Suzdaltsev, R.A. Dryanin, G.P. Sekhposyan // Izv. universities. Construction. – 2014. – No. 7. – P. 11–21.

16. Bazhenov, Yu.M. Fine-grained concrete modified with a complex microdisperse additive / Yu.M. Bazhenov, N.P. Lukutsova, E.G. Karpikov // Vestn. MGSU. – 2013. – No. 2. – P. 94–100.

17. Berdov, G.I. Activation of cement suspension to obtain high-quality concrete / G.I. Berdov, A.N. Mashkin // Izv. universities. Construction. – 2007. – No. 7. – P. 28–31.

18. Kaushansky, V.E. Obtaining cement with active mineral additives based on aluminosilicate rocks / V.E. Kaushansky, L. S. Samoshchenko, O. Yu. Bazhenova [etc.] // Cement and its application. – 2000. – No. 3. – P. 28–30.

19. Resner, O. New opportunities in the design of architectural facades / O. Resner // Intern. concrete. about. – 2013. – No. 6. – P. 152–155.

20. Concrete flowers / Beton Marketing Deutschland, 40699, Erkrath, Germany // Intern. concrete. pr-in. – 2013. – No. 5. – P. 24–26.

21. Visualization of photos and graphics on a concrete surface / ReckliGmbh, 44268, Herne, Germany // Intern. concrete. pr-in. – 2014. – No. 3. – P. 173.

22. Concrete surfaces with photocatalytic activation / Dyckerhoff AG, 65203 Wiesbaden, Deutschland / Intern. concrete. pr-in. – 2013. – No. 6. – P. 18.

23. Suzdaltsev, O.V. Influence of powder water repellent on the strength and water absorption of architectural and decorative concretes of a new generation / O.V. Suzdaltsev, V.I. Kalashnikov, M.N. Moroz, I.V. Erofeeva // Young scientist. – 2015. – No. 5 (85). – P. 186-189.

24. Falikman, V.R.Domestic experience in the production and use of self-compacting concrete / V.R. Falikman, V.V. Deniskin, O.O. Kalashnikov, V.Yu. Sorokin // National Association of Scientists. – 2015. – No. 2–3 (7). – P. 68–73.

25. Kharkhardin, A.N. Critical size of micro- and nanoparticles at which their unusual properties are manifested / A.N. Kharkhardin, V.V. Strokova, M.I. Kozhukhova // Izv. universities. Construction. – 2012. – No. 10. – P. 109–115.

26. Chernyshov, E.M. Modifying the structure of cement stone with micro- and nanosized particles of silica (questions of theory and applications) / E.M. Chernyshov, D.N. Korotkikh // Stroit. materials, equipment and technologies of the XXI century. – 2008. – No. 5. – P. 30–32.

27. Sheikin, A.E. Structure and properties of cement concrete / A.E. Sheikin, Yu.V. Chekhovskoy, M.I. Brusser. – M.: Stroyizdat, 1983. – 254 p

28. Kalashnikov, V. I. Calculation of compositions of high-strength self-healing concretes / V. I. Kalashnikov / Construction materials. – 2008. – No. 10. – P. 4–6.

29. Erofeev, V.T. Selection of compositions of decorative and finishing powder-activated concretes with a granular surface texture according to rheological properties / V.T. Erofeev, I.N. Maksimova, Ya.A. Sanyagin, I.V. Erofeeva // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 3. – P. 16–32.

30. Gusev, B.V. Nanostructuring of concrete materials / B.V. Gusev // Prom. and civil construction – 2016. – No. 1. – P. 7–9.

31. Ur'ev, N.B. Highly concentrated disperse systems / NB. Ur'ev. – M.: Chemistry, 1980. – 320 p.

32. Mchedlov-Petrosyan, O.P. Peculiarities of mineral formation of crystalline hydrates in the presence of myomineral finely dispersed fillers / O.P. Mchedlov-Petrosyan, A.G. Olginsky // Experimental study of mineral formation. – M.: Nauka, 1971. – P.262–268.

33. Performance Properties of High-Density Impermeable Cementitious Paste / R.S. Fediuk, R.A. Timokhin, A.V. Mochalov [et al.] // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2019. – Vol. 31(4). – P. 04019013

34. Composite Binders for Concretes with Improved Impact Endurance / R.S. Fediuk, A.V. Mochalov, D.N. Pezin, Yu.L. Liseitsev // Inorganic Materials: Applied Research. – 2019. – Vol. 10, № 5. – P. 1177–1184.

35. Structuring Behavior of Composite Materials Based on Cement, Limestone, and Acidic Ash / R.S. Fediuk, A.V. Mochalov, A.V. Bituev, M.E. Zayakhanov // Inorganic Materials. – 2019. – Vol. 55, № 10. – P. 1079–1085.

36. Powers, T.K. Physical structure of Portland cement test / T.K. Powers // Chemistry of cements. – M.: Stroyizdat, 1969. – P. 300–319.

37. Kalashnikov, V.I. Capillary shrinkage of high-strength reaction-powder concretes and the influence of the scale factor / V.I. Kalashnikov // Building. materials. – 2010. – No. 5. – P.52–53.

38. Falikman, V.R. Construction and technical properties of especially high-strength fast-hardening concretes / V.R. Falikman, Yu.V. Sorokin, O.O. Kalashnikov // Concrete and reinforced concrete. – 2004. – No. 5. – P. 5–10.

39. Sheikin, A.E. Cement concretes of high frost resistance / A.E. Sheikin, L.M. Dobshits. – L.: Stroyizdat, 1989. – 128 p.

40. Dobshits, L.M. Durability of concretes of transport structures / L.M. Dobshitz // Transport. construction. – 1995. – No. 3. – P. 17–20.

41. Dobshits, L.M. Influence of properties of cement on frost resistance of concrete / L.M. Dobshits, V.I. Solomatov// Concrete and reinforced concrete. – 1999. – No. 3. – P. 19–21.

42. Kalashnikov, V.I. Frost resistance of painted architectural and decorative powder-activated sandy concretes / V.I. Kalashnikov, O.V. Suzdaltsev, M.N. Moroz, V.V. Pausk // Construction Materials. – 2015. – No. 3. – P. 16–19.

43. Velichko, E.G. Frost resistance of concrete with an optimized disperse composition / E. G. Velichko // Stroit.materialy. – 2012. – No. 2. – P. 81–83.

УДК 691.327:539.4 DOI 10.54734/20722958_2022_3_46

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

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

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

Королев Евгений Валерьевич,
доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе

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 «Management of Quality and Technology of Construction Production»
E-mail: maksimovain@mail.ru

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

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
Russia, 190005, St. Petersburg, 4, Second Krasnoarmeyskaya St.

Korolev Evgeny Valerievich,
Doctor of Sciences, Professor,
Vice-Rector for Scientific Work

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ НА КОНСТРУКЦИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ РАННЕЙ СТАДИИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНОВ

И.Н. Максимова, Е.В. Королев, Н.И. Макридин

Экспериментально изучено влияние интенсивности тепловлажностной обработки на конструкционную прочность ранней стадии структурообразования и твердения бетонов на основе портландцементов М500-Д0 и М500-Д20. Изготовлено и испытано по методике ГОСТ 29167-91 по пять серий опытных образцов на каждом виде портландцемента. По экспериментальным данным получена экспериментально-статистическая модель, анализ уравнений регрессии показывает, что в выбранном факторном пространстве на конструкционную прочность бетона значительное влияние оказывает вид портландцемента. Полученные феноменологические модели механических свойств могут быть положены в основу как рецептурно-технологической оптимизации, так и прогнозирования конструкционной прочности современных цементных композитов.

Ключевые слова: цемент, бетон, гидратация цемента, структурообразование и твердение, тепловлажностная обработка, теплоемкость бетона, скорость подвода тепла, конструкционная прочность, механические свойства, феноменологические модели

THE INFLUENCE OF HEAT AND MOISTURE TREATMENT INTENSITY ON STRUCTURAL STRENGTH OF THE EARLY STAGE OF STRUCTURE FORMATION AND HARDENING OF CONCRETE

I.N. Maksimova, E.V. Korolev, N.I. Makridin

The influence of the intensity of heat and moisture treatment on the structural strength of the early stage of structure formation and hardening of concrete based on M500-D0 and M500-D20 Portland cements has been experimentally studied. Manufactured and tested according to the method of GOST 29167-91. Five series of prototypes for each type of Portland cement have been. According to the

experimental data, an experimental-statistical model is obtained, the analysis of the regression equations shows that in the chosen factor space, the type of Portland cement has a significant effect on the structural strength of concrete. The resulting phenomenological models of mechanical properties can be used as the basis for both recipe-technological optimization and prediction of the structural strength of modern cement composites.

Keywords: cement, concrete, cement hydration, structuring and hardening, heat and moisture treatment, heat capacity of concrete, heat supply rate, structural strength, mechanical properties, phenomenological models

Известно, что эксплуатационные свойства и долговечность бетона зависят от интенсивности и завершенности процессов гидратации и структурообразования, что формирует метастабильную систему с активно изменяющимися во времени и в пространстве структурой и свойствами. Динамику указанных процессов можно оценить интегральными показателями двух взаимно конкурирующих процессов: конструктивного и деструктивного. Конструктивные процессы обусловлены гидратацией цемента и формированием конденсационно-кристаллизационной структуры, а деструктивные – возникновением собственных внутренних напряжений в результате усадки и протекания процессов перекристаллизации [1–7]. Интенсивность интегральных процессов и их влияние на структуру материала определяются параметрами внешней среды (температура, давление и влажность). Для систем из химически малоактивных компонентов реакции взаимодействия возможны только при повышенных температуре и давлении (наблюдается образование прочного камня, обладающего достаточной долговечностью).

Формирование долговечного материала из химически активных компонентов возможно при нормальных условиях твердения. При повышенных значениях температуры и давления формируется кристаллизационная структура цементного камня, обладающая значительным запасом некомпенсированной внутренней энергии. Высвобождение энергии сопровождается протеканием процесса перекристаллизации продуктов гидратации, что в системе с жесткими связями приводит к ее локальному разрушению.

Аналогично это справедливо для различных видов цементов (бездобавочных и добавочных) и композиционных материалов на их основе.

Это подтвердилось при экспериментальных исследованиях на бетонах, изготовленных на портландцементах: старооскольском цементе с нормальной густотой 0,257 и вольском цементе с нормальной густотой 0,285 (минералогический и химический составы цемента – в табл. 1 и 2).

Таблица 1

Минералогический состав цементов

Наименование цемента	Марка цемента	Минералогический состав, %				Вид и количество добавки, %
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	
Осколцемент	М 500-Д0	62	17	6	13	–
Вольскцемент	М 500-Д20	60	16	6	15	Опока до 20

Таблица 2

Химический состав цементов

Наименование цемента	Химический состав, %								ППП
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	
Осколцемент	22.30	5.06	4.19	65.45	2.03	2.60	0.25	0.25	1.28
Вольскцемент	23.58	4.87	4.61	59.60	1.60	3.27	0.26	0.77	1.86

На каждом виде портландцемента было изготовлено по пять серий образцов одинакового состава, при этом расход материалов на 1 м^3 бетонной смеси составлял: цемента – 385 кг, гранитного щебня фракции 5–10 мм – 1100 кг, кварцевого песка

($М_{кр}$=1,63) – 774 кг, добавки ПДО-М – 1,0 % в сухом состоянии от массы цемента. Удобоукладываемость бетонной смеси (по осадке стандартного конуса) была одинаковой для всех сравниваемых составов и составляла 2–4 см. Расход воды на 1 $м^3$ бетонной смеси составлял: 185 л – при использовании вольского портландцемента с нормальной густотой 0,285, 175 л – при использовании старооскольского портландцемента с нормальной густотой 0,257. Образцы бетона после 12 часов выдержки в нормальных условиях подвергали тепловлажностной обработке (режим – в табл. 3).

Таблица 3

Режим тепловлажностной обработки (ТВО)

№ состава	Режим ТВО, ч	Температура изотермии, ºС	Градусо-часы, ºС·ч
1	2+8+3	70	560
2	2+4+3	70	280
3	2+6+3	80	480
4	2+6+3	60	360
5	2+6+3	70	420

Как оказалось, режим ТВО целесообразно оценивать показателем, характеризующим скорость подвода тепла. Расчет указанного показателя можно провести следующим образом. Общее количество тепла, подводимого к материалу, Дж:

$$Q = c_m \cdot m \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где c_m – удельная теплоемкость бетона, Дж/(кг·°С); m – масса бетона, кг; ΔT – величина нагрева бетона, °С.

Для материалов одного состава значения c_m и m постоянны; удельное количество переданного тепла определяется только режимом ТВО:

$$Q_{пр} = \frac{Q}{c_m m} = \int_t f(t)\,dt, \quad (2)$$

где t – время ТВО, ч;

показатель, характеризующий интенсивность ТВО, °С/ч:

$$\vartheta_q = \frac{\Delta T}{t} = \frac{1}{t}\int_t f(t)\,dt. \quad (3)$$

Определенная экспериментально экспериментально-статистическая модель имеет вид:

$$R_i = b_0 + b_1\vartheta_q + b_2 t + b_{12}\vartheta_q t + b_{11}\vartheta_q^2 + b_{22}t^2, \quad (4)$$

где ϑ_q – скорость подвода тепла при ТВО; t – продолжительность твердения; b_i – эмпирические коэффициенты (табл. 4).

Полученные экспериментально-статистические модели представлены на рис. 1 и 2.

Таблица 4

Коэффициенты уравнения регрессии

Вид цемента	Прочность	Значения коэффициентов уравнения регрессии					
		b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
Вольскцемент	Изгиб	7,739	-0,384	1,507	-0,028	-0,093	-2,13
Осколцемент		6,30	-0,588	1,044	-0,111	0,615	-1,93
Вольскцемент	Сжатие	50,16	0,423	12,823	-0,366	-1,536	-14,28
Осколцемент		37,505	-2,574	11,203	-2,715	5,309	-11,49

В выбранном факторном пространстве прочность и долговечность бетона зависят от вида портландцемента. Из значений коэффициентов b_i (см. табл. 4) следует, что влияние скорости подвода тепла при ТВО более значительно для бетонов, изготовленных на основе старооскольского цемента, а влияние продолжительности выдержки – для бетона на вольском цементе.

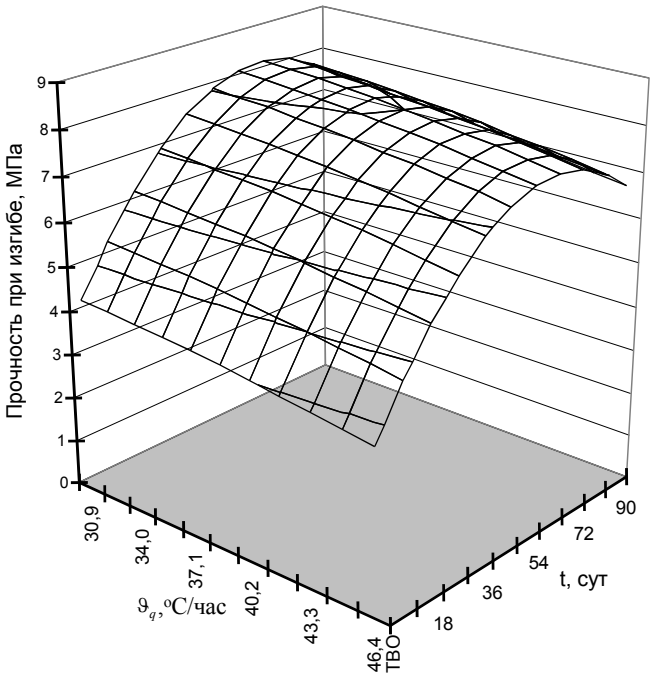


Рис. 1. Предел прочности при изгибе образцов бетона на вольском портландцементе

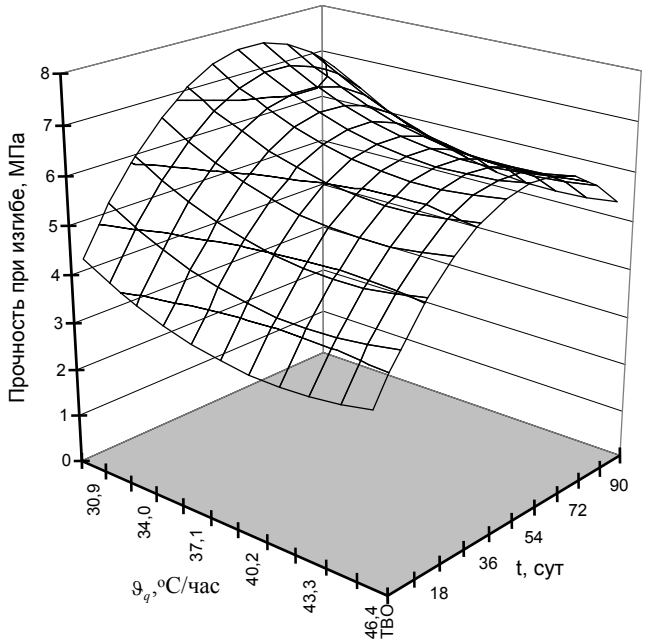


Рис. 2. Предел прочности при изгибе образцов бетона на старооскольском портландцементе

Бетоны, изготовленные на вольском цементе, по абсолютному значению обладают большей прочностью (рис. 3 и 4). Однако характер влияния ϑ_q и t на прочность бетонов на выбранных цементах различен; особенно отчетливо это наблюдается на

зависимости $R_i = f\left(\vartheta_q\right)_t$. Необходимо отметить также, что для бетонов на старооскольском портландцементе наблюдается некоторое повышение прочности при $\vartheta_q > 42$ °С/ч (см. рис. 4). Это, вероятно, можно объяснить интенсификацией взаимодействий на границе раздела фаз «цементный камень – заполнитель».

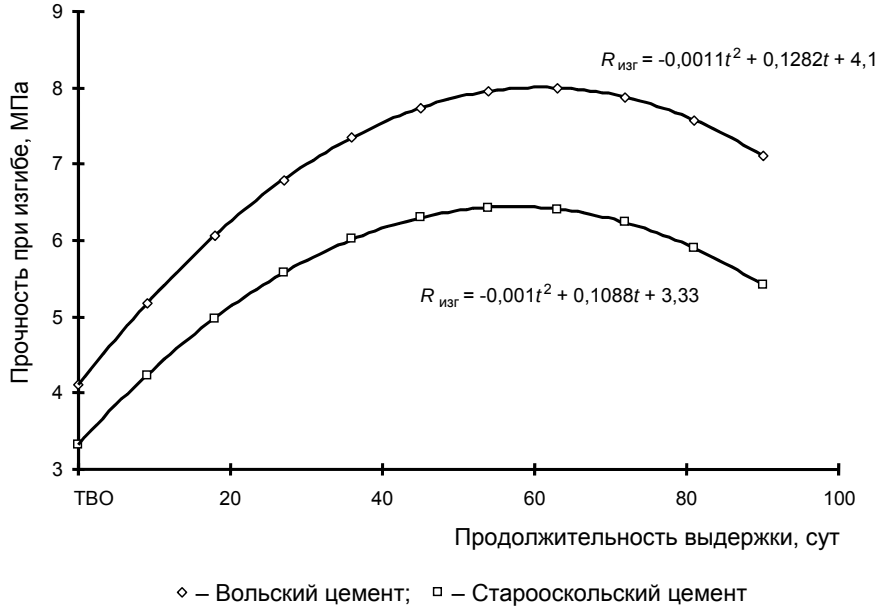


Рис. 3. Зависимость прочности бетона от продолжительности выдержки

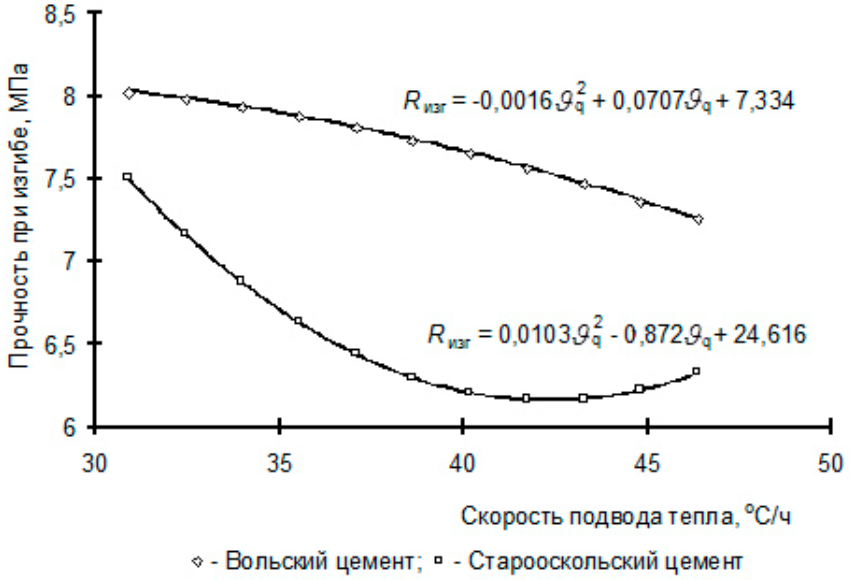


Рис. 4. Зависимость прочности бетона от скорости подвода тепла при ТВО

Характер зависимости $R_i = f\left(t\right)_{\vartheta_q}$ для выбранных видов цементов идентичен. Однако скорость изменения прочности различна: для бетонов на вольском цементе ϑ_R больше. Снижение прочности в более поздние сроки можно объяснить протеканием процесса перекристаллизации новообразований, возникновением локальных перенапряженных областей и микротрещин.

По экспериментальным данным была получена экспериментально-статистическая модель, анализ уравнения регрессии которой показывает, что в выбранном факторном

пространстве на прочность и долговечность бетона значительное влияние оказывает вид портландцемента.

Полученные в наших опытах на основе экспериментальных данных феноменологические модели механических свойств могут быть положены в основу как рецептурно-технологической оптимизации структуры, так и прогнозирования длительной конструкционной прочности цементных гетерогенных дисперсных систем и закономерностей процессов их структурообразования и твердения [8, 9].

Список литературы

1. Максимова, И.Н. Сравнительный анализ кинетических зависимостей на ранних и поздних стадиях процессов структурообразования конструкционной прочности цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 2 (35). – С. 5–12.
2. Максимова, И.Н. Комплексная оценка кинетических параметров конструкционной прочности цементного камня в диапазоне времени от 28 суток до 4,5 лет после пропарки / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.В. Полубарова // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 3 (36). – С. 23–30.
3. Баженов, Ю.М. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы / Ю.М. Баженов, Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // Строительные материалы. – 2014. – № 3. – С. 6–14.
4. Калашников, В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов / В.И. Калашников // Технологии бетонов. – 2008. – № 1. – С. 22–26.
5. Каприелов, С.С. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд // Строительные материалы. – 2017. – № 11. – С. 4–10.
6. Шейнфельд, А.В. Влияние температуры на параметры структуры и свойства цементных систем с органоминеральными модификаторами / А.В. Шейнфельд, С.С. Каприелов, И.А. Чилин // Градостроительство и архитектура. – 2017. – Т. 7, № 1 (26). – С. 58–63.
7. Каприелов, С.С. Уникальные бетоны и опыт их реализации в современном строительстве / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Г.С. Кардумян // Промышленное и гражданское строительство. 2013. – № 1. – С. 42–44.
8. Макридин, Н.И. Оптимизация структуры и прогнозирование конструкционной прочности бетонов нового поколения / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 4 (49). – С. 13–24.
9. Макридин, Н.И. Прогнозирование и оптимизация трещиностойкости модифицированных бетонов во времени / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2 (51). – С.17–23.

References

1. Maksimova, I.N. Comparative analysis of kinetic dependences at the early and late stages of the processes of structure formation of the structural strength of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering . 2018. – No. 2 (35). – P. 5–12.
2. Maksimova, I.N. Comprehensive assessment of the kinetic parameters of the structural strength of cement stone in the time range from 28 days to 4.5 years after steaming / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Yu.V. Polubarova // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 3 (36). – P. 23–30.
3. Bazhenov, Yu.M. Structural design of modern concrete: defining principles and technological platforms / Yu.M. Bazhenov, E.M. Chernyshov, D.N. Short // Construction materials. 2014. – No. 3. – P. 6–14.
4. Kalashnikov, V.I. Through rational rheology into the future of concrete // Tekhnologii betonov. – 2008. – No. 1. – P. 22–26.

5. Kaprielov, S.S. Cements and additives for the production of high-strength concrete / S.S. Kaprielov, A.V. Sheinfeld // Stroitelnye materialy. – 2017. – No. 11. – P. 4–10.

6. Sheinfeld, A.V. Influence of temperature on the parameters of the structure and properties of cement systems with organomineral modifiers / A.V. Sheinfeld, S.S. Karpielov, I.A. Chilin // Urban planning and architecture. – 2017. – Vol. 7, No. 1 (26). – P. 58–63.

7. Kaprielov, S.S. Unique concretes and experience of their implementation in modern construction / S.S. Kaprielov, A.V. Sheinfeld, G.S. Kardumyan // Industrial and civil construction. – 2013. – No. 1. – P. 42–44.

8. Makridin, N.I. Optimization of the structure and prediction of the structural strength of concrete of a new generation / N.I. Makridin, I.N. Maksimova // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 4 (49). – P. 13–24.

9. Makridin, N.I. Prediction and optimization of crack resistance of modified concrete / N.I. Makridin, I.N. Maksimova // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2 (51). – P.17–23.

УДК 691.537:699.87 DOI 10.54734/20722958_2022_3_53

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

Гаврилов Михаил Александрович,
кандидат технических наук кафедры «Начертательная геометрия и графика»
E-mail: gavrilov79@inbox.ru

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

Ерофеев Владимир Трофимович,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Строительные материалы и технологии»

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

Gavrilov Mikhail Aleksandrovich,
Candidate of Sciences of the department "Descriptive Geometry and Graphics"
E-mail: gavrilov79@inbox.ru

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

Erofeev Vladimir Trofimovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the department «Construction Materials and Technologies»

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЖИДКИМ КАУЧУКОМ

М.А. Гаврилов, В.Т. Ерофеев

Приводятся результаты исследования реологических свойств эпоксидных композитов для защиты трубопроводов с применением модификаторов на основе жидкого синтетического каучука и кварцевого песка. Выявлено определяющее влияние модифицирующей добавки на реологические свойства композитов.

Ключевые слова: эпоксидный композит, полимерные связующие, реологические свойства, модификация, пластификация

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES MODIFIED WITH LIQUID RUBBER

M.A. Gavrilov, V.T. Erofeev

The following article provides the results of researching rheological qualities of epoxy composites for pipe lines protection, with modifiers on liquid rubber and quartz sand. The determining influence of modifying additive on the rheological qualities was revealed.

Keywords: epoxy composite, polymer binders, rheological properties, modification, plastification

Развитие строительной индустрии связано с поиском, разработкой и созданием новых, более совершенных и прогрессивных материалов и конструкций на их основе. К таким материалам относятся полимерные композиты. Область применения полимерных композиционных материалов достаточно обширна: изготовление защитных антикоррозионных покрытий технологического оборудования и строительных конструкций, износостойких и водостойких покрытий ирригационных сооружений; выполнение ускоренного ремонта покрытий автодорог и аэродромов; изготовление несущих строительных конструкций и т.д.

В настоящее время предъявляются повышенные требования к инфраструктуре городов и населенных пунктов в целом, а также к тепловым сетям как части инфраструктуры городов в частности. В системе «источник тепла – тепловые сети – потребитель» наименее надежным звеном являются тепловые сети. Особую важность

приобретают исследования, направленные на разработку материалов для защиты металлических трубопроводов от коррозии.

В качестве связующего в полимерных композитах широкое распространение получили эпоксидные смолы. Многочисленные исследования позволили установить высокий уровень основных физико-механических свойств полимерных строительных материалов на основе эпоксидных смол [1]. Однако довольно высокая хрупкость, вязкость, наличие внутренних напряжений, недостаточная водостойкость композитов, относительно высокая стоимость эпоксидного связующего ограничивают технические возможности широкого применения эпоксидных композитов при защите тепловых сетей от коррозии [2].

Несмотря на недостатки эпоксидных полимеров, представляется перспективным применение их для защиты тепловых сетей. Для устранения указанных недостатков используют различные добавки, изменяют технологические режимы приготовления, формования, обработки композиционных материалов на основе эпоксидных смол. Физические методы регулирования свойств эпоксидных композитов не всегда позволяют решать задачи улучшения эксплуатационных свойств изделий из-за их несовершенства и малой эффективности. Поэтому разработка методов физико-химической модификации эпоксидных композитов, позволяющих целенаправленно регулировать их свойства, является актуальной задачей. Практическая реализация таких исследований приведет к повышению надежности и долговечности изделий из эпоксидных материалов на основе эпоксидных смол, а следовательно, к увеличению долговечности и надежности защищаемых конструкций.

Успешно решить поставленные задачи можно путем модификации эпоксидной матрицы с целью улучшения реологических свойств композитов, используя в качестве модифицирующих добавок жидкие синтетические каучуки (ЖСК). В данной работе представлены результаты исследования влияния ЖСК на реологические свойства эпоксидных композитов.

Важным требованием, предъявляемым практикой строительного производства к полимерным композиционным материалам, является их технологичность. Технологические свойства полимерных композиций в значительной степени определяются подвижностью, удобоукладываемостью полимеррастворных смесей, которые, в свою очередь, являются функцией нескольких параметров. К ним относятся: вязкость полимерного связующего, вид наполнителя, его дисперсность, степень наполнения, характер физико-химического взаимодействия между полимером и дисперсной фазой, температура компонентов и условия приготовления [3, 4].

Эпоксидная смола ЭД-20 по своим реологическим свойствам относится к низковязким ньютоновским жидкостям. Значение динамической вязкости при температуре 25^0С лежит в пределах 12-25 Па·с, что вносит определенные трудности в использование повышенного количества минерального наполнителя. Сложность приготовления эпоксидных композиций с повышенной степенью наполнения не только связана со снижением эффективного смачивания частиц дисперсной фазы полимером, но и определяется значительным увеличением материальных затрат, обусловленных повышением трудоемкости приготовления и использования данных материалов. Практический интерес представляет возможность направленного регулирования пластично-вязких свойств эпоксидных композиций [5].

Реологические свойства полимерных смесей можно характеризовать рядом констант, в частности величиной предельного напряжения сдвига. Измерения предельного напряжения сдвига полимеррастворных смесей выполняли с помощью конического пластометра КП-3. Эксперименты по определению влияния температуры отдельных компонентов на пластично-вязкие свойства проводили на эпоксидной композиции следующего состава (% по массе): эпоксидная смола ЭД-20 – 14; полиэтиленполиамин – 1,4; кварцевый песок ($M_{кр}$= 1,44) – 84,6.

Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние температуры компонентов на пластично-вязкие свойства эпоксидной композиции

Температура, °С	Длительность отверждения, мин						
	10	20	30	40	50	60	70
20	62,0	89,5	94,6	98,9	138,6	145,4	13125
30	51,6	66,8	87,3	92,4	131,2	143,5	25485
40	39,8	49,7	71,1	123,1	145,3	13214,0	-
50	31,0	35,4	79,5	129,4	185,6	5986,0	-
60	23,1	29,5	68,4	197,1	2418,0	-	-
70	15,3	19,6	51,2	4715,1	-	-	-

Как видим, температура исходных компонентов оказывает существенное влияние на реологические свойства полимеррастворной смеси. Увеличение температуры ингредиентов до смешения способствует эффективной пластификации полимеррастворной смеси в первые 30 минут после приготовления, а затем происходит ускорение процесса отверждения композиции.

Пластификация полимеррастворной смеси имеет в своей основе активационную природу и обусловлена в первую очередь изменением реологических свойств полимерного связующего, связанным с повышением температуры. Измерения предельного напряжения сдвига полимеррастворной смеси через 20 минут после приготовления композиции показали, что повышение температуры исходных компонентов оказывает каталитическое влияние на процессы структурообразования композиции.

Для композиции с температурой исходных компонентов 70^0С предельное напряжение сдвига через 40 минут после приготовления составило $4715{,}1 \cdot 10^3$ Па, а для композиции с температурой составляющих 20^oС - $98{,}9\ 10^3$ Па. Повышение температуры ингредиентов на 50^oС, по сравнению с нормальными условиями эксперимента (20^oС), приводит к потере пластично-вязких свойств уже через 50 минут отверждения. Ускорение полимеризации эпоксидного связующего обусловлено в значительной мере повышением активности молекул эпоксидного олигомера и полиэтиленполиамина за счет увеличения их сегментальной и молекулярной подвижности, что способствует повышению вероятности встречи функциональных групп компонентов связующего. В результате этого увеличивается количество ошибок в пространственной сетке полимерной матрицы, повышается степень структурирования системы. Таким образом, повышение температуры исходных компонентов способствует более полному отверждению эпоксидной композиции.

Определяющее влияние на пластично-вязкие свойства наполненных полимерных систем оказывает характер физико-химического взаимодействия между матрицей и дисперсным наполнителем. Поэтому представляли значительный интерес исследования влияния жидкого каучука марки СКН-КТР на предельное напряжение сдвига полимеррастворной смеси.

Эксперименты проводили на полимеррастворных композициях, составы которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Составы композиций

	Составы, %						
Компоненты	1	2	3	4	5	6	7
ЭД-20	100	100	100	100	100	100	100
ПЭПА	15	15	15	15	15	15	15
Наполнитель	300	300	300	300	300	300	300
Добавка	-	0,5	1,0	3,0	5,0	10,0	10,0

Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

Влияние концентрации СКН-КТР на предельное напряжение сдвига эпоксидных композитов

№ п/п	Предельное напряжение сдвига, Па													
	1,8	2,4	3,0	3,6	4,2	4,8	5,4	6,0	6,6	7,2	7,8	8,4	9,0	9,6
1	5,42	5,92	5,95	8,17	13,12	16,78	105,5	330	6130					
2	5,55	5,95	6,03	5,67	10,25	16,37	184,2	475	7771					
3	5,32	5,94	5,66	6,79	10,39	15,55	359,5	847	12847					
4	5,33	5,93	5,68	7,04	8,38	9,73	259,7	564	8381					
5	5,24	5,68	5,68	5,63	8,18	5,90	17,82	57.7	348,3	758,7	984,3	13860		
6	5,86	4,23	4,83	5,48	5,63	5,34	5,37	6,43	27,813	289,2	806,8	11496		
7	5,85	4,43	4,3	5,94	5,36	5,18	7,27	7,77	40,194	189,7	508,1	2565	6830	10002

Анализ результатов экспериментов показывает, что добавка каучука оказывает пластифицирующее действие на полимеррастворную смесь. Причем повышение концентрации каучука приводит к увеличению эффекта пластификации. Добавка каучука оказывает существенное влияние как на пластичность полимеррастворов в начальный момент времени после их приготовления, так и на характер изменения предельного напряжения сдвига отверждения данных композиций. В общем случае пластифицирующее действие жидкого каучука проявляется в снижении предельного напряжения сдвига эпоксидной композиции. В начальный момент времени максимальный пластифицирующий эффект наблюдается для композиций с содержанием добавки 1-5% от массы смолы.

Как показывают экспериментальные данные, жидкие каучуки оказывают существенное влияние на динамическую вязкость эпоксидной смолы. Использование жидких каучуков марок СКН-КТР и СКН-18 в количестве 0,5% способствует снижению динамической вязкости полимерной системы на 20-25%. При последующем увеличении количества вводимых добавок до 0,1% вязкость эпоксидной смолы несколько повышается. Дальнейшее повышение концентрации каучука в полимерной смеси приводит к монотонному снижению динамической вязкости. Минимальное значение динамической вязкости эпоксидной смолы с добавкой жидкого каучука получено при концентрации добавки 5,0%. В этом случае снижение вязкости составило более 30% для каучука марки СКН-18 и 33% для каучука марки СКН-КТР.

Полученные закономерности можно объяснить следующим образом. Малые добавки жидкого каучука (0,5%) способствуют пластификации полимера за счет частичного уменьшения сил трения между клубками и отдельными молекулами эпоксидного олигомера. При последующем увеличении количества добавок происходит коагуляция полимера с образованием агрегатов, включающих как молекулы эпоксидного олигомера, так и молекулы жидкого каучука, в результате чего вязкость полимерной системы возрастает. Дальнейшее увеличение количества добавок способствует эффективной межпачечной пластификации, при этом вязкость эпоксидного связующего значительно снижается.

Введение каучука в состав эпоксидных композитов дает и прямые материальные выгоды, так как снижение вязкости полимерного связующего позволяет сократить

расход эпоксидного полимера за счет введения повышенного количества минеральных наполнителей. Кроме того, эффект пластификации способствует снижению энергоемкости и трудоемкости приготовления и использования эпоксидных композиций, а также повышению производительности труда при производстве работ, так как увеличивается время отверждения композиции.

Выводы

1. Исследовано влияние добавок ЖСК на вязкость эпоксидной смолы. Установлено, что ЖСК снижает динамическую вязкость эпоксидной смолы на 30–40%.

2. Добавки ЖСК пластифицируют эпоксидный композит, наибольший эффект пластификации достигается при применении бутадиенакрилонитрильного каучука. Предельное напряжение сдвига снижается на 30%. Жизнеспособность увеличивается с 80 до 120 минут.

3. Показано, что добавки ЖСК повышают максимальную температуру тепловыделения (с 76 до 84°С) в процессе формирования структуры композита, увеличивают скорость снижения температуры композита при отверждении на 16%.

Список литературы

1. Ерофеев, В.Т. Разработка и исследование цементных и полимерных композитов для ремонта мостового сооружения / В.Т. Ерофеев, Б.А. Бондарев, В.М. Круглов, М.А. Гаврилов // Транспортные сооружения. – 2021. – Т.8, №2.

2. Гаврилов, М.А. Прочностные свойства модифицированных эпоксидных композитов / М.А. Гаврилов, Д.М. Гаврилова // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2021. – №2 (13). – С. 14–19.

3. Данилов, А.М. Разработка строительных материалов как сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина// Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №2. – С. 50–54.

4. Данилов, А.М. Структура наполненного эпоксидного связующего. Оптическая и сканирующая зондовая микроскопия / А.М. Данилов, В.П. Селяев, А.Н. Круглова // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №1. – С. 41–52.

5. Гаврилов, Г.Н. Технология изготовления композиционных материалов методами литья, проката и прессования / Г.Н. Гаврилов, В.А. Хренов, В.Т. Ерофеев, М.А. Гаврилов. – Саранск, 2020. – 232 с.

References

1. Erofeev, V.T. Research and Evaluation of Cement and Polymer Based Compositions for Bridge Structural Maintenance / V.T. Erofeev, B.A. Bondarev, V.M. Kruglov, M.A. Gavrilov // Transport Infrastructure. – 2021. – Vol. 8, Issue 2.

2. Gavrilov, M.A. Rigidity Properties of Modified Epoxy Composites / M.A. Gavrilov, D.M. Gavrilova // PGUAS Herald: Construction, Science and Education. – 2021. – №2 (13). – P. 14–19.

3. Danilov, A.M. Researching The Construction Materials As Complex Sytems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional Architecture and Engineering. – 2016. – Vol. 2. – P. 50–54.

4. Danilov, A.M. Structure of Filled Epoxy Binder. Optical and Scanning Probe Microscopy / A.M. Danilov, V.P. Selyaev, A.N. Kruglova // Regional Architecture and Engineering. – 2014. – Vol. 1. – P. 41–52.

5. Gavrilov, G.N. Technology of Production of Composite Materials by Means of Molding, Rolling and Pressing / G.N. Gavrilov, V.A. Hrenov, V.T. Erofeev, M.A. Gavrilov. – Saransk, 2020. – 232 p.

УДК 69.519.7 DOI 10.54734/20722958_2022_3_58

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

Moscow Polytechnic University
Russia, 107023, Moscow,
38, B.Semenovskaya St.
Budylina Eugenia Aleksandrovna,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the department «Infocognitive technologies»
E-mail: bud-ea@yandex,ru
Penza State University of Architecture and Construction
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77
Garkina Irina Aleksandrovna,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Mathematics
and Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru
Danilov 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

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

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

Приведены результаты анализа методологических принципов и современных подходов к исследованию сложных систем. Актуальность приводимых исследований определяется отсутствием стандартных подходов и необходимых теоретических обобщений синтеза композиционных материалов нового поколения.

Ключевые слова: сложные системы, материалы, синтез, методологические принципы, опыт реализации

EXPERIENCE IN APPLYING SYSTEM ANALYSIS METHODS IN BUILDING MATERIALS SCIENCE

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

The analysis of methodological principles and modern approaches to the study of complex systems is carried out. The relevance of the studies presented is determined by the lack of standard approaches and the necessary theoretical generalizations of new generation composite materials synthesis.

Keywords: complex systems, materials, synthesis, methodological principles, implementation experience

Научно-технический прогресс непосредственно связан с внедрением новых производственных технологий на основе все более глубокого изучения явлений и процессов, происходящих в системах разной структуры. Организация таких исследований требует разработки методологических принципов синтеза сложных систем. Существует ряд современных подходов к исследованию сложных систем: теория вложения

систем с аналитическим подходом к анализу и синтезу матричных систем (Буков В.М.); устранение межсистемных связей введением настраиваемых эталонных моделей с одновременной децентрализацией модулей по входу (Земляков С.Д.) и др. К сожалению, эти подходы при их теоретической стройности трудно использовать при синтезе композиционных материалов. Актуальность приводимых исследований определяется отсутствием стандартных подходов и необходимых теоретических обобщений синтеза композиционных материалов нового поколения как сложных систем с учетом их потребностей для нужд ядерной энергетики, химически опасных производств, строительства бункеров, могильников, хранилищ и т.д. Решение этих задач требует создания эффективных композиционных материалов специального назначения с заданными свойствами.

Возможность представления композиционных материалов как сложных систем с системными атрибутами [1…4], выделение системообразующих свойств материала, указание интегративных качеств не вызывает затруднений. Здесь налицо парадоксы целостности и иерархичности в задачах синтеза. Особую роль в задачах материаловедения играет декомпозиция системы при решении отдельных задач синтеза композиционных материалов. Традиционно оптимизация структуры и свойств композиционных материалов [5…8] основывается на кинетических процессах формирования физико-механических характеристик материалов, в последнее время – и на их компьютерном моделировании. В рамках полиструктурной теории Соломатова В.И. установление объективных закономерностей структурообразования и формирования свойств композита рассматривается на уровнях от микро- до макроструктуры.

Композиционный материал как многоцелевая сложная система оценивается несколькими показателями качества. Возникают задача векторной оптимизации и связанные с ней проблемы скаляризации и разработки функционалов качества. Управление структурой и свойствами материала осуществляется изменением соответствующих рецептурно-технологических параметров. С этой точки зрения очевиден подход к синтезу материалов как к задаче управления [9].

Остановимся подробнее на основных положениях рассматриваемого подхода к синтезу материалов. Система – совокупность элементов, соединенных отношениями, порождающими интегративное качество. При отсутствии интегративного качества сложный объект не является системой. Среди множества методов идентификации наибольший интерес представляют методы идентификации динамических процессов по данным нормального функционирования (по синхронным измерениям фазовых координат в процессе нормальной эксплуатации), поскольку при разработке материалов, как правило, имеются экспериментально полученные зависимости изменения контролируемых свойств от времени. С целью параметрической идентификации рассматриваются и отдельные кинетические процессы в гомогенных и дисперсных системах. Для гомогенных систем проявление отдельных структурных элементов системы подавляется глобальными процессами либо влияние этих элементов на систему незначительно Для дисперсных систем такое предположение, как правило, неприемлемо.

Основной проблемой при синтезе композитов является усиливающаяся фрагментация знания. Требуется аппарат синтеза, основанный на интеграции междисциплинарных категорий, с его развитием до уровня математической теории, в основе которой лежит идеальный объект, заданный в системе аксиом и способный выходить на уровень приложений в разных областях.

Разработка материалов специального назначения с заданным комплексом эксплуатационных свойств, а также с созданием базы компьютерного проектирования и управления технологией их производства (математическое моделирование, вычислительный эксперимент, разработка методов и алгоритмов структурно-параметрического синтеза, идентификация материалов как сложных систем) проводилась на основе комплексных исследований с позиций системного анализа соответствующих научных и технических проблем. При этом устанавливалась взаимосвязь состава, технологии производства, структуры и свойств материала. В их числе: структурная и парамет-

рическая идентификация, разработка функционалов качества, определение интегративных свойств систем с использованием автономных исследований сепаратных подсистем, введение настраиваемых эталонных моделей с одновременной децентрализацией модулей по входам, многокритериальный синтез, определение рецептурно-технологических параметров. Для целого ряда материалов производился качественный анализ материалов на основе построения когнитивной карты [10] с указанием причинно-следственных связей. Оптимизация каждого структурного уровня осуществлялась на основе выделенных критериев: с уточнением на каждом структурном уровне оптимизированных рецептуры и технологии предыдущего уровня.

При разработке и управлении качеством материалов с регулируемой структурой и свойствами использовались методы векторной оптимизации [3, 11] (лексикографическая задача; метод последовательных уступок; скаляризация критериев качества на основе линейной свертки и введения контрольных показателей; построение множеств Парето и др.). При выборе целевой функции учитывалась возможность установления связи между строением композита и изменениями макроскопических характеристик.

Управление качеством композитов основывалось на использовании принципа и диаграмм Парето (начальные 20 % определяют последующие 80 % времени выхода контролируемого параметра на эксплуатационное значение; облегчается разработка рецептуры с выделением элементов, определяющих эксплуатационные характеристики материала). Улучшение качества осуществлялось на основе итеративного способа с последовательным построением на каждом этапе соответствующих диаграмм Парето.

При управлении качеством материалов использовался и хемометрический подход (проекционные математические методы, позволяющие выделять в больших массивах данных латентные переменные и анализировать связи в изучаемой системе). К сожалению, несмотря на простоту и эффективность такого (часто и визуального) подхода к анализу экспериментальных данных, он пока редко используется в строительном материаловедении; ранжирование критериев качества $q_i, i=\overline{1,p}$ по полученным их значениям для n экспериментальных образцов производилось методом главных компонент [12].

Первая главная компонента определялась как направление наибольшего изменения (разброса вдоль некоторой центральной оси – новой переменной) данных $\mathbf{q}=\left\|q_{ij}\right\|, i=\overline{1,p}, j=\overline{1,n}$ в декартовой системе координат $Oq_1q_2...q_p$ (приближенно – чисто геометрически; уточнение – на основе наилучшей линейной аппроксимации всех исходных точек q_{ij} методом наименьших квадратов). Вторая главная компонента принималась (*по определению!*) ортогональной направлению первой (вдоль нее происходит следующее по величине изменение значений q_{ij}), а третья компонента – перпендикулярной как первой, так и второй (лежит в направлении, в котором происходит третье по величине изменение данных). Аналогично определялись последующие главные направления. Метод позволил осуществить декомпозицию исходной матрицы данных на структурную часть (несколько главных первых компонент, лежащих в направлениях максимальных изменений) и на шум (направления, в которых разница между положением точек мала и ей можно пренебречь).

Выводы

На основе анализа стандартных подходов и теоретических обобщений определены методологические принципы синтеза и подходы к разработке композиционных материалов нового поколения как сложных систем. Особое внимание направлено на интеграцию междисциплинарных исследований и формирование идеального объекта, заданного в системе аксиом, с возможностью приложений в разных областях.

Список литературы

1. Garkina, I. Analytical design of building materials / I. Garkina, A. Danilov // Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.

2. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.

3. Гарькина, И.А. Аналитическое конструирование композитов: многомодельность, структура модели, декомпозиция, критерии качества / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 2 (47). – С. 22–28.

4. Будылина, Е.А. Системные исследования в материаловедении / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 4 (49). – С. 48–53.

5. 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.

6. 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.

7. Селяев, В.П. Анализ прочности цементных композитов с учетом масштабной инвариантности фрактального строения структуры / В.П. Селяев, П.В. Селяев, Е.В. Сорокин, Е.Л. Кечуткина // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2017. – № 20. – С. 218–229.

8. Королев, Е.В. Композиционные материалы как полидисперсные системы. Эффективные модели / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Айзенштадт // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 3 (48). – С. 16–25.

9. Garkina, I. Principles of optimal control in the synthesis of composite materials / I. Garkina, A. Danilov, V. Selyaev // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 723. – P. 32–36.

10. Абрамова, Н.А. Некоторые критерии достоверности моделей на основе когнитивных карт / Н.А. Абрамова, С.В. Коврига // Проблемы управления. – №6. – 2008. – С. 23–33.

11. Гарькина, И.А. Системный анализ в управлении свойствами материалов / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 3 (48). – С. 63–68.

12. Данилов, А.М. Анализ показателей лакокрасочных покрытий методом главных компонент / А.М. Данилов, В.И. Логанина, В.А. Смирнов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2009. – № 1 (11). – С. 143–146.

References

1. Garkina, I. Analytical design of building materials / I. Garkina, A. Danilov // Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.

2. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.

3. Garkina, I.A. Analytical design of composites: multi-modeling, model structure, decomposition, quality criteria / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – №2 (47). – P. 22–28.

4. Budylina, E.A. System research in materials science / E.A. Budylina, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 4 (49). – P. 48–53.

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

6. Sokolova, Yu.V. Evaluation of the influence of prescription factors on the structure formation of a polymer-organic binder / Yu.V. Sokolova, A.M. Aizenshtadt, E.V. Korolev, A.A. Chibisov // Building materials. – 2020. – № 9. – P. 27–36.

7. Selyaev, V.P. Analysis of the strength of cement composites taking into account the scale invariance of the fractal structure of the structure / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, E.V. Sorokin, E.L. Kechutkina // Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences. – 2017. – № 20. – P. 218–229.

8. Korolev, E.V. Composite materials as polydisperse systems. Effective models / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenstadt // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 3 (48). – P. 16–25.

9. Garkina, I. Principles of optimal control in the synthesis of composite materials / I. Garkina, A. Danilov, V. Selyaev // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 723. – P. 32–36.

10. Abramova, N.A. Some criteria for the reliability of models based on cognitive maps / N.A. Abramova, S.V. Kovriga //Problemy upravleniya. – 2008. – № 6. – P. 23–33.

11. Garkina, I.A. System analysis in the management of material properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering. – 2021. – №3 (48). – P. 63–68.

12. Danilov, A.M. Analysis of indicators of paint and varnish coatings by the method of principal components / A.M. Danilov, V.I. Loganina, V.A. Smirnov // Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2009. – № 1 (11). – P. 143–146.

УДК 691.5 DOI 10.54734/20722958_2022_3_63

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

Зайцева Мария Владимировна,
аспирант кафедры «Управление качеством и технология строительного производства»
E-mail: zajc@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

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

Zaytseva Maria Vladimirovna,
Postgraduate student of the Department «Quality Management and Construction Production Technology»
E-mail:zajc@yandex.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА СОСТАВОВ ДЛЯ ОТДЕЛКИ СТЕН ЗДАНИЙ

В.И. Логанина, М.В. Зайцева

Приведена методика обеспечения качества отделочных покрытий, заключающаяся в применении системы контроля с показателями достоверности, риска производителя, риска поставщика, а также в учете вариабельности сырья. Установлена корреляционная связь между вариативностью сырья и вариативностью конечного продукта – сухой строительной смеси. На примере известковой отделочной смеси рассмотрена процедура подбора рецептуры с учетом вариабельности и применения системы контроля с показателем достоверности контроля прочности.

Ключевые слова: модель обеспечения качества, достоверность контроля, отделочные покрытия, вариабельность сырья

QUALITY ASSURANCE OF COMPOSITIONS FOR FINISHING BUILDINGS WALLS

V.I. Loganina, M.V. Zaytseva

Some information is given on the methodology for ensuring the quality of finishing coatings, consisting of the use of a control system with indicators of reliability, manufacturer's risk, supplier's risk, as well as taking into account the variability of raw materials. A correlation has been established between the variability of raw materials and the variability of the final product – a dry building mix. On the example of a lime finishing mixture the procedure for selecting a recipe taking into account variability and using a control system with an indicator of reliability of strength control is considered.

Keywords: quality assurance model, control reliability, finishing coatings, raw material variability

Основной задачей предприятия по выпуску отделочных составов является повышение качества производимой продукции. Важным элементом управления качеством выпускаемой продукции строительного назначения являются измерения и контроль качества [1–4]. Эффективный контроль дает возможность избегать возникающих при работе сбоев, выявлять и ликвидировать их с наименьшими для предприятия потерями [5, 6].

Качество продукции зависит также и от рецептурно-технологических факторов. Известно, что и сырью, и любому технологическому процессу присущи определенные доли вариабельности [7, 8]. Полная изменчивость производства продукции зависит от влияния как случайных (обычных), так и неслучайных (особых) причин вариаций.

Это, несомненно, также оказывает влияние на показатели качества конечной продукции и достоверность контроля качества

Рассмотрим некоторые методы обеспечения качества отделочных материалов с гарантированным уровнем качества. Модель обеспечения качества приведена на рис. 1.

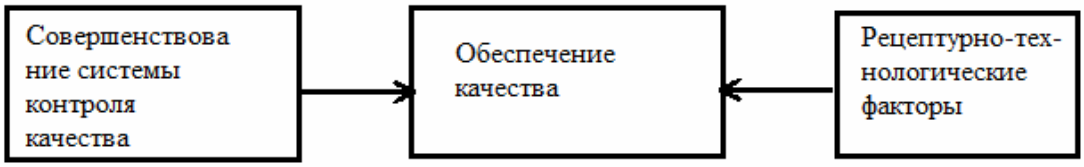


Рис. 1. Модель обеспечения качества

Решение о качестве продукции принимается на основе сравнения показателя с допусками, установленными в нормативной документации. Под годным понимается параметр, находящийся в пределах установленного допуска. Однако в силу погрешности измерения нередко наблюдается ошибочная забраковка некоторой части годных изделий, действительные значения контролируемого параметра которых лежат в поле допуска (с вероятностью α – риск производителя) и приемка бракованных изделий с отклонениями, выходящими за границы поля допуска (с вероятностью β – риск потребителя) [9, 10].

На примере производства штукатурных растворов как одного из видов отделочных материалов была оценена достоверность контроля качества по каждому из параметров измерения в соответствии с ГОСТ 33083-2014 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем для штукатурных работ. Технические условия», ГОСТ 31357-2013 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия». Оценка достоверности контроля качества была проведена по следующим показателям: плотность, подвижность, водоудерживающая способность, прочность на сжатие, водопоглощение при капиллярном подсосе, прочность сцепления.

Достоверность контроля $P_д$ вычислялась в соответствии с формулой

$$P_д = 1 - \alpha - \beta, \quad (1)$$

где α – ошибка 1-го рода (риск изготовителя, вероятность того, что фактически годное изделие будет признано негодным); β – ошибка 2-го рода (риск потребителя, вероятность того, что неработоспособное изделие будет признано годным).

На достоверность контроля качества оказывает влияние число контролируемых показателей. При росте числа показателей значение достоверности падает. Например, при числе показателей контроля на уровне четырех (n=4) значение достоверности составило 97%, тогда как при числе n=10 снизилось до 94,6%, т.е. опустилось ниже нормативного значения, равного 95%.

Чтобы гарантировать качество отделочных покрытий, действия по обеспечению надежности должны начинаться на ранней стадии цикла разработки продукта [11]. Уже на стадии проектирования рецептуры отделочного состава можно влиять на качество конечной продукции и повысить достоверность контроля. Корреляционная связь между вариативность сырья и вариативностью конечного продукта – сухой строительной смеси – была проанализирована на примере показателей качества сырья и показателей качества конечной продукции завода компании New MIX (Пензенская область).

Строительную смесь можно рассматривать как систему, состоящую из множества входных переменных и одной или нескольких выходных переменных [12]. Пусть σ_Y обозначает дисперсию выходной переменной Y, а $\sigma_1, \sigma_2 \ldots \sigma_n$ обозначают дисперсию входных переменных $X_1, X_2, \ldots, X_n$.

Рассмотрим строительную смесь – штукатурку CemPlast производства компании New MIX (Пензенская область). Для изготовления ССС применялись цементы Сенгилеевский ЦЕМ I 42,5Б (Евроцементгрупп), Хальденберг ЦЕМ I 42,5Н компании «ХальдельбергЦемент Волга». В качестве наполнителя использовался кварцевый песок Махалинского месторождения. Значения среднеквадратического отклонения рассчитывались для показателей прочности при сжатии ССС, а также для показателей активности цемента, модуля крупности песка [13]. Будем считать, что контролируемые параметры являются нормально распределенными случайными величинами [14]. Результаты статистической обработки данных приведены в табл 1.

Таблица 1

Вариативность показателей качества ССС и сырья

Среднеквадратическое отклонение		
Хальденберг (активность)	Сенгилеевский (активность)	Песок (модуль крупности)
4,5/1,18	4,1/1,05	0,16/1,1
4,7/1,24	4,2/1,1	0,18/1,3
4,9/1,4	4,6/1,3	0,23/1,5
5,23/1,8	4,9/1,6	0,267/1,92
5,7/2,3	5,2/1,8	0,8/2,3

Примечание. Над чертой приведены значения среднеквадратического отклонения активности цемента и модуля крупности песка, под чертой – прочности при сжатии ССС-CemPlast.

Установлена функциональная связь между вариативностью показателей качества отделочного состава и вариативностью показателей качества входных переменных (сырья). Для составов CemPlast зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) показателя прочности при сжатии от СКО показателя активности цемента, модуля крупности песка имеет вид

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

На рис. 2 приведена графическая модель зависимости СКО прочности при сжатии от СКО показателя активности цемента. Значения коэффициентов в модели (2) для СКО активности цемента равны a=5,031; b=-2,3; c=0,32. Коэффициент корреляции составляет r= 0,996.

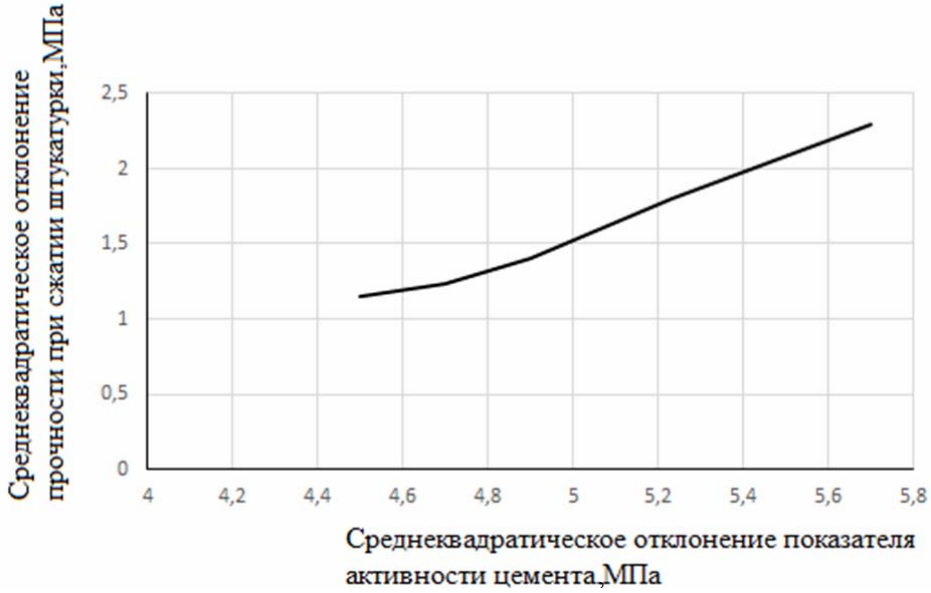


Рис. 2. Зависимость среднеквадратического отклонения прочности при сжатии штукатурки CemPlast от значения среднеквадратического отклонения показателя активности цемента

Пользуясь предлагаемой моделью, можно уточнить требования к СКО показателей качества сырья. Таким образом, предлагаемый подход позволит регулировать качество выпускаемой продукции уже на стадии проектирования и позволит минимизировать затраты как для производителя, так и для потребителя.

Исходя из вышеизложенного, подбор рецептуры известкового отделочного состава проводился с учетом вариабельности сырья и оценки качества отделочного композита с применением системы контроля, включающей достоверность показателей качества.

В качестве наполнителя применяли кварцевый песок, маршалит и микрокальцит. Оценивалась прочность при сжатии в зависимости от вида наполнителя (табл. 2).

Таблица 2

Влияние наполнителя на прочность при сжатии известкового композита

Вид наполнителя	Содержание наполнителя	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент вариации, %	Среднеквадратическое отклонение, СКО, МПа
Песок фракции 0,315-0,63	1:3, В/И=1,26	1,09	10,3	0,112
Маршалит	1:3, В/И=1,26	1,39	7,2	0,1
Микрокальцит	1:3, В/И=1,26	1,69	5,4	0,091

Установлено, что прочность при сжатии известковых композитов с применением в качестве наполнителя микрокальцита выше и составляет 1,69 МПа, в то время как с применением маршалита – 1,39 МПа, кварцевого песка – 1,09 МПа. Следует отметить, что вариативность показателя прочности известкового композита с применением в качестве наполнителя маршалита или песка выше по сравнению с вариативностью прочности композита на микрокальцитовом наполнителе. Так, коэффициент вариации прочности композита на песке 10,3%, на маршалите 7,2%, а на микрокальците – 5,4%.

Была проанализирована достоверность определения прочности известковых композитов на основе этих составов [15]. Результаты расчетов свидетельствуют, что при применении микрокальцита риск производителя α составляет 0,0016351, риск потребителя β – 0,0008716, достоверность контроля – 0,9974, что выше нормативного значения.

Установлены свойства отделочного состава на основе разработанной рецептуры (табл. 3).

Таблица 3

Технологические и эксплуатационные свойства разработанного состава и покрытий на его основе

Наименование показателя	Величина показателя для состава
Прочность при сжатии, МПа	3,5
Прочность сцепления, МПа	1,2
Когезионная прочность, МПа	2,385
Морозостойкость, марка	F35
Удобонаносимость	хорошая
Наличие трещин вследствие усадки	нет
Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)	0,065
Водоудерживающая способность,%	98
Жизнеспособность, час	5-7
Стойкость к статическому воздействию воды при (20 ± 2) °С, час	Более 72
Рекомендуемая толщина одного слоя, мм	3-5
Расход отделочного состава при толщине слоя 10 мм, кг/м^2	0,5

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. К вопросу о регулировании технологических процессов производства бетона / В.И. Логанина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 3–4 (603–604). – С. 42–45.

3. Логанина, В.И. К вопросу о системе контроля качества на предприятиях стройиндустрии / В.И. Логанина, Т.В. Учаева // Региональная архитектура и строительство. – 2010. – № 1. – С. 31–33.

4. Логанина, В.И. Организация статистического приемочного контроля качества строительных изделий и конструкций / В.И. Логанина // Строительные материалы. – 2008. – № 8. – С. 98–99.

5. Адлер, Ю.П. Оперативное статистическое управление качеством / Ю.П. Адлер, Б.Л. Розовский. – М.: Знание, 1984. – 102 с.

6. Шиндловский, Э. Статистические методы управления качеством / Э. Шиндловский, О. Щюрц. – М.: Мир, 1976. – 598 с.

7. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Юрайт, 2020. – 479 с.

8. Логанина, В.И. Оценка качества сухих строительных смесей с учетом вариабельности сырья / В.И. Логанина, Е.И. Куимова, М.В. Зайцева, Д.К. Галкина // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №3(48). – С.74–77.

9. Серых, В.И. Многопараметрический контроль продукции: достоверность и затраты / В.И. Серых, С.П. Порватов, В.И. Сединин // Методы менеджмента качества. – 2010. – №5. – С.48–52.

10. Рубичев, Н.А. Достоверность допускового контроля качества / Н.А. Рубичев, В.Д. Фрумкин. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 172 с.

11. Логанина, В.И. Управление качеством на предприятиях стройиндустрии / В.И. Логанина, О.В. Карпова, Л.В. Макарова. – М.: АСВ,2008.

12. Шиндловский, Э. Статистические методы управления качеством / Э. Шиндловский, О. Щюрц. – М.: Мир, 1976. – 598 с.

13. Логанина, В.И. К вопросу о контроле качества бетона / В.И. Логанина, М.В. Зайцева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2021. – No4. – С.8–12. – DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-8-12

14. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Юрайт, 2020. – 479 с.

15. 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.

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. To the question of regulation of technological processes of concrete production / V.I. Loganina // News of higher educational institutions. Construction. – 2009. – No. 3–4 (603–604). – P. 42–45.

3. Loganina, V.I. On the issue of the quality control system at the enterprises of the construction industry / V.I. Loganina, T.V. Uchaeva // Regional architecture and engineering. – 2010. – No. 1. – P. 31–33.

4. 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.

5. Adler, Yu.P. Operational statistical quality control / Yu.P. Adler, B.L. Rozovsky. – M.: Knowledge, 1984. – 102 p.

6. Shindlovsky, E. Statistical methods of quality management / E. Shindlovsky, O. Schyurts. – M.: Mir, 1976. – 598p.

7. Gmurman, V.E. Probability theory and mathematical statistics / V.E. Gmurman. – M.: Yurayt Publishing House, 2020. – 479 p.

8. Loganina, V.I. Assessment of the quality of dry building mixes, taking into account the variability of raw materials / V.I. Loganina, E.I. Kuimova, M.V. Zaitseva, D.K. Galkina // Regional architecture and engineering. – 2021. – №3(48). – P.74–77.

9. Serykh, V. I. Multiparametric control of products: reliability and costs / V.I. Serykh, S.P. Porvatov, V.I. Sedinin // Methods of quality management. – 2010. – No. 5. – P.48–52.

10. Rubichev, N.A. Reliability of tolerance quality control / N.A. Rubichev, V.D. Frumkin. – M.: Publishing House of Standards, 1990. – 172 p.

11. Loganina, V.I. Quality management at construction industry enterprises / V.I. Loganina, O.V. Karpova, L.V. Makarova. – M.: DIA, 2008.

12. Shindlovsky, E. Statistical methods of quality management / E. Shindlovsky, O. Shchyurts. – M.: Mir, 1976. – 598 p.

13. Loganina, V.I. On the issue of quality control of concrete / V.I. Loganina, M.V. Zaitseva // Vestnik BSTU im. V.G. Shukhov. – 2021. – No4. – P.8–12. – DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-8-12

14. Gmurman, V.E. Probability theory and mathematical statistics / V.E. Gmurman. – M.: Yurayt Publishing House, 2020. – 479 p.

15. 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.

УДК 691.553 DOI 10.54734/20722958_2022_3_69

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова
Россия, 426069, Ижевск, ул.Студенческая, д.7
Гордина Анастасия Федоровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы, механизация и геотехника»
E-mail: afspirit@rambler.ru
Гуменюк Александр Николаевич, аспирант кафедры «Строительные материалы, механизация и геотехника»
E-mail: gumeniuk.an@gmail.com
Полянских Ирина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы, механизация и геотехника»
E-mail: irina_maeva@mail.ru
Гафипов Алмаз Тагирович, магистрант кафедры «Строительные материалы, механизация и геотехника»
E-mail: a.gafipov@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University
Russia, 426069, Izhevsk, 7, Studencheskaya St.
Gordina Anastasiya Fedorovna, Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Geotechnical Engineering and Building Materials»
E-mail: afspirit@rambler.ru
Gumenyuk, Alexander Nikolaevich, Postgraduate student of the department «Geotechnical Engineering and Building Materials»
E-mail: gumeniuk.an@gmail.com
Polyanskikh Irina Sergeevna, Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Geotechnical Engineering and Building Materials»
E-mail: irina_maeva@mail.ru
Gafipov Almaz Tagirovich, Undergraduate student of the department «Geotechnical Engineering and Building Materials»
E-mail: a.gafipov@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА ФТОРАНГИДРИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Ф. Гордина, А.Н. Гуменюк, И.С. Полянских, А.Т. Гафипов

Приведены результаты исследования комплексного влияния активаторов твердения – сульфата натрия, портландцемента, фосфата натрия – и техногенной добавки – металлургической пыли на физико-технические свойства композиционного материала на основе фторангидрита. Определена оптимальная концентрация добавок (3 % активатора и 0,5–1,5 % металлургической пыли), при которой наблюдается рост физико-технических показателей разработанного материала, таких, как механические характеристики, водопоглощение и коэффициент размягчения. Установлено, что комплексное введение добавок способствует не только более полному переходу нерастворимого сульфата кальция в двуводную модификацию, но и уплотнению структуры композита.

Ключевые слова: фторангидритовые вяжущие, активаторы твердения, комплексные добавки, техногенные материалы, физико-технические свойства, водостойкость

IMPACT OF COMPLEX ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF FLUORANHYDRATE-BASED MATERIALS

A.F. Gordina, A.N. Gumenuk, I.S. Polyanskikh, A.T. Gafipov

The complex impact of accelerators such as sodium sulfate, Portland cement, sodium phosphate with a man-made additive (metallurgical dust) on physical-mechanical properties of fluoranhydrite-based material has been tested. The optimum percentage of complex additives hase been found out (3 % of accelerator and 5-1,5 % of metallurgical dust), this percentage leads to improving physical-mechanical properties of the material, including mechanical properties, reducing water absorption and changing the coefficient of softening. Adding these components as a complex additive has resulted in

more complete transformation of unsolvable form of calcium sulfate to calcium dehydrate to more extend than without complex additive and also it has allowed denser structure to be formed.

Keywords: fluoranhydrate-based binders, accelerator, complex additives, man-made materials, physical-mechanical properties, water resistance

Известно, что вяжущие на основе ангидрита относятся к экологическим и малоэнергоемким материалам, физико-технические свойства которых сравнимы с портландцементом. К данной группе вяжущих наряду с природными ангидритами относят широкий спектр техногенных продуктов, включая фосфогипс, фторангидрит, синтетический ангидрит. Преимущественно вяжущие на основе безводного сульфата кальция применяют для устройства самонивелирующихся стяжек [1], для изготовления штукатруных и кладочных растворов [2, 3], в качестве основания для дорожного полотна [4], для получения искусственного мрамора и т.д.

Гидратация ангидритовых вяжущих обусловлена превращением безводного сульфата кальция в дигидрат. Однако процесс структурообразования характеризуется низкой скоростью и ограниченным объемом ангидрита, переходящего в гипс.

Интенсифицировать процессы гидратации техногенного вяжущего на основе ангидрита можно путем введения активаторов твердения [5, 6]. Механизм влияния активаторов зависит от состава вводимых соединений и главным образом характеризуется ускорением растворения сульфата кальция или формированием комплексных соединений, способствующих регулированию процесса зарождения новообразований [7–9].

Виды добавок, установленные согласно механизму их действия в соответствии с классификацией, разработанной В.Б. Ратиновым и Т.И. Розенбергом, позволяют выбрать компонент в зависимости от требуемых физико-технологических характеристик разрабатываемого материала. При этом стоит отметить, что комплексное воздействие минеральных добавок и активаторов твердения в данной классификации не представлено.

Исследователями [9, 10] показана возможность интенсификации процессов структурообразования ангидритовых вяжущих введением двойных сульфатных солей, действие которых проявляется в подавлении процесса гидролиза сульфата кальция, при этом отмечен кольматирующий эффект подобных добавок, обусловленный формированием малорастворимых соединений, – сингенита, коктаита, глауберита или гидроглауберита. Комплексная активация не только позволяет улучшить механические свойства, но и способствует значительному росту водостойкости материала. Оптимальный диапазон концентрации добавок варьируется от 1 до 5 %.

Отмечено [11, 12], что введение сульфатных солей в количестве 2–3 % (включая сульфит натрия) приводит к ускорению и раннему набору прочности, в то время как введение сульфата натрия позволяет направленно влиять на структурообразование на более поздних этапах, способствуя получению однородной и прочной матрицы с более совершенными кристаллогидратами гипса.

Добавление щелочного агента в качестве активатора в виде гидроксида кальция (обожжённого гипсового камня) в количестве до 7 % приводит к росту механических свойств, но ускорения твердения не наблюдается, на ранних этапах набора прочности значение предела прочности ниже, чем при сульфатной активации твердения [13].

Введение оптимального активатора способствует интенсификации процессов гидратации и твердения ангидрита, приводя к росту механических параметров матрицы, при этом основной недостаток, ограничивающий применение воздушных вяжущих, а именно низкая водостойкость, остается неизменным. Одним из способов повышения данной характеристики является использование минеральных добавок совместно с активатором твердения. Комплексное введение добавок не только способствует интенсификации процессов гидратации и твердения, но и приводит к формированию в структуре матрицы малорастворимых новообразований, которые заполняют поровое пространство и затрудняют процесс вымывания сульфатных кристаллогидратов.

Установлено, что введение в состав ангидрита техногенных минеральных продуктов обеспечивает улучшение прочностных характеристик и водостойкости композиционных материалов за счет формирования плотной матрицы повышенной плотности с покрытием кристаллов двуводного сульфата кальция нерастворимыми в воде соединениями. Подобный эффект наблюдается при совместном введении микрокремнезема, извести и пластификатора [14], при введении 1–5 % алюмохромового катализатора совместно с сульфатным активатором (гидросульфитом натрия) [15], при совместном введении 15–25 % феррохромового шлака с негашеной известью [16], при добавлении 5–15 % железного сурика или обожженного отхода очистки кислых шахтных вод, которые наряду с окисью металла содержат свободную известь [17]

Ранее проведенные авторами исследования [18] позволили установить, что при совместном введении в состав фторангидрита гидросульфита натрия в количестве 0,8 % и металлургической пыли в количестве 1 % предел прочности на сжатие в возрасте 28 суток достигает значения 29,7 МПа, водопоглощение составляет 5,9 % и коэффициент размягчения равен 0,87. Улучшение физико-технических свойств обусловлено формированием плотной и более однородной структуры. Таким образом, оптимизация комплексных добавок для повышения физико-технических характеристик ангидритовых вяжущих является достаточно актуальным направлением.

На основе анализа исследований были выбраны активаторы твердения различного механизма действия, обеспечивающие формирование труднорастворимых соединений, – сульфатный и щелочной активаторы. Целью исследования являлось изучение комплексного влияния активаторов твердения – сульфата натрия, портландцемента, фосфата натрия, металлургической пыли – на физико-технические свойства композиционного материала на основе фторангидрита.

Был использован порошкообразный фторангидрит – отход производства плавиковой кислоты компании АО «ГалоПолимер», г. Пермь, соответствующий ТУ 5744-132-05807960-98. Техногенный продукт предварительно подвергался дроблению и измельчению, использовался материал, характеризующийся остатком на сите №0,315 (не более 10 %).

Для улучшения физико-технических характеристик в состав техногенного вяжущего совместно вводились выбранный активатор твердения и металлургическая пыль. В качестве активаторов твердения применялись сульфат натрия, портландцемент ЦЕМ I 32,5Н компании ООО ТД «Корунд» и фосфат натрия. Концентрация активаторов на основе анализа литературных данных и результатов ранее проведенных исследований была принята постоянной и равнялась 3 %; соли растворялись в воде затворения для получения соответствующего раствора.

В качестве минерального компонента комплексной добавки использовалась металлургическая пыль – техногенных материал, который скапливается на циклонах при производстве стали на предприятии ОАО «Ижсталь», г. Ижевск. Анализ химического состава металлургической колошниковой пыли был проведен на рентгеновском флуоресцентном спектрометре с волновой дисперсией «Axios mAX» (фирма PANalytical). В состав добавки входят следующие оксиды металлов: оксид железа (III) (Fe_2O_3) – 54 %, оксид магния (MgO) – 14 %, оксид кальция (CaO) – 12 %, оксид кремния (SiO_2) – 6 %. В качестве примесей (1–2 %) содержатся оксиды хрома (III), алюминия, марганца и цинка. Однако в процессе хранения часть оксидов металлов переходит в соответствующие гидроксиды, формируется аморфная фаза. Дисперсионный анализ добавки показал, что средний размер частиц составляет 50–80 мкм, однако более 50 % частиц порошка находится в диапазоне с размером частиц менее 35 мкм.

Комплексное исследование физико-механических свойств, включая прочностные характеристики и параметры водостойкости, проведено в соответствии с ГОСТ 23789-79 и ГОСТ 23789-2018 «Вяжущие гипсовые. Методы испытаний». Для определения свойств изготавливались образцы-балочки размерами 160×40×40 мм, которые до испытания хранились при температуре 20 ± 5° С в течение 28 дней.

Исследование микроструктуры композита выполнялось на сканирующих электронных микроскопах Thermo Fisher Scientific Quattro S в центре коллективного

пользования «Поверхность и новые материалы» при УдмФИЦ УрО РАН (проект Министерства науки и высшего образования РФ № RFMEFI62119X0035), JSM 7500 F фирмы «JEOL» и ESEM XL-30. ИК-спектральный анализ проведен с помощью ИК-Фурье-спектрометра IRAffinity-1 производства Shimadzu в области частот 4000–400 см$^{-1}$.

Установлено [19], что при гидратации фторангидритого вяжущего без введения активатора твердения в составе материала превалирует промежуточное соединение $CaSO_4 \cdot 0{,}62H_2O$, которое постепенно перекристаллизуется в двугидрат сульфата кальция. При этом в структуре материала преобладают пластинчатые кристаллы $CaSO_4 \cdot 0{,}62H_2O$ и мелкокристаллическая масса непрореагировавшего ангидрита (представленная нерастворимой модификацией ангидрита). При этом введение в состав техногенного вяжущего активатора твердения в виде фосфата натрия (3 % водный раствора) не только интенсифицирует процессы структурообразования, но и создает благоприятные условия для более полного перехода ангидрита в двугидрат сульфата кальция [20]. Добавление сульфата натрия (до 3 %) обеспечивает ускорение процесса гидратации и твердения, однако может наблюдаться снижение прочностных характеристик. Введение портландцемента (до 7 %) наряду с интенсификацией прессов структурообразования способствует росту прочности образцов при выдерживании образцов во влажных условиях при твердении и незначительному росту коэффициента размягчения [7].

В структуре фторангидрита (рис.1), завторенного водой, превалируют мелкие кристаллы таблитчатой и кубовидной форм, размер кристаллов варьируется от 0,2 до 1 мкм, структура матрицы рыхлая. Это свидетельствует о том, что матрица сложена из кристаллов ангидрита, гидратация прошла в небольшом объеме. При введении активатора твердения наблюдается формирование крупных конгломератов, сложенных из мелкодисперсных частиц, размер которых не превышает 0,5 мкм, при этом можно отметить увеличенную площадь контактной зоны между кристаллогидратами. Однако формирование кристаллов двугидрата сульфата кальция наблюдается в незначительном объеме, в структуре преобладают таблитчатые кристаллы ангидрита. Для улучшения условий гидратации было принято решении о введении дополнительной добавки – металлургической пыли, выступающей в роли затравки в процессах структурообразования.

а б

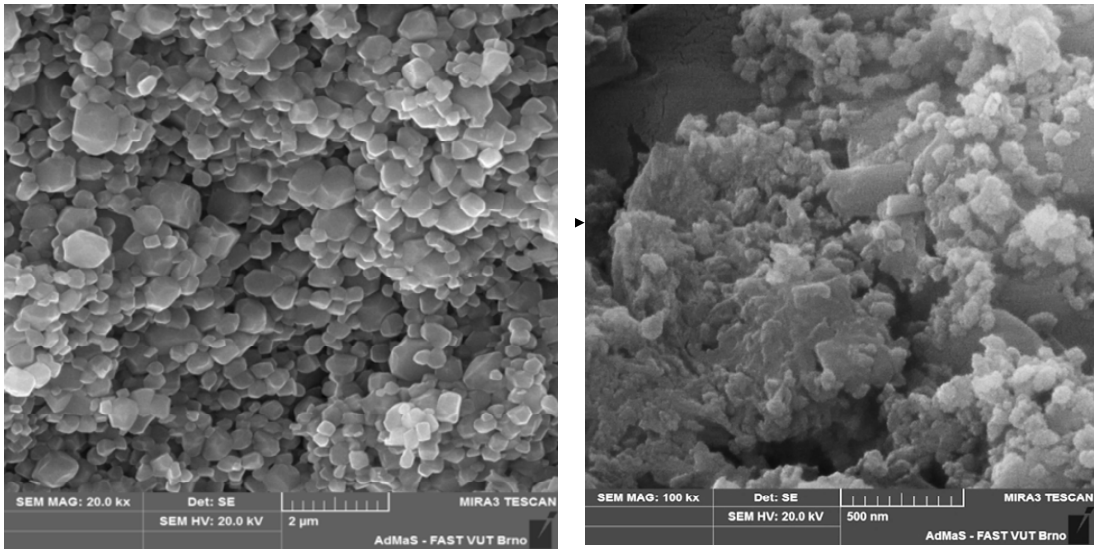
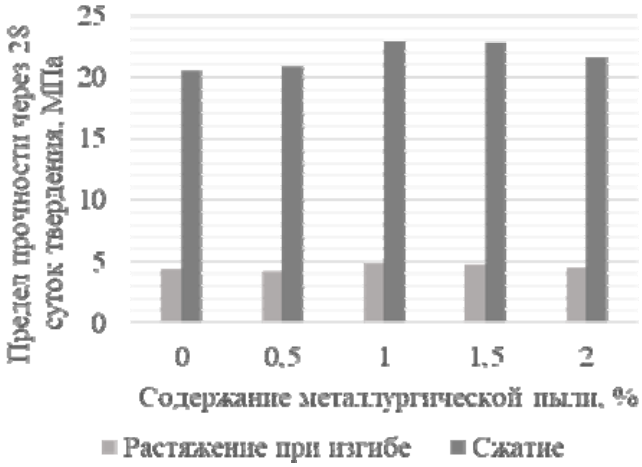


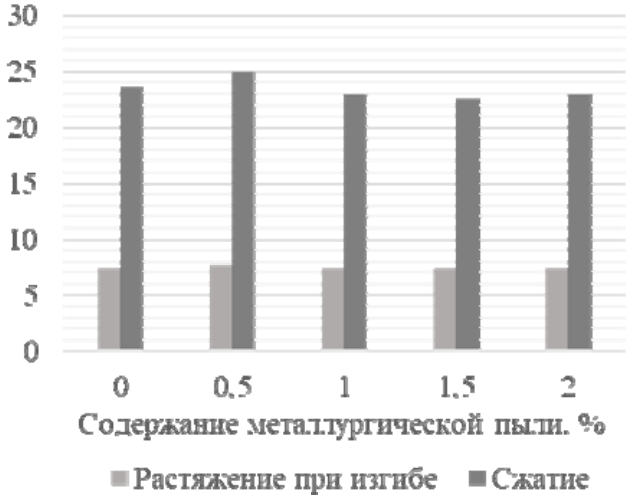
Рис. 1. Микроструктура фторангидрита [10]:
а – затворенного водой; б – активированного 3 % водным раствором фосфата натрия

Исследование комплексного влияния активатора и металлургической пыли на свойства фторангидрита позволило установить положительное влияние комплекса модификаторов на механические характеристики материала (рис. 2).

а



б



в

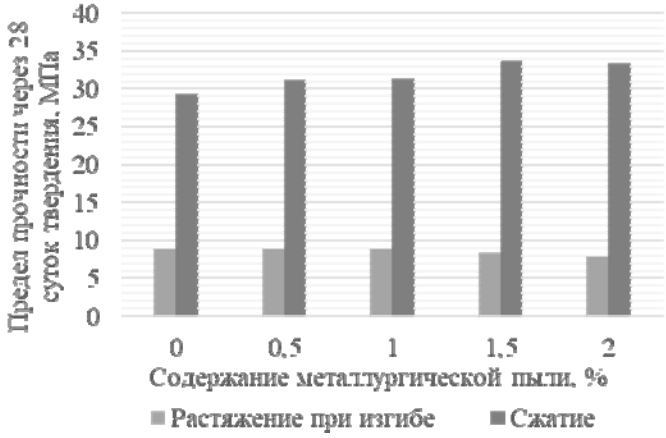


Рис. 2. Механические свойства фторангидритовых композиций при комплексном введении 3 % активатора твердения и металлургической пыли:
а – портландцемента; б – сульфата натрия; в – фосфата натрия

Комплексное введение активатора твердения и металлургической пыли обеспечивает улучшение прочностных характеристик фторангидритовых композиций. Оптимальная концентрация металлургической пыли в зависимости от вида выбранного активатора твердения варьируется от 0,5 до 1,5 %. Наибольший прирост механических

свойств наблюдается при совместном добавлении металлургической пыли и фосфата натрия, обеспечивая значение предела прочности в возрасте 28 дней на растяжение при изгибе, равное 8,5 МПа, и на сжатие – 33,7 МРа. Вероятно, частицы техногенной минеральной добавки выступают в качестве дополнительных центров кристаллизации в процессе гидратации и твердения вяжущего, а также вступают во взаимодействие с щелочным компонентом фторангидритового вяжущего (CaO), приводя к образованию малорастворимых соединений.

Характеристики водостойкости (водопоглощение и коэффициент водостойкости) оптимизированных композиций на основе техногенного ангидрита приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-технические характеристики ангидритовых композиций

№	Вид активатора	Кол-во активатора, %	Содержание МП, %	В/Г отношение	Средняя плотность, кг/м^3	Предел прочности в возрасте 28 дней, МПа		Водопоглощение, %	Коэффициент размягчения
						изгиб	сжатие		
1	-	0	0	0,25	1850	3,5	20	10,4	0,51
2	ЦЕМ I	3	0	0,22	1880	4,4	20,5	11,7	0,59
3	ЦЕМ I	3	1,5	0,22	1900	4,7	22,9	11,4	0,76
4	Сульфат натрия	3	0	0,22	1900	7,4	23,6	9,5	0,75
5	Сульфат натрия	3	0,5	0,22	1910	7,6	24,9	9,6	0,71
6	Фосфат натрия	3	0	0,22	1920	8,7	29,4	7,2	0,86
7	Фосфат натрия	3	1,5	0,22	1930	8,8	33,7	7,1	0,79

Сравнительный анализ позволят сделать вывод о большей эффективности использования фосфата натрия в качестве активатора твердения ангидритового вяжущего. Значительный рост физико-технических свойств обусловлен формированием труднодиссоциируемых соединений на основе фосфатов кальция в структуре материала, которые замедляют процесс гидратации на начальных этапах, но способствуют уплотнению структуры материала и обеспечивают улучшение водостойкости камня на поздних этапах структурообразования. Введение металлургической пыли способствует росту плотности композита, снижению водопоглощения, но при этом наблюдается незначительное снижение коэффициента размягчения по сравнению с результатом введения соответствующего активатора твердения. Вероятно, это обусловлено тем, что формируются условия для более полного преобразования нерастворимого ангидрита в двугидрат сульфата кальция, который вымывается при воздействии влаги. Это предположение подтверждается ростом механических характеристик образцов в сухом состоянии, снижением прочности в водонасыщенном виде.

Для определения характера взаимодействия между фторангидритовым вяжущим, активатором твердения и техногенной добавкой был проведен ИК-анализ затвердевших композитов.

В результате расшифровки ИК-спектров образцов матрицы (рис. 3) были выявлены следующие функциональные группы (табл. 2).

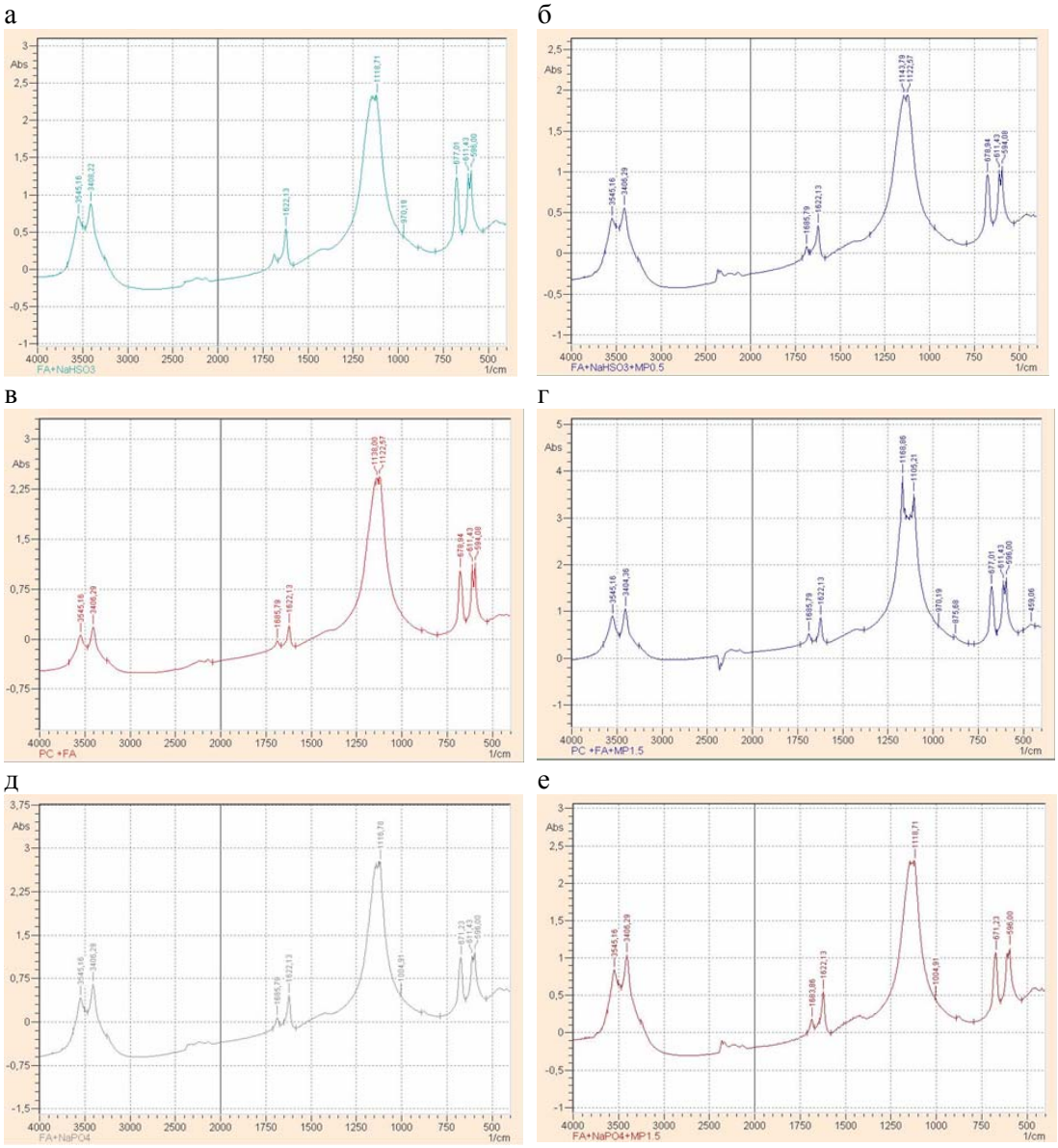


Рис. 3. Спектральный анализ фторангидритовых композиций
при введении следующих добавок:
а – 3 % раствор сульфата натрия; б – 3 % раствор сульфата натрия и 0,5 % металлургической пыли; в – 3 % портландцемента; г – 3 % портландцемента и 1,5 % металлургической пыли; д – 3 % раствор фосфата натрия; е – 3 % раствор фосфата натрия и 1,5 % металлургической пыли

Таблица 2

Результаты ИК-анализа фторангидритовых композитов

Группировка	Волновые числа (соотношение интенсивности к ширине пика), $см^{-1}$					
	а	б	в	г	д	е
1	2	3	4	5	6	7
Симметричные и ассиметричные валентные колебания ОН-групп	3408,16 – 3545,16 (0,5)	3406,29 – 3574,10 (0,5)	3406,29 – 3545,16 (0,3)	3404,36-3545,16 (0,5)	3406,29 – 3545,16 (0,35)	3406,29-3545,16 (0,5)
Деформационные колебания молекул H_2O	1622,13-1685,79	1622,13-1685,79	1622,13-1685,79	1622,13-1685,79	1622,13-1685,79	1622,13-1683,86

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
Сульфаты SO_4^{2-}	1118,71 (0,7); 611,43 – 677,01	1122,57-1143,79 (0,6); 611,43-678,94	1122,57-1138,00 (0,7); 611,43 – 678,98	1105,21-1168,86 (1,1); 611,43-677,01	1116,78 (0,7); 611,43 – 677,23	1118,71 (0,7); 596,00-671,23
Оксиды металлов (CaO, Al_2O_3 и др.)	400-500	400-500	400-500	400-500	400-500	400-500

Анализ спектров составов с активаторами твердения без минерального компонента и при совместном введении активаторов и металлургической пыли показал изменение характера пика, связанного с колебаниями сульфатных групп в кристаллогидратах гипса, что свидетельствует об изменении условий гидратации. При этом можно отметить, что при введении металлургической пыли увеличивается соотношение интенсивности к ширине для пиков, связанных с валентными колебаниями OH^- и сульфатных групп, в сравнении с образцами, полученными при добавлении только активатора твердения, что подтверждает гипотезу об улучшении условий для формирования кристаллогидратов гипса.

Проведенные исследования комплексного влияния активаторов твердения совместно с металлургической пылью на структуру и свойства фторангидритового вяжущего позволили установить, что введение добавок улучшает условия структурообразования матрицы. При оптимальной концентрации добавок (3 % активатора и 0,5–1,5 % металлургической пыли) наблюдается рост физико-технических показателей композиционного материала, включая механические характеристики, снижение водопоглощения и изменение коэффициента размягчения. Комплексное введение добавок способствует не только более полному переходу нерастворимого сульфата кальция в двуводную модификацию, но и уплотнению структуры композита, что и обеспечивает улучшение свойств материала. Сравнительный анализ результатов физико-технических свойств фторангидритовых композиций позволил установить, что наибольший прирост механических характеристик и параметров водостойкости наблюдается при активации твердения техногенного вяжущего фосфатом натрия совместно с металлургической пылью.

Список литературы

1. Манкеевич, Я.В. Влияние механоактивации фосфогипсовой сырьевой смеси на гидратацию и твердение ангидритового вяжущего / Я.В. Манкеевич, Л.И. Сычева // Успехи в химии и химической технологии. – 2014. – 8(157). – С. 61–64. – EDN: STFXHH.

2. Nizevičienė, D. Effects of waste fluid catalytic cracking on the properties of semi-hydrate phosphogypsum/ D. Nizevičienė, D. Vaičiukynienė, V. Vaitkevičius, B. Rudžionis // Journal of Cleaner Production. – 2016. – 137. – P.150–156. – DOI:10.1016/j.jclepro.2016.07.037

3. Фоменко, А.И. Сухая строительная смесь на основе фосфополугидрата сульфата кальция / А.И. Фоменко, В.С. Грызлов, Н.М. Федорчук, А.Г. Каптюшина // Строительные материалы. – 2017. – №7. – С. 60–63. – DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-750-7-60-63 EDN: ZCSKYF.

4. Gracioli, B. Influence of the calcination temperature of phosphogypsum on the performance of supersulfated cements/ B. Gracioli, C. Angulski da Luz, C.S. Beutler, J.I. Pereira Filho, A. Frare, J.C. Rocha, M. Cheriaf, R.D. Hooton, // Construction and Building Materials. – 2020. – №262 – P.119961. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119961.

5. Kurmangalieva A.I. Activation of hardening processes of fluorogypsum compositions by chemical additives of sodium salts / A. I. Kurmangalieva, L. A. Anikanova,

O. V. Volkova [et al.] // ChemChemTech. – 2020. – 63. – P. 73–80. – DOI: 10.6060/ivkkt.20206308.6137.EDN: IRNXEH.

6. Бурьянов, А.Ф. Исследование влияния различных активизирующих добавок на свойства ангидритового вяжущего / А.Ф. Бурьянов, Х.Б. Фишер, Н.А. Гальцева [и др.] // Строительные материалы. – 2020. – №7. – С. 4–9. – DOI 10.31659/0585-430X-2020-782-7-4-9. EDN: ZTOEJI.

7. Белов, В.В. Модификация структуры и свойств строительных композитов на основе сульфата кальция: монография / В.В. Белов, А.Ф. Бурьянов, Г.И. Яковлев [и др.]; под общ. ред. А.Ф.Бурьянова. – М.: Де Нова, 2012. – 195 с. – EDN: VMADIZ.

8. Buryanov, A.F. Formation of the spatial structure of a condensed system of calcium sulphate dihydrate / A.F. Buryanov, K.S. Petropavlovskii, V.B. Petropavlovskaya, T.B. Novichenkova // Journal of Physics: Conference Series : International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis 2019, MMSA 2019, Moscow, 13–15 of november 2019. – M.: Institute of Physics Publishing. – 2020. – P. 012194. – DOI:10.1088/1742-6596/1425/1/012194. EDN: XCYCUB.

9. Клименко, В.Г. Роль двойных солей на основе сульфатов Na+, K+, Ca2+, NH4+ в технологии получения ангидритовых вяжущих / В.Г. Клименко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – №12. – С. 119–125. – DOI: 10.12737/article_5a27cb84ae0049.79523605. EDN: VUEHLN.

10. Клименко, В.Г. Комплексные активаторы твердения ангидрита на основе сульфата аммония / В.Г. Клименко, В.И. Павленко, М.Ю. Елистраткин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2013. – №5. – С. 28–30. – EDN: RAQNNP.

11. Аниканова, А.Л. Активированное композиционное фторангидритовое вяжущее / А.Л. Аниканова, О.В. Волкова, А.И. Кудяков, А.И. Курмангалиева // Строительные материалы. – 2019. – №1–2. – С. 36–42. – DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-36-42

12. Кудяков, А.И. Влияние сульфата и сульфита натрия на процессы структурообразования фторангидритовых композиций / А.И. Кудяков, Л.А. Аниканова, В.В. Редлих, Ю. С. Саркисов // Строительные материалы. – 2012. – № 10. – С. 50–52. – EDN PJNDQX.

13. Liu Shuhua Mechanism of calcination modification of phosphogypsum and its effect on the hydration properties of phosphogypsum-based supersulfated cement / Liu Shuhua, Jia-Hu Ouyang, Jun Ren // Construction and Building Materials. – 2020. – 243. – P. 118226. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118226

14. Kramar, L.Y. Properties and modification of anhydrite binder from technogenic raw materials. Innovative materials and technologies KNAUF – GARANT of quality and safety in modern construction / L.Y. Kramar, B.Y. Trofimov, T.N. Chernykh // Collection of reports of the fifth scientific conference LLC KNAUF GIPS. – Chelyabinsk, 2012. – 58 p.

15. Токарев, Ю.В. Модифицирование ангидритовых композиций алюмосодержащими ультрадисперсными добавками / Ю.В. Токарев, Г.И. Яковлев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2009. – №1(11). – С. 302–308. – EDN KVIVEZ.

16. Аниканова, Л.А. Влияние пластифицирующих добавок на свойства газогипсовых материалов / Л.А. Аниканова, А.И. Курмангалиева, О.В. Волкова, Д.М. Первушина // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2020. – №22(1). – С. 106–117. – URL: https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-1-106-117.

17. Gazdič, D. Modification of Natural Anhydrite by Mixed Exciter/ D. Gazdič, J. Stachová, R. Magrla // Advanced Materials Research. – 2015. – 1100. – P. 56. – DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1100.56

18. Yakovlev, G. Efficient eco-friendly composite fluorine anhydrite-based materials / G. Yakovlev, A. Gordina, I. Polyanskikh [et al.] // 10th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2017 : 10, Vilnius, 27–28 апреля 2017 года. – 2017. – P. 2017009. – DOI:10.3846/enviro.2017.009. EDN:RXSFEW.

19. Fedorchuk, Y.M. Prediction of the properties anhydrite construction mixtures based on neural network approach / Y.M. Fedorchuk, N.V. Zamyatin, G.V. Smirnov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – №1. – P. 012039. – DOI 10.1088/1742-6596/881/1/012039. – EDN XNTZAM.

20. Калабина, Д.А. Безусадочные фторангидритовые композиции для устройства полов/ Д.А. Калабина, Г.И. Яковлев, Н. В. Кузьмина // Известия КГАСУ. – 2021. – № 1 (55). – С. 24–38. – DOI: 10.52409/20731523_2021_1_24.

References

1. Mankeevich, Y.V. Influence of mechanical activation of phosphogypsum raw mix on hydration and hardening of anhydrite binder / Y.V. Mankeevich, L.I. Sycheva // Advances in chemistry and chemical technology. – 2014. – 8(157). – P. 61–64. – EDN: STFXHH.

2. Nizevičienė, D. Effects of waste fluid catalytic cracking on the properties of semi-hydrate phosphogypsum / D. Nizevičienė, D. Vaičiukynienė, V. Vaitkevičius, B. Rudžionis // Journal of Cleaner Production. – 2016. – 137. – P.150–156. – DOI:10.1016/j.jclepro.2016.07.037

3. Fomenko, A.I. Dry building mix on the basis of phospho-hemihydrate of calcium sulfate / A.I. Fomenko, V.S. Gryzlov, N.M. Fedorchuk, A.G. Kaptyushina//Construction Materials. – 2017. – №7. – P. 60–63. – DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-750-7-60-63.

4. Gracioli, B. Influence of the calcination temperature of phosphogypsum on the performance of supersulfated cements/ B. Gracioli, C. Angulski da Luz, C.S. Beutler, J.I. Pereira Filho, A. Frare, J.C. Rocha, M. Cheriaf, R.D. Hooton, // Construction and Building Materials. – 2020. – №262 – P.119961. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119961.

5. Kurmangalieva, A.I. Activation of hardening processes of fluorogypsum compositions by chemical additives of sodium salts / A.I. Kurmangalieva, L.A. Anikanova, O.V. Volkova [et al.] // ChemChemTech. – 2020. – 63. – P. 73–80. – DOI: 10.6060/ivkkt.20206308.6137.EDN: IRNXEH.

6. Buryanov, A.F. Research in the influence of various activating additives on the properties of anhydrite binder/ A.F. Buryanov, H.-B. Fisher, N.A. Gal'tseva, D.N. Machortov, R.R. Hasanshin // Construction Materials. – 2020. – №. 7. – P. 4–9. – DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-4-9

7. Belov, V.V. Modification of the structure and properties of building composites based on calcium sulfate: monograph / V.V. Belov, A.F. Buryanov, G. I. Yakovlev [et al.]; under the general editorship of A.F. Buryanov. – M.: De Nova, 2012. – 195 c. – EDN: VMADIZ.

8. Buryanov, A.F. Formation of the spatial structure of a condensed system of calcium sulphate dihydrate / A.F. Buryanov, K.S. Petropavlovskii, V.B. Petropavlovskaya, T.B. Novichenkova // Journal of Physics: Conference Series : International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis 2019, MMSA 2019, Moscow, 13–15 ноября 2019 года. – M.: Institute of Physics Publishing. – 2020. – P. 012194. – DOI:10.1088/1742-6596/1425/1/012194. EDN: XCYCUB.

9. Klimenko, V.G. The role of double salts based on sulfates Na+, K+, Ca2+, NH4+ in the technology of obtaining anhydrite binders / V.G. Klimenko // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. – 2017. – №12. – P. 119–125. – DOI: 10.12737/article_5a27cb84ae0049.79523605. EDN: VUEHLN.

10. Klimenko, V.G. Complex anhydrite hardening activators based on ammonium sulfate / V.G. Klimenko, V.I. Pavlenko, M.Y. Elistratkin // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. -2013. – №5. – P. 28–30. – EDN: RAQNNP.

11. Anikanova, L.A. Mechanically activated composite fluoroanhydrite binder / L.A. Anikanova, O.V. Volkova, A.I. Kudyakov, A.I. Kurmangalieva, //Construction

Materials. – 2019. – №1–2. – P. 36–42. – DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-36-42

12. Kudyakov, A.I. Influence of Sulfate and Sulfite of Sodium on the Processes of Structure Formation of Fluoroanhydrite Compositions / A.I. Kudyakov, L. A. Anikanova, V. V. Redlikh, Yu.S. Sarkisov // Construction Materials. – 2012. – № 10. – P. 50–52. – EDN PJNDQX.

13. Liu Shuhua Mechanism of calcination modification of phosphogypsum and its effect on the hydration properties of phosphogypsum-based supersulfated cement/ Liu Shuhua, Jia-Hu Ouyang, Jun Ren //Construction and Building Materials. – 2020. – 243. – P. 118226. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118226

14. Kramar, L.Y. Properties and modification of anhydrite binder from technogenic raw materials. Innovative materials and technologies KNAUF – GARANT of quality and safety in modern construction / L.Y. Kramar, B.Y. Trofimov, T.N. Chernykh // Collection of reports of the fifth scientific conference LLC KNAUF GIPS. – Chelyabinsk, 2012. – 58 p.

15. Tokarev, Yu.V. Modification of anhydrite compositions with aluminum-containing ultrafine additives / Yu.V. Tokarev, G.I. Yakovlev // News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. – 2009. – 1(11). – P. 302–308. – EDN KVIVEZ.

16. Anikanova, L.A., Gas-gypsum materials properties modified by plasticizing agents/ L.A. Anikanova, A.I. Kurmangalieva, O.V. Volkova, D.M. Pervushina // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. JOURNAL of Construction and Architecture. – 2020. – 22(1). – P.106–117. – URL: https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-1-106-117

17. Gazdič, D. Modification of Natural Anhydrite by Mixed Exciter/ D. Gazdič, J. Stachová, R. Magrla, // Advanced Materials Research. – 2015. – 1100. – P. 56. – DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1100.56

18. Yakovlev, G. Efficient eco-friendly composite fluorine anhydrite-based materials / G. Yakovlev, A. Gordina, I. Polyanskikh [et al.] // 10th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2017 : 10, Vilnius, 27–28 апреля 2017 года. – 2017. – P. 2017009. – DOI:10.3846/enviro.2017.009. EDN:RXSFEW.

19. Fedorchuk, Y.M. Prediction of the properties anhydrite construction mixtures based on neural network approach / Y. M. Fedorchuk, N. V. Zamyatin, G. V. Smirnov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – №1. – P. 012039. – DOI 10.1088/1742-6596/881/1/012039. – EDN XNTZAM.

20. Kalabina, D.A. Non-shrinking fluoroanhydrite compositions for flooring / D.A. Kalabina, G.I. Yakovlev, N.V. Kuz'mina // News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. – 2021. – № 1 (55). – P. 24–38. – DOI: 10.52409/20731523_2021_1_24.

УДК 691.5 DOI 10.54734/20722958_2022_3_80

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

Зайцева Мария Владимировна,
аспирант кафедры «Управление качеством и технология строительного производства»
E-mail: zajc@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

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

Zaytseva Maria Vladimirovna,
Postgraduate student of the department «Quality Management and Construction Production Technology»
E-mail:zajc@yandex.ru

ИЗВЕСТКОВЫЕ СОСТАВЫ ДЛЯ РЕСТАВРАЦИИ ШТУКАТУРКИ

В.И. Логанина, М.В. Зайцева

Приведен обзор известковых составов для реставрации штукатурки. Указаны добавки для повышения стойкости композитов. Даны общие принципы выбора реставрационных материалов. Описан принцип сродства структур.

Ключевые слова: штукатурка, реставрация, известковые составы, добавки, сродство структур

LIME COMPOSITIONS FOR STUCCO RESTORATION

V.I. Loganina, M.V. Zaitseva

Some information about lime compositions used for the restoration of stucco is given. The types of additives used to improve the durability of lime composites are described. General principles for the choice of restorative materials are given. The principle of structure affinity is described.

Keywords: restorations, lime compositions, additives, structure affinity

Сохранение архитектурного наследия прошлого, санация зданий в районах исторической застройки требуют применения специализированных отделочных материалов. Традиционными материалами для окрашивания стен зданий были известковые составы. Однако в настоящее время отделка и реставрация исторических зданий вызывает определенные трудности, связанные с несовместимостью известковой штукатурки с современными отделочными материалами. Современные краски малопригодны для окрашивания зданий, оштукатуренных известковыми составами. Лакокрасочные пленки, образуемые органическими красками на слабых подложках, быстро растрескиваются и отслаиваются, нередко вместе с мелкими фрагментами верхнего слоя известковой штукатурки.

Очевидно, что для обеспечения сохранности архитектурных памятников в условиях города необходимо определить принципиально новые подходы к выбору не только строительных материалов для восстановления утраченных элементов и деталей памятника архитектуры, но и специальных химических материалов, особенно составов для антикоррозионной обработки загрязненных и поврежденных поверхностей памятников для обеспечения их совместимости с новым строительным материалом, защиты от окружающей среды и для успешной разработки системы профилактических мероприятий, учитывающих существующие сегодня условия эксплуатации памят-

ников. Поэтому выбор строительных материалов для реставрации, консервации и ремонтно-восстановительных работ должен осуществляться с учетом их химических характеристик и прогнозов последствий реставрационного вмешательства.

Общие принципы выбора реставрационных материалов должны быть основаны на международном опыте реставрационной практики, на постулатах, указанных в Международной хартии по консервации и реставрации исторических памятников и достопримечательных мест (Венеция, 1964 г.), законодательных актах, государственных законах, постановлениях и других ведомственных нормативных документах. Выбор и применение материалов на реставрируемых объектах должны базироваться на теоретических положениях, определяющих значимость сохранения культурного наследия, и основных принципах реставрации. При проведении любого вида работ на памятнике важно сохранить не только его внешний облик, но и материал, из которого памятник изготовлен. Замена материала приводит к утрате технологических особенностей создания данного объекта, характеризующих подлинность и индивидуальность техники и технологии исполнения.

При всем разнообразии реставрационных материалов к ним, в том числе к вяжущим материалам, предъявляются некоторые общие требования. Новые материалы, имеющие непосредственный контакт с подлинными материалами памятника, должны соответствовать им по ряду параметров. Они должны быть близкими к авторскому материалу по фактуре, микро- и макроструктуре, не изменять цвета материала памятника, иметь сопоставимые параметры по прочности и долговечности, должны обладать стойкостью к воздействиям атмосферы, биостойкостью, быть стабильными при длительной эксплуатации. Важным моментом является совместимость нового и старого материалов, препятствующая возникновению на стыке механических напряжений при накапливании влаги и водорастворимых солей в контактной зоне. Это ослабляет разрушительные процессы и отторжение новых включений, которые обычно сопровождаются деструкцией подлинного материала памятника. В работах [15, 32, 34, 35] представлена концепция формирования структуры строительных композитов на основе принципа сродства структур, по которой все структуры строительных материалов можно разделить на 3 уровня по размерам пор: наноструктура; микроструктура; макроструктура.

Принцип сродства структур заключается в минимизации физико-химических и структурных различий между регулируемой матрицей и неизменяемой структурой заполнителя или реставрируемого элемента старого сооружения с тем, чтобы поровая структура полученного композита стала в идеале единой и однородной. Это позволит воде мигрировать по капиллярам всего композита, способствуя равномерному уплотнению и упрочнению его новообразованиями.

Формирование капиллярно-пористой структуры с получением материалов трех уровней возможно с использованием технологических приемов фракционирования, совместного помола, модифицирования добавками, использования техногенного сырья и т.д., и с применением компонентов, создающих определенную пористость материалов.

Технологический процесс создания краски на основе извести достаточно сложный, и не всегда удаётся достичь необходимых характеристик. Поэтому отечественных производителей известковой краски не так много. Одним из них является петербургская фирма «Топаз Плюс», выпускающая краску «Силакра-известковая». Краска использовалась при реставрации корпуса Бенуа в Петродворце.

На рынке известна компания «Крепс», успешно выпускающая несколько видов известковых штукатурок с гидравлической добавкой и без нее – серия «Крепс Антик». Известковые штукатурки «Антик 1» и «Антик 2» можно наносить на старые кирпичные, бетонные, оштукатуренные составами на известковом вяжущем стены. Различия во фракционном составе наполнителя позволяют использовать «Антик 1» и «Антик 2» при различных видах отделочных работ.

«Антик 1» с максимальным размером зерна наполнителя 0,63 мм обладает повышенной пластичностью и может использоваться как финишная отделочная штукатурка

в труднодоступных местах. Также штукатурка «Антик 1» применяется в качестве выравнивающего слоя толщиной до 2 см внутри и снаружи помещений. Эта штукатурная смесь прекрасно подходит именно для реставрации старых оштукатуренных поверхностей, т.к. обладает оптимальной прочностью и плотностью.

«Антик 2» обладает большей прочностью и содержит более крупный наполнитель с размером частиц до 2 мм; эта смесь предназначена для оштукатуривания стен внутри и снаружи зданий. При реставрации зданий часто практикуется полное устранение старой штукатурки до основания стены, а затем оштукатуривание поверхности новыми материалами. Для такого вида работ можно применять более крупную по своему фракционному составу, а также более плотную штукатурку «Крепс Антик 2». Технические характеристики некоторых известковых штукатурных смесей серии «Крепс Антик» приведены в табл.1.

Таблица 1

Технические характеристики штукатурных смесей

Наименование материала	Прочность на сжатие, МПа	Адгезия, МПа	Жизнеспособность, ч	Расход, кг/кв. м/мм	Паропроницаемость, г/м·ч·мм.рт.ст.	Максимальная величина фракции, мм	Морозостойкость	Водопоглощение, %
Крепс Антик 1	1	не указ. произв-м	3	1,2-1,4	0,01	0,63	35	11,7
Крепс Антик 2	1,5	не указ. произв-м	3	1,4-1,6	0,01	2,5	35	11,5
Крепс Экстра-лайт	2,5	не указ. произв-м	2	1,4	не указ. произв-м	0,63	35	не указ. произв-м

Для ремонта, реконструкции и реставрации старых зданий и историко-архитектурных памятников, различных бетонных и железобетонных сооружений предложен ассортимент продукции под торговыми марками "БИРСС" и "Баумит". Комплексная система "БИРСС" идеальна для реставрации подверженных солеобразованию строений и сильно увлажненных поверхностей. Она была успешно применена при реконструкции стен и подвалов зданий Казанского кремля, при реставрационных работах в Казанском университете и здании мэрии. В состав системы входят сложные цементно-известковые штукатурные смеси с применением модифицированных добавок.

Компания "Баумит" производит материалы для реставрации и реконструкции памятников архитектуры, утеплители для фасадов, а также штукатурку, шпатлевку и клеящие составы. Штукатурные смеси для реставрации памятников архитектуры данной марки представлены следующими наименованиями: Baumit HandPutz 1 Winter – зимняя известково-цементная штукатурка, применяющаяся для внутренних и наружных работ в зимних условиях при средней температуре окружающего воздуха около 0ºС; санирующая штукатурка Baumit SanovaPutz L применяется для оштукатуривания влажных, подверженных вредному воздействию солей минеральных оснований для внутренних и наружных работ; Baumit GrundPutz Leicht – известково-цементная штукатурка заводского приготовления, с легким наполнителем, для ручного и машинного нанесения, для внутренних и наружных работ.

На рынке хорошо известна известковая штукатурка фирмы Caparol. Особенностью этой штукатурки является то, что высокой степени измельчения подвергается гидрооксид кальция (для осуществления этого процесса не у всех производителей

красочных материалов имеются технические возможности). Смесь фирмы Caparol имеет естественный серый цвет.

Известковая штукатурка Quick-Mix MKE представляет собой натуральный продукт, соответствует всем строительным и гигиеническим требованиям, которые на данный момент предъявляются к штукатуркам. Основание под штукатурку должно быть прочным, сухим, очищенным от пыли, масел и прочих веществ. Перед нанесением основание следует увлажнить или прогрунтовать. Такая штукатурка наносится в два этапа. Первый этап включает в себя нанесение на основание методом набрызга, спустя 3–4 часа следует нанести верхний слой. Общая толщина штукатурного слоя должна составлять примерно 10 мм. В зависимости от основания и температуры окружающей среды затирка войлоком осуществляется спустя примерно 2–5 часов.

Характеристики штукатурки Quick-Mix MKE представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики известковой штукатурки Quick-Mix MKE

Характеристика	Значение
Цвет	Белый
Назначение	Для строительного кирпича
Прочность при сжатии, кгс/см^2	1,5
Зернистость,мм	0–1
Температура применения,^{o}С	От +5 до +30
Рекомендуемая толщина слоя, мм	
Срок хранения,мес	12

В последнее время на российском рынке появилось большое количество отечественных производителей сухих строительных смесей для реставрации и отделки зданий исторической застройки, а также вновь возведенных зданий: известковая штукатурка «Экстра Б», известковая штукатурка «Рунит классическая крупная» и т.п.

Штукатурка «Экстра Б» – это сухая известково-песчаная смесь натурального белого цвета, состоящая из гидратной извести, кварцевого песка и модифицирующей добавки концентрата «Экстра», без цемента, клеев и полимеров. Приготовление смеси происходит непосредственно на месте проведения работ [55].

При нанесении известковой штукатурки допускается окружающая температура воздуха от +3°С до +50°С. Возможно использование смеси при температуре до –3°С при условии нанесения разового слоя до 30 мм. Состав «Экстра Б» универсален: он может использоваться для наружных или внутренних работ, для предварительной или окончательной отделки поверхности, в сухой или влажной среде. Смесь предназначена как для ручного, так и для машинного нанесения.

В практике реставрационных работ известны составы серии «Рунит».

Составы «Рунит» рекомендованы для отделки фасадов и интерьеров, а также для реставрации и реконструкции памятников архитектуры. Преимущества покрытий на основе составов «Рунит»: высокая паропроницаемость, высокая стойкость к биопоражениям, экологичность.

Одной из самых популярных известковых красок для реставрации объектов культурного наследия являются краски «Холви», «Кальцемур», «Силакра-известковая» и другие, содержащие в своем составе целевые добавки, производителями которых являются зарубежные фирмы [5, 10, 30].

Для ускорения твердения и повышения прочности известковых композитов в рецептуру вводят добавки – алюминат натрия, фторид натрия, карбонат калия, хлорид кальция, аморфную окись алюминия, тонкодисперсный аморфную кремнезем и др.

Для повышения стойкости композитов на основе минеральных вяжущих в их рецептуру вводят коллоидные дисперсии на основе диоксида кремния, что способствует существенному (до 30 %) сокращению количества пор размером от 1 нм и выше, повышению водоудерживающей способности на 6 %, уменьшению расслаивае-

мости на 34 %, устранению высолов на поверхности отделочного покрытия [1, 2, 4, 7–9, 12, 29].

В [31] для ускорения процесса твердения извести предложено вводить в рецептуру известковых составов добавки на основе природных цеолитов. В [17] предложено применять в композитах на основе минеральных вяжущих синтезированные цеолиты. Авторами выявлены закономерности структурообразования известкового композита в присутствии добавки на основе синтетического цеолита, заключающиеся дополнительно в образовании гидросиликатов кальция-натрия и минералов группы цеолитов, увеличении количества химически связанной извести на 8,74 %

В работах [16, 18, 24–26] предложено для повышения стойкости известковых покрытий применять синтезированные гидросиликаты (ГСК). Авторами разработан известковый состав для отделки и реставрации стен зданий в виде сухой смеси, содержащий наполнитель на основе гидросиликатов кальция и позволяющий получить растворные смеси с водоудерживающей способностью 98–99%, временем высыхания до степени «5» 15–20 мин, жизнеспособностью 1–1,5 часа. Покрытия на основе предлагаемой ССС характеризуются коэффициентом паропроницаемости 0,05 мг/м·ч·Па, прочностью сцепления 0,6–0,9 МПА, прочностью при сжатии 3–4 МПа.

В Китае при реставрации исторических зданий в Шанхай и Ханчжоу для ремонта и восстановления отслоившихся поверхностей из натурального камня, гипса и кирпича была применена система, состоящая из клеев и инъекционных растворов на основе гидравлической извести (NHL). Авторами установлены технические требования к составам для ремонта таких поверхностей: прочность на отрыв ≥0,1~0,5 МПа, ≤ 1,0 МПа (высокая прочность на отрыв может вызвать большее растрескивание внутри каменной поверхности), водопоглощение при капиллярном всасывании $\geq 2 кг/м^{2\sqrt{ч}}$, паропроницаемость $\mu \leq 100$ [59, 73].

В работе [40–42] предлагается при проведении реставрационных работ использовать известковые составы, в рецептуру которых вводятся органические компоненты (полисахариды, белки и жирные кислоты). Авторами установлено, что применение животного клея в качестве добавки в 2 раза увеличивает механическую прочность раствора и фронт карбонизации, а также снижает пористость и уменьшает размер пор.

Для восстановления исторических кладок в [41, 46, 52, 55, 57] предлагается применять известково-метакаолиновые растворы. Известково-метакаолиновые смеси были использованы для производства некоторых генуэзских белых штукатурок (Chiaverini, 2004; Маннони, 1988). Установлено, что по мере увеличения соотношения «МК/известь» в смесях наблюдается увеличение химически связанной воды, уменьшение размера пор, увеличение прочности при сжатии растворов до 9 МПа.

В [33, 35] предложены цементно-карбонатные составы в качестве реставрационных докомпоновочных композиций, содержащие добавку суперпластификатора СП и микронаполнитель $CaC0_3$ от 50 до 70%. Эти составы близки к авторскому материалу по пористости и прочности, их коэффициент размягчения $К_{разм}$, морозостойкость и усадочные деформации также имеют приемлемые значения. Это позволяет предположить возможность длительной совместной службы докомпоновочного и реставрируемого материалов в соответствии с принципом сродства структур.

В настоящее время на рынке появляется множество кремнеземсодержащих продуктов, применяемых в том числе в известковых и цементных композитах [1, 7–9, 11–13, 21, 27]. Так, используя ультрадисперсный модификатор, причем в малых концентрациях, можно управлять кинетикой взаимодействия цемента с водой затворения.

Представляет интерес применение в известковых составах для реставрации и отделки стен зданий полисиликатного раствора. К полисиликатам относят [20] силикаты щелочных металлов (силикатный модуль от 4 до 25), представляющие собой переходную область составов от жидких стекол до кремнезолей, стабилизированных щелочью. Полисиликаты характеризуются широким диапазоном степени полимеризации анионов и являются дисперсиями коллоидного кремнезема в водном растворе силикатов щелочных металлов. Практическое применение полисиликатов нашло отра-

жении при изготовлении золь-силикатных красок, в которых полисиликаты используются в качестве связующего. В работах [1, 20, 50, 51] указывается, что растворы полисиликата натрия с модулем 6–8 можно получить добавлением раствора жидкого стекла к концентрированному золю кремнезема с размерами частиц 5–25 нм, и концетрация кремнезема в растворе может достигать 20 % SiO_2.

В работе [12] отмечается, что введение полисиликата в цементную смесь снижает контракцию в первые сутки твердения цемента. Выявлено увеличение скорости гидратации цементного камня в присутствии полисиликата «Силинома ВН-М», т.е. при введении нанодобавки большее количество силикатных фаз цемента вступает в реакцию гидратации. Наблюдается также снижение карбонизационных процессов в образце с «Силиномом ВН-М», что свидетельствует об образовании более плотной структуры в наномодифицированных образцах, препятствующей прониканию CO_2 в цементный камень.

Наличие олигомерных и мономерных форм кремнекислородных анионов в составе полисиликатного раствора обуславливает его реакционную способность при взаимодействии с известью. Так, по данным [20], при взаимодействии свежеприготовленного золя кремниевой кислоты с известью происходит переход полимерной фракции ККА в димерную фракцию, что способствует протеканию в процессе твердения известкого-кремнеземистого отделочного состава химической реакции образования трехкальциевого гидросиликата («фаза TSH»), который легко синтезируется в системе «известь – поликремневая кислота» в гидротермальных условиях.

Для повышения водостойкости известковых покрытий предлагается введение в рецептуру смеси гидрофобизирующих добавок. Гидрофобизирующие добавки обладают определенной воздухововлекающей способностью (воздухововлечение 3…5%). Образованная сетка замкнутых пор уменьшает напряжения, возникающие при замерзании воды в открытых порах, тем самым значительно увеличивая морозостойкость покрытий. Гидрофобизирующие добавки предназначены для придания затвердевшим составам водоотталкивающих свойств. Как правило, это стеараты и олеаты кальция, натрия или цинка. В настоящее время на рынке представлены такие гидрофобизирующие добавки, как Гидрофоб Е (Hidrofob E) и Сементол Е (Cementol E) фирмы ТКК (Словения), Церезит (Ceresit CC 92) компании «Хенкель Баутехник» (Россия, Украина) .

Недостатком гидрофобно-пластифицирующих добавок с технологической точки зрения является то, что они замедляют сроки схватывания и темп роста прочности цементного и известкового камня. Помимо того, удобоукладываемость смеси, прочность и ряд других физико-технических свойств бетона и раствора, достигнутые с такой добавкой, могут потребовать улучшения. В таких случаях в состав гидрофобно-пластифицирующих добавок включают вещества, позволяющие не только исключить нежелательные эффекты компонентов добавки, но и получить с помощью взаимного усиления влияния ингредиентов в направлении значительного увеличения физико-технических свойств цементных и известковых систем. В качестве таких дополнительных компонентов к гидрофобизирующим добавкам наиболее распространены добавки-ускорители схватывания и твердения, а также различного вида и степени эффективности пластификаторы-водопонизители и суперпластификаторы.

Другим способом повышения водостойкости является применение активных минеральных добавок. Применение минеральных добавок приводит к повышению непроницаемости и химической стойкости, улучшению сопротивления трещинообразования, увеличению предела прочности [27]. При использовании наполнителей высокой активности наблюдается повышение сцепления растворов на основе сухих строительных смесей с основанием.

В качестве активных минеральных добавок используют природные: кремнезем, глинезем, трепел, опока, диатомит, пеплы, туфы, пемзы, вулканические трассы – и искусственные: доменные гранулированные шлаки, топливные золы и шлаки, искусственно обожженные глинистые материалы и кремнеземные отходы. Взаимодействие извести с активными минеральными добавками основано на том, что активный

(аморфный, мелкодисперсный) кремнезем связывает известь в присутствии воды в гидросилиткат кальция, который и обуславливает ее гидравлическое твердение, т.е. нарастание прочности под водой после предварительного затвердевания на воздухе, а также способность сопротивляться выщелачивающему действию воды. Кроме кремнезема в состав активных минеральных добавок входит глинезем, который в присутствии влаги также может взаимодействовать с известью, образуя гидроалюминат кальция, обладающий гидравлическими свойствами. Однако очень трудно подобрать оптимальное содержание минеральных добавок при введении в сухую смесь из-за их непостоянного минералогического состава.

Часто промышленные зола-унос и шлаки содержат от 10 до 40% аналитически определяемого оксида кальция. Такие материалы называют активными гидравлическими добавками, так как они содержат достаточно извести, чтобы быть самоцементирующими. Очевидно, что из-за высокого содержания извести и низкого содержания кремнезема и глинозема вводить их необходимо в больших количествах для достижения определенного уровня механической прочности в нормированном возрасте.

На активность добавок влияет также содержание в них химически связанной воды. Это подтверждается тем, что вулканический трасс после прокаливания теряет способность придавать извести гидравлические свойства. Диатомовые земли состоят из опалового или аморфного гидратированного кремнезема, который образуется из скелетов диатомий. В чистом виде они обладают активностью, однако обычно они загрязнены глинистыми включениями. Глины не обладают активностью до тех пор, пока не будут подвержены термической обработке, в результате которой происходит превращение кристаллической структуры алюмосиликатных минералов в глине в аморфную. К искусственно обожженным глинистым материалам относятся глинит, цемянка, керамзит, аглопорит (температура обжига 600–800^{0}С). Обожженная глина в виде измельченного в порошок битого кирпича (цемянки) применялась еще в древней Руси в качестве гидравлической добавки в смеси с воздушной известью [12].

Критерием выбора минеральных добавок для известковых смесей должна быть не только гидравлическая активность добавки, но и ее способность влиять на развитие ранней прочности и снижение усадочных деформаций за счет водоудержания.

Введение минеральных наполнителей в качестве гидравлически активного компонента приводит к экономичности вяжущего, частичному отказу от импортных модифицированных добавок, снижению стоимости готовой смеси и улучшению эксплуатационно-технологических свойств отделочных составов на основе ССС.

Большинство добавок, улучшая одни характеристики смеси, иногда не изменяют, а зачастую ухудшают другие характеристики. Для преодоления побочных эффектов используют комплексные добавки, состоящие из нескольких самостоятельных компонентов (например, суперпластификатор с микрокремнеземом). Комплексные добавки многофункциональны и способны влиять сразу на несколько свойств, характерных для сухой строительной смеси. Состав комплексных добавок можно «проектировать» таким образом, чтобы их компоненты усиливали эффекты, обеспечиваемые каждом из них в отдельности. Применение комплексных добавок позволяет добиваться универсальности их действия в сухих смесях. Так, например, французская фирма Super Corocol в облицовочных сухих смесях применяет комплексную химическую добавку, состоящую из отходов производства целлюлозы, поливинилхлорида и других соединений – поверхностно-активных веществ.

Югославское предприятие Carbon при производстве сухих смесей для облицовочных работ использует химические добавки, которые по свойствам сходны с французскими и представляют собой смесь соединений целлюлозы, поливинилацетата и его сополимеров. Добавки фирм Super Corocol и Carbon применяют при выпуске сухих смесей на цементных вяжущих и вводят в количестве 0,45–0,1 от массы цемента.

В патенте РФ №2364576 представлена комплексная модифицирующая добавка для строительных растворов. Данная добавка содержит, мас.ч.: минеральный компонент –

100, водоудерживающий активный ингредиент эфир целлюлозы – 0,1–1,0, вода – 8–50. Строительный раствор получают путем смешивания вяжущего с указанной добавкой в соотношении, мас.ч.: модифицирующая добавка – 100, вяжущее – 10–45.

В патенте РФ №2439016 представлена комплексная добавка для модификации гипсовых вяжущих, включающая минеральный компонент на основе сульфата кальция, пластификатор, регулятор сроков схватывания и твердения, отличающаяся тем, что она в качестве указанного минерального компонента содержит сыромолотый гипс, в качестве пластификатора – Sika ViscjCrete 225 powder Vp или Melflux 5581F, в качестве регулятора сроков схватывания и твердения – глюконат кальция и дополнительно содержит гидрофобизатор-полиметилсиликонат кальция и пеногаситель – Axilat DE 770, при этом компоненты имеют следующее соотношение, мас.%: минеральный компонент 64,0–78,0, пластификатор 15,0–20,0, гидрофобизатор 4,8–8,6, пеногаситель 0,2–0,4, регулятор сроков схватывания и твердения 2,0–7,0 [28].

Список литературы

1. Айлер, Р. Химия кремнезема / Р.Айлер. – М.: Мир, 1982.

2. Баталин, Б.С. Исследования эффективности добавок, применяемых для производства сухих строительных смесей / Б.С. Баталин // Успехи современного естествознания. – 2007. – № 7. – С. 60–62.

3. Большаков, Э.Л. Сухие смеси для отделочных работ / Э.Л. Большаков // Строительные материалы. – 1997. – №7. – С. 8–9.

4. Голубев, В.И. Новые продукты на рынке добавок для сухих строительных смесей и бетонов / В.И. Голубев, П.Г. Василик //Строительные материалы. – 2006. – №3. – С. 24–25

5. Гонтарь, Ю.В. Модифицированные сухие смеси для отделочных работ / Ю.В. Гонтарь, А.И. Чалова // Строительные материалы. – 2001. – № 4. – С. 8–10.

6. Запевалова, М.В. Строительные материалы и услуги / М.В. Запевалова // Обзор рынка сухих строительных смесей – 2011. – № 6. – URL: http://www.vashdom.ru/articles/strm5.htm

7. Калашников, В.И. Наногидросиликатные технологии в производстве бетонов / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, М.Н. Мороз, И.Ю. Троянов, В.М. Володин, О.В. Суздальцев // Строительные материалы. – 2014. – № 5. – С. 88–91.

8. Комохов, П.Г. Золь-гель как концепция нанотехнологии цементного композита/ П.Г.Комохов //Строительные материалы. – 2006. – №9. – С. 14–15.

9. Каприелов, С.С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов / С.С. Каприелов // Бетон и железобетон. – 1995. – №4. – С. 16–20.

10. Козлов, В.В. Сухие строительные смеси / В.В. Козлов. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 96 с.

11. Королев, Е.В. Оценка концентрации первичных наноматериалов для модифицирования строительных композитов / Е.В. Королев // Нанотехнологии в строительстве. – 2014. – № 6. – С. 31–34.

12. Копаница, Н.О. Применение нанодисперсного кремнезема в производстве строительных смесей / Н.О. Копаница, Ю.С. Саркисов, О.В. Демьяненко // Вестник ТГАСУ. – 2016. – № 5. – С.140–146.

13. Красиникова, Н.М. Влияние полисиликата на структурообразование цементного камня / Н.М. Красиникова, З.Ф. Иксанова // Известия КГАСУ. – 2019. – №4. – С.347–352.

14. Коротких, Д.Н. О требованиях к наномодифицирующим добавкам для высокопрочных цементных бетонов / Д.Н. Коротких, О.В. Артамонова, Е.М. Чернышов // Технологии бетонов. – 2009. – № 9–10. – С. 86–88.

15. Лесовик, В.С. Управление структурообразованием строительных композитов: монография / В.С. Лесовик, И.Л. Чулкова. – Омск: СибАДИ, 2011. – 420 с.

16. 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.

17. 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.

18. Логанина, В.И. Оптимизация состава композитов общестроительного назначения, модифицированных наноразмерными добавками / В.И.Логанина, Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов, О.А. Давыдова // Региональная архитектура и строительство. – 2010. – № 2. – С. 53–57.

19. Логанина, В.И. Влияние активации диатомита на свойства известковых композиций / В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 3 (627). – С. 20–23.

20. Логанина, В.И. Свойства жидкого стекла с добавкой золя кремниевой кислоты / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Е.Б. Мажитов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2017. – № 8 (704). – С. 74–79.

21. Логанина, В.И. Золь-гель-технология для синтеза кремнийсодержащей добавки известковых отделочных составов / В.И. Логанина, Н.А. Прошина, О.А. Давыдова // Строительные материалы. – 2009. – № 7. – С. 48–49.

22. Логанина, В.И. Свойства модифицированного связующего для силикатных красок / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, В.С. Демьянова, Е.Б. Мажитов // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4 (33). – С. 17–23.

23. 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.

24. Логанина, В.И. Нормативная обеспеченность качества сухих строительных смесей / В.И. Логанина, Е.И. Куимова, Т.В. Учаева // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 1(34). – С. 32–36.

25. Логанина, В.И. Повышение водостойкости известковых составов / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, К.А. Сергеева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. –№1. – С.42–46.

26. Логанина, В.И. Структура и свойства тонкодисперсных наполнителей на основе силикатов кальция для сухих строительных смесей / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, К.А. Сергеева // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – №2(31). – С.167–169.

27. Никифоров, Е.А. Особенности структурообразования известковых композитов с применением модифицированного диатомита / Е.А. Никифоров, В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – № 2. – С. 4–8.

28. DIN 18550-2-2015. Планирование, подготовка и применение штукатурки для наружных и внутренних работ. Часть 2. Дополнительные требования к DIN EN 3914-2 для внутренней штукатурки. – Росстандарт, 2022.

29. Получение и применение гидрозолей кремнезема / под ред. проф. Ю.Г. Фролова // Труды МХТИ им. Менделеева. – 1979. – С. 37.

30. Пухаренко, Ю.В. Реставрация исторических объектов с применением современных сухих строительных смесей / Ю.В. Пухаренко, А.М. Харитонов, Н.Н. Шангина, Т.Ю. Сафонова // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – № 1. – С. 98–103.

31. Селяев, В.П. Влияние структуры цеолитсодержащих композитов на долговечность бетона / В.П. Селяев, Л.И. Куприяшкина // Современные проблемы строительного материаловедения: материалы V акад. чтений / Рос. акад. Архитектуры и строит. наук. – Воронеж, 1999. – С. 394–398.

32. Чулкова, И.Л. Структурообразование строительных композитов на основе принципа сродства структур / И.Л. Чулкова // Вестник СибАДИ. – 2012. – № 6. – С.83–88.

33. Чулкова, И.Л. Твердение и свойства водных суспензий цементных минералов под влиянием суперпластификаторов / И.Л. Чулкова, В.С. Лесовик, Г.И. Бердов. // Всероссийская конференция «Современные проблемы производства и использования композиционных строительных материалов» НГАСУ (СИБСТРИН), посвященная 100-летнему юбилею профессора Г.И. Книгиной и 80-летнему юбилею профессора В.М. Хрулева: сб. науч. статей. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2009. – С. 46–49.

34. Чулкова, И.Л. Известково-реставрационные композиты / И.Л. Чулкова // Вестник СибАДИ. – 2012. – № 5 – С.71–77.

35. Чулкова, И.Л. Возможность использования сухих смесей для реставрации и реконструкции объектов старины из известняка на основе закона сродства структур / И.Л. Чулкова // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2013. – №6(34). – С.66–69.

36. Хозин, В.Г. Общая концентрационная закономерность эффектов наномодифицирования строительных материалов / В.Г. Хозин, Л.А. Абдрахманова, Р.К. Низамов // Строительные материалы. – 2015. – № 2. – С. 25–33.

37. Adams, F.W. Effect of particle size on the hydration of lime / F.W. Adams // Industrial and engineering chemistry. – 1997. – № 5. – P. 589–591.

38. Allen, W.I. Lime as a building material / W. Allen, I. Allen, L.A. McDonald // The structural engineer. – 2003. – № 17. – 317 p.

39. Ashurst, J. The technology and use of hydraulic lime / J. Ashurst // Lime news. – 1997. – №5. – P. 51–58.

40. Bakolas, A. Chemico-physical interactions among the constituents of historical walls in Venice / A. Bakolas, R. Bertoncello, G. Biscontin, A. Glisenti, A. Moropoulou, E. Tondello, E. Zendri // Materials Issues in Art and Archaeology IV. Mat. Res. Soc / J.R. Druzik, P.B. Vandiver (Eds.). – Pittsburgh, 1995. – P. 771–777.

41. Bakolas, A. Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in metakaolin–lime pastes / A.Bakolas, E. Aggelakopoulou, S. Anagnostopoulou, A. Moropoulou // Therm. Anal. Calorim. – 2006. – 84 (1). – P. 157–163.

42. Bakolas, A. Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in ceramic powder-lime pastes / A.Bakolas, E. Aggelakopoulou, A. Moropoulou // Therm. Anal. Calorim. – 2008. – 92 (1). – P. 34–351.

43. Bergna, H.E. Colloidal Silica. Fundamentals and Applications / H.E. Bergna, W.O. Roberts. – Taylor and Francis, 2006. – 884 p.

44. Bokan Bosiljkov, V. The use of industrial and traditional limes for lime mortars / V. Bokan Bosiljkov // Historical Constructions / P.B. Lourenco, P. Roca (Eds.). – University of Minho, Guimaraes, 2001. – P. 343–352.

45. BS EN 1015: Methods of test for mortar for masonry

46. Cabrera, J. Mechanism of hydration of the metakaolin–lime–water system / J. Cabrera, M. Frias // Cem. Concr. Res. – 2001. – 31 (2). – P. 177–182.

47. Carman, P.C. Constitution of colloidal silica / P.C. Carman // Transactions Faraday Society. – 1940. – Vol.36. – P. 964–973.

48. Cowan, H.J. The master builders: a history of structural and environmental design from ancient Egypt to the nineteenth century / H.J. Cowan.– New York: John Willey &Sons, 1977.

49. Degryse, P. Study of ancient mortars from Sagalassos (Turkey) in view of their conservation / P.Degryse, J. Elsen, M. Waelkens // Cem Concr Res. – 2002. – 32:1457. – P.63.

50. Figovsky, O.L. Conductive Coatings Based on Quaternary Ammonium Silicates / O.L. Figovsky, V. Karchevsky, F. Romm // Organic-Inorganic Hybrids II. Science, Technology, Applications, University of Surrey. – 2002. – P. 11.

51. Figovsky, O. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials / O. Figovsky, Yu. Borisov, D. Beilin // Scientific Israel–Technological Advantages. – 2012. – Vol. 14, №1. – P. 7–12.

52. Fortes-Revilla, C. Modelling of Slaked lime–metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process variables / C. Fortes-Revilla, S. Martinez-Ramirez, M.T. Blanco-Varela //Cem. Concr. Comp. – 2006. – 28 (5). – P. 458–467.

53. Frías Rojas, M. Influence of metastable hydrated phases on the pore size distribution and degree of hydration of MK-blended cements cured at 60 °C / M. Frías Rojas, M.I. Sánchez de Rojas // Cem. Concr. Res. – 2005. – 35 (7). – P.1292–1298.

54. Frias, M. Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin cement pastes / M. Frias, J. Cabrera // Cem. Concr. Res. – 2000. – 30 (4). – P. 561–569.

55. Frias, M. Influence of MK on the reaction kinetics in MK/Lime and MK-Blended cement systems at 20 °C / M. Frias, J. Cabrera // Cem. Concr. Res. – 2001. – 31 (4). – P. 519–527.

56. Fortes-Revilla, C. Modelling of slaked lime–metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process variables / C. Fortes-Revilla, S. Martínez-Ramírez, M. Blanco-Varela // Cement and Concrete Composites. – 2006. – Vol. 28, Issue 5. – P. 458–467.

58. Munoz, J.F. Interaction of Amorphous Nano-aluminosilicates with Cement Pore Solution and the Effect on the Early Hydration Reaction of Portland Cement / J.F. Munoz, J.M.S. Silva, L. Perry, J. Youtcheff, K. Sobolev // Nanotechnology in Construction. – 2015. – Vol. 4. – P. 161–166.

59. Kondo, R. Early hydration of Tricalcium Silicate: a Solid Reaction with Induction and Acceleration Periods / R. Kondo, M. Daimon// J. Amer. Ceram. Soc. – 1969. – № 9. – P. 503–508.

60. Killman, E. The stability of silica-aerosyl-hydrosols under the influence of polymer adsorption. The effect of polymers on dispersion properties / E. Killman, J. Eisenlauer. – Tadros Th. F. London: Academic Press, 1982. – 414 p.

61. Kudryavtsev, P.G. Alkoxides of chemical elements – promising class of chemical compounds wich are raw materials for Hi-Tech industries / P.G. Kudryavtsev // Scientific Israel. – Technological Advantages. – 2014. – Vol.16. – N2. – P.147–170.

62. Meinolf, Lukei. Modular inspection equipment design for modular structured mechatronic products – model based systems engineering approach for an integrative product and production system development / Meinolf Lukei, Bassem Hassan, Roman Dumitrescu, Thorsten Sigges, Viktor Derksen // Procedia Technology. – 2016. – Vol. 26. – P. 455–464.

63. Muñoz, J.F. Using alkali-activated natural aluminosilicate minerals to produce compressed masonry construction materials /J.F. Muñoz, T. Easton, J. Dahmen // Construction and Building Materials. – 2015. – 95. – P. 86–95.

64. Moropoulou, A. Range of acceptability limits of physical, chemical and mechanical characteristics deriving from the evaluation of historic mortars / A. Moropoulou, A. Bakolas // Compatible Materials for the Restoration of European Cultural Heritage, Pact 56 / G. Biscontin, A. Moropoulou, M. Erdik, J.D. Delgado Rodrigues (Eds.).– 1998. – P. 165–178.

65. Migiey, H.G. International Seminary on Calcium Aluminates / H.G. Migiey; eds M. Murat [et al.]. – Turin: Politecnico di Torino, 1982.

66. Poraver-x – URL: http://www.poraver.com/poraver-x/

67. Pat. US 4289653, B01J21/12; B01J23/85; C10G45/08; (IPC1-7): B01J21/12. Co-gel catalyst manufacture / Jaffe, Joseph (CA), assignee Chevron Research Company (CA).

68. Pat. US 4499197, C10G11/05; B01J21/12; B01J23/10; B01J29/00; B01J37/03; C01B33/152; C10G11/00; (IPC1-7): B01J21/12; B01J29/08. Co-gel catalyst manufacture / Seese, Mark A. (MD), Chiang, Robert L. (CA), assignee W. R. Grace & Co. (New York, NY).

69. Pat. US4988659, B01J21/12; C10G11/04; (IPC1-7): B01J21/12. Silica/alumina cogel catalysts / Pecoraro, Theresa A. (CA), assignee Chevron Research Company (CA).

70. Rao, S. Experimental study of the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with nano materials (SiO_2 and TiO_2) / S. Rao, P. Silva, J. De Brito // Construction and Building Materials. – 2015. – Vol. 96. – P. 508–517.

71. Rao, I.V. Phase behavior of mixtures of sterically stabilized colloidal dispersions and free polymer / I.V. Rao, E. Ruckenstein // Journal of Colloid and Interface Science. – 1985. – Vol. 108, №2. – P. 389–402.

72. Rajgelj, S. Cohesion Aspectsin rheological behaviour of fresh cement mortars / S. Rajgelj // Mater. etconstr. – 1985. – №104. – P. 109-114.

73. Ross, H. Praxis-HandbuchPutz / H. Ross, F. Stahl. – Koln, 2006. – 300 p.

74. Roberts L.R. Microsilica in concrete.1 / L.R. Roberts, W.R. Grace // Mater. Sci. Concr.1. − Westerville (Ohio), 1989. − P. 197−222.

75. Silva, L.M. Role of lightweight fillers on the properties of a mixed-binder mortar/ L.M. Silva, R.A. Ribeiro, J.A. Labrincha, V.M. Ferreira // Cement & Concrete Composites. – 2010. – 32. – P.19–24.

76. Our Products // Saythermoplast. – URL: http://www.saythermoplast.in/products.html

77. Torraca Giorgio. Porous building materials: materials science for architectural conservation / ISBN 92-9077-198-4 © ICCROM 2005.

78. Hay, J.N. / J.N. Hay, H.M. Raval // Sol-Gel Sci. Tech. – 1998. – Vol. 13. – P.109.

References

1. Isler, P. Chemistry of silica / R.Isler. – M.: Mir, 1982.

2. Batalin, B.S. Studies of the effectiveness of additives used for the production of dry building mixes / B.S. Batalin // Successes of modern natural science. – 2007. – No. 7. – P. 60–62.

3. Bolshakov, E.L. Dry mixes for finishing works / E.L. Bolshakov // Building materials. – 1997. – No.7. – P. 8–9.

4. Golubev, V.I. New products on the market of additives for dry building mixes and concretes / V.I. Golubev, P.G. Vasilik //Building materials. – 2006. – No. 3. – P. 24–25.

5. Gontar, Yu.V. Modified dry mixes for finishing works / Yu.V. Gontar, A.I. Chalova // Building materials. – 2001. – No. 4. – P. 8–10.

6. Zapevalova, M.V. Building materials and services / M.V. Zapevalova // Market overview of dry building mixes – 2011. – No. 6. – URL: http://www.vashdom.ru/articles/strm5.htm

7. Kalashnikov, V.I. Nanohydrosilicate technologies in the production of concrete / V.I. Kalashnikov, V.T. Erofeev, M.N. Moroz, I.Yu. Troyanov, V.M. Volodin, O.V. Suzdaltsev // Building materials. – 2014. – No. 5. – P. 88–91.

8. Komokhov, P.G. Sol-gel as a concept of cement composite nanotechnology/ P.G.Komokhov //Building materials. – 2006. – No.9. – P. 14–15.

9. Kaprielov, S.S. General patterns of formation of the structure of cement stone and concrete with the addition of ultrafine materials / S.S. Kaprielov // Concrete and reinforced concrete. – 1995. – No. 4. – P. 16–20.

10. Kozlov, V.V. Dry building mixes / V.V. Kozlov. – M.: Publishing House of the DIA, 2000. – 96 p.

11. Korolev, E.V. Assessment of the concentration of primary nanomaterials for modifying building composites / E.V. Korolev // Nanotechnologies in construction. – 2014. – No. 6. – P. 31–34.

12. Kopanitsa, N.O. The use of nanodispersed silica in the production of building mixes / N.O. Kopanitsa, Y.S. Sarkisov, O.V. Demyanenko // Bulletin of TSASU. – 2016. – No. 5. – P.140–146.

13. Krasinikova, N.M. The influence of polysilicate on the structure formation of cement stone / N.M. Krasinikova, Z.F. Iksanova // Izvestiya KGASU. – 2019. – No. 4. – P.347–352.

14. Korotkov, D.N. On the requirements for nanomodifying additives for high-strength cement concretes / D.N. Korotkov, O.V. Artamonova, E.M. Chernyshov // Technologies of concrete. – 2009. – No. 9-10. – P. 86–88.

15. Lesovik, V.S. Management of structure formation of building composites: monograph / V.S. Lesovik, I.L. Chulkova. – Omsk: SibADI, 2011. – 420 p.

16. Loganina, V.I. Plaster mixes for restoration works with the use of painted fillers / V.I. Loganina, L.V. Makarova // Regional architecture and engineering . – 2009. – No. 1. – P. 38–40.

17. 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 V.G. Shukhov. – 2014. – No. 2. – P. 55–57.

18. Loganina, V.I. Optimization of the composition of composites for general construction purposes modified with nanoscale additives / V.I.Loganina, L.V. Makarova, R.V. Tarasov, O.A. Davydova // Regional architecture and engineering . – 2010. – No. 2. – P. 53–57.

19. Loganina, V.I. The influence of diatomite activation on the properties of lime compositions / V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // Izvestia of higher educational institutions. Construction. – 2011. – № 3 (627). – P. 20–23.

20. Loganina, V.I. Properties of liquid glass with the addition of silicic acid sol / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, E.B. Mazhitov // Izvestia of higher educational institutions. Construction. – 2017. – № 8 (704). – P. 74–79.

21. Loganina, V.I. Sol gel technology for the synthesis of silicon-containing additives of lime finishing compositions / V.I. Loganina, N.A. Proshina, O.A. Davydova // Building materials. – 2009. – No. 7. – P. 48–49.

22. Loganina, V.I. Properties of a modified binder for silicate paints / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, V.S. Demyanova, E.B. Mazhitov // Regional architecture and engineering. – 2017. – № 4 (33). – P. 17–23.

23. 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 V.G. Shukhov. – 2014. – No. 2. – P. 55–57.

24. Loganina, V.I. Normative quality assurance of dry building mixes / V.I. Loganina, E.I. Kuimova, T.V. Uchaeva // Regional architecture and engineering . – 2018. – № 1(34). – P. 32–36.

25. Loganina, V.I. Increasing the water resistance of lime compositions / V.I. Loganina, L.V. Makarova, K.A. Sergeeva // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2012. – No.1. – P.42–46.

26. Loganina, V.I. Structure and properties of fine fillers based on calcium silicates for dry building mixes / V.I. Loganina, L.V. Makarova, K.A. Sergeeva // Bulletin of Civil Engineers. – 2012. – №2(31). – P.167–169.

27. Nikiforov, E.A. Features of the structure formation of calcareous composites using modified diatomite / E.A. Nikiforov, V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // Regional architecture and engineering . – 2011. – No. 2. – P. 4–8.

28. DIN 18550-2-2015. Planning, preparation and application of plaster for exterior and interior work. Part 2. Additional requirements to DIN EN 3914-2 for interior plaster. – Rosstandart, 2022.

29. Preparation and application of silica hydrosols / edited by prof. Yu.G. Frolov // Works of the Moscow Art Institute. Mendeleev. – 1979. – P. 37.

30. Pukharenko, Yu.V. Restoration of historical objects using modern dry building mixes / Yu.V. Pukharenko, A.M. Kharitonov, N.N. Shangina, T.Yu. Safonova // Bulletin of Civil Engineers. – 2011. – No. 1. – P. 98–103.

31. Selyaev, V.P. The influence of the structure of zeolite-containing composites on the durability of concrete / V.P. Selyaev, L.I. Kupriyashkina // Modern problems of building materials science: Materials of the V Acad. readings / Russian Academy of Sciences. Architecture and Building Sciences. – Voronezh, 1999. – P. 394–398.

32. Chulkova, I.L. Structure formation of building composites based on the principle of affinity of structures / I.L. Chulkova // Bulletin of SibADI. – 2012. – No. 6. – P.83–88.

33. Chulkova, I.L. Hardening and properties of aqueous suspensions of cement minerals under the influence of superplasticizers / I.L. Chulkova, V.S. Lesovik, G.I. Berdov. // All-

Russian conference "Modern problems of production and use of composite building materials" NGASU (SIBSTRIN), dedicated to the 100th anniversary of Professor G.I. Knigina and the 80th anniversary of Professor V.M. Khruleva: collection of scientific works. articles. – Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2009. – P. 46–49.

34. Chulkova, I.L. Lime-restoration composites / I.L. Chulkova // Bulletin of SibADI. – 2012. – No. 5 – P.71–77.

35. Chulkova, I.L. The possibility of using dry mixtures for the restoration and reconstruction of ancient limestone objects based on the law of affinity of structures / I.L. Chulkova // Bulletin of the Siberian State Automobile and Road Academy. – 2013. – №6(34). – P.66–69.

36. Khozin, V.G. The general concentration pattern of the effects of nanomodification of building materials / V.G. Khozin, L.A. Abdrakhmanova, R.K. Nizamov // Building materials. – 2015. – No. 2. – P. 25–33.

37. Adams, F.W. Effect of particle size on the hydration of lime / F.W. Adams // Industrial and engineering chemistry. – 1997. – № 5. – P. 589–591.

38. Allen, W.I. Lime as a building material / W. Allen, I. Allen, L.A. McDonald // The structural engineer. – 2003. – № 17. – 317 p.

39. Ashurst, J. The technology and use of hydraulic lime / J. Ashurst // Lime news. – 1997. – №5. – P. 51–58.

40. Bakolas, A. Chemico-physical interactions among the constituents of historical walls in Venice / A. Bakolas, R. Bertoncello, G. Biscontin, A. Glisenti, A. Moropoulou, E. Tondello, E. Zendri // Materials Issues in Art and Archaeology IV. Mat. Res. Soc / J.R. Druzik, P.B. Vandiver (Eds.). – Pittsburgh, 1995. – P. 771–777.

41. Bakolas, A. Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in metakaolin–lime pastes / A.Bakolas, E. Aggelakopoulou, S. Anagnostopoulou, A. Moropoulou // Therm. Anal. Calorim. – 2006. – 84 (1). – P. 157–163.

42. Bakolas, A. Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in ceramic powder-lime pastes / A.Bakolas, E. Aggelakopoulou, A. Moropoulou // Therm. Anal. Calorim. – 2008. – 92 (1). – P. 34–351.

43. Bergna, H.E. Colloidal Silica. Fundamentals and Applications / H.E. Bergna, W.O. Roberts. – Taylor and Francis, 2006. – 884 p.

44. Bokan Bosiljkov, V. The use of industrial and traditional limes for lime mortars / V. Bokan Bosiljkov // Historical Constructions / P.B. Lourenco, P. Roca (Eds.). – University of Minho, Guimaraes, 2001. – P. 343–352.

45. BS EN 1015: Methods of test for mortar for masonry

46. Cabrera, J. Mechanism of hydration of the metakaolin–lime–water system / J. Cabrera, M. Frias // Cem. Concr. Res. – 2001. – 31 (2). – P. 177–182.

47. Carman, P.C. Constitution of colloidal silica / P.C. Carman // Transactions Faraday Society. – 1940. – Vol.36. – P. 964–973.

48. Cowan, H.J. The master builders: a history of structural and environmental design from ancient Egypt to the nineteenth century / H.J. Cowan.– New York: John Willey &Sons, 1977.

49. Degryse, P. Study of ancient mortars from Sagalassos (Turkey) in view of their conservation / P.Degryse, J. Elsen, M. Waelkens // Cem Concr Res. – 2002. – 32:1457. – P.63.

50. Figovsky, O.L. Conductive Coatings Based on Quaternary Ammonium Silicates / O.L. Figovsky, V. Karchevsky, F. Romm // Organic-Inorganic Hybrids II. Science, Technology, Applications, University of Surrey. – 2002. – P. 11.

51. Figovsky, O. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials / O. Figovsky, Yu. Borisov, D. Beilin // Scientific Israel–Technological Advantages. – 2012. – Vol. 14, №1. – P. 7–12.

52. Fortes-Revilla, C. Modelling of Slaked lime–metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process variables / C. Fortes-Revilla, S. Martinez-Ramirez, M.T. Blanco-Varela //Cem. Concr. Comp. – 2006. – 28 (5). – P. 458–467.

53. Frías Rojas, M. Influence of metastable hydrated phases on the pore size distribution and degree of hydration of MK-blended cements cured at 60 °C / M. Frías Rojas, M.I. Sánchez de Rojas // Cem. Concr. Res. – 2005. – 35 (7). – P.1292–1298.

54. Frias, M. Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin cement pastes / M. Frias, J. Cabrera // Cem. Concr. Res. – 2000. – 30 (4). – P. 561–569.

55. Frias, M. Influence of MK on the reaction kinetics in MK/Lime and MK-Blended cement systems at 20 °C / M. Frias, J. Cabrera // Cem. Concr. Res. – 2001. –31 (4). – P. 519–527.

56. Fortes-Revilla, C. Modelling of slaked lime–metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process variables / C. Fortes-Revilla, S. Martínez-Ramírez, M. Blanco-Varela // Cement and Concrete Composites. – 2006. – Vol. 28, Issue 5. – P. 458–467.

58. Munoz, J.F. Interaction of Amorphous Nano-aluminosilicates with Cement Pore Solution and the Effect on the Early Hydration Reaction of Portland Cement / J.F. Munoz, J.M.S. Silva, L. Perry, J. Youtcheff, K. Sobolev // Nanotechnology in Construction. – 2015. – Vol. 4. – P. 161–166.

59. Kondo, R. Early hydration of Tricalcium Silicate: a Solid Reaction with Induction and Acceleration Periods / R. Kondo, M. Daimon// J. Amer. Ceram. Soc. – 1969. – № 9. – P. 503–508.

60. Killman, E. The stability of silica-aerosyl-hydrosols under the influence of polymer adsorption. The effect of polymers on dispersion properties / E. Killman, J. Eisenlauer. – Tadros Th. F. London: Academic Press, 1982. – 414 p.

61. Kudryavtsev, P.G. Alkoxides of chemical elements – promising class of chemical compounds wich are raw materials for Hi-Tech industries / P.G. Kudryavtsev // Scientific Israel. – Technological Advantages. – 2014. – Vol.16. – N2. – P.147–170.

62. Meinolf, Lukei. Modular inspection equipment design for modular structured mechatronic products – model based systems engineering approach for an integrative product and production system development / Meinolf Lukei, Bassem Hassan, Roman Dumitrescu, Thorsten Sigges, Viktor Derksen // Procedia Technology. – 2016. – Vol. 26. – P. 455–464.

63. Muñoz, J.F. Using alkali-activated natural aluminosilicate minerals to produce compressed masonry construction materials /J.F. Muñoz, T. Easton, J. Dahmen // Construction and Building Materials. – 2015. – 95. – P. 86–95.

64. Moropoulou, A. Range of acceptability limits of physical, chemical and mechanical characteristics deriving from the evaluation of historic mortars / A. Moropoulou, A. Bakolas // Compatible Materials for the Restoration of European Cultural Heritage, Pact 56 / G. Biscontin, A. Moropoulou, M. Erdik, J.D. Delgado Rodrigues (Eds.).– 1998. – P. 165–178.

65. Migiey, H.G. International Seminary on Calcium Aluminates / H.G. Migiey; eds M. Murat [et al.]. – Turin: Politecnico di Torino, 1982.

66. Poraver-x – URL: http://www.poraver.com/poraver-x/

67. Pat. US 4289653, B01J21/12; B01J23/85; C10G45/08; (IPC1-7): B01J21/12. Co-gel catalyst manufacture / Jaffe, Joseph (CA), assignee Chevron Research Company (CA).

68. Pat. US 4499197, C10G11/05; B01J21/12; B01J23/10; B01J29/00; B01J37/03; C01B33/152; C10G11/00; (IPC1-7): B01J21/12; B01J29/08. Co-gel catalyst manufacture / Seese, Mark A. (MD), Chiang, Robert L. (CA), assignee W. R. Grace & Co. (New York, NY).

69. Pat. US4988659, B01J21/12; C10G11/04; (IPC1-7): B01J21/12. Silica/alumina cogel catalysts / Pecoraro, Theresa A. (CA), assignee Chevron Research Company (CA).

70. Rao, S. Experimental study of the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with nano materials (SiO_2 and TiO_2) / S. Rao, P. Silva, J. De Brito // Construction and Building Materials. – 2015. – Vol. 96. – P. 508–517.

71. Rao, I.V. Phase behavior of mixtures of sterically stabilized colloidal dispersions and free polymer / I.V. Rao, E. Ruckenstein // Journal of Colloid and Interface Science. – 1985. – Vol. 108, №2. – P. 389–402.

72. Rajgelj, S. Cohesion Aspectsin rheological behaviour of fresh cement mortars / S. Rajgelj // Mater. etconstr. – 1985. – №104. – P. 109-114.

73. Ross, H. Praxis-HandbuchPutz / H. Ross, F. Stahl. – Koln, 2006. – 300 p.

74. Roberts L.R. Microsilica in concrete.1 / L.R. Roberts, W.R. Grace // Mater. Sci. Concr.1. − Westerville (Ohio), 1989. − P. 197−222.

75. Silva, L.M. Role of lightweight fillers on the properties of a mixed-binder mortar/ L.M. Silva, R.A. Ribeiro, J.A. Labrincha, V.M. Ferreira // Cement & Concrete Composites. – 2010. – 32. – P.19–24.

76. Our Products // Saythermoplast. – URL: http://www.saythermoplast.in/products.html

77. Torraca Giorgio. Porous building materials: materials science for architectural conservation / ISBN 92-9077-198-4 © ICCROM 2005.

78. Hay, J.N. / J.N. Hay, H.M. Raval // Sol-Gel Sci. Tech. – 1998. – Vol. 13. – P.109.

УДК 691.544:666.9.015.4 DOI 10.54734/20722958_2022_3_96

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

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

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

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

ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТОГО ЦЕМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ГИДРАТАЦИИ

Н.А. Очкина

Описано влияние вида модифицирующей добавки на тепловыделение в процессе гидратации высокоглиноземистого цемента. По кинетическим кривым тепловыделения определена продолжительность каждого из четырех периодов гидратации и максимальная температура разогрева цементного теста. Исследована зависимость тепловыделения от объемной степени наполнения композита на составах, изготовленных на основе двух фракций полиминерального отхода производства с удельными поверхностями 2,5 м^2/кг и 105 м^2/кг при водоцементном отношении, равном 0,5. Установлено, что увеличение степени наполнения композита приводит к снижению температурного максимума и уменьшению количества выделяющейся теплоты.

Ключевые слова: высокоглиноземистый цемент, модифицирующие добавки, степень наполнения, водоцементное отношение, гидратация, тепловыделение, температура разогрева

HEAT RELEASE OF HIGH-ALUMINA CEMENT DURING HYDRATION

N.A. Ochkina

The influence of the type of modifying additive on heat release during hydration of high-alumina cement has been studied. The kinetic curves of heat release determine the duration of each of the four periods of hydration and the maximum heating temperature of the cement dough. The dependence of heat release on the volumetric degree of filling of the composite on compositions made on the basis of two fractions of polymineral production waste with specific surfaces of 2.5 m2/kg and 105 m2/kg with a water-cement ratio equal to 0.5 is investigated. It is established that an increase of composite filling degree leads to a decrease of temperature maximum and a decrease of the amount of heat released.

Keywords: high-alumina cement, modifying additives, degree of filling, water-cement ratio, hydration, heat release, heating temperature

Известно (Рояк С.М., Кузнецова Т.В., Ли Ф.М.), что тепловыделение глиноземистых цементов имеет свои характерные особенности. При их твердении выделяется значительное количество теплоты Q (315–399 кДж/кг). В отдельных случаях у цементов высоких марок Q составляет, например, 504 кДж/кг за 28 сут твердения, а у цементов средних и низких марок Q = 252–294 кДж/кг. Общее количество выделяющейся теплоты находится примерно в тех же пределах, что и у высокопрочного портландцемента, но более быстрая гидратация глиноземистых цементов ускоряет процесс тепловыделения. Установлено (Кузнецова Т.В., Бутт Ю.М.), что экзотермические реакции взаимодействия цемента с водой начинаются не сразу после затворения и даже не непосредственно после конца схватывания, а через 5–8 часов. Скорость протекания реакции гидратации глиноземистых цементов высока. За сутки выделяется

70–80 % общего количества теплоты. Для снижения температуры твердеющих глиноземистых цементов применяют различные способы их охлаждения: ведут укладку небольших объемов бетона, используют глиноземистые цементы для проведения работ в зимний период.

Было изучено влияние вида модифицирующей добавки на тепловыделение в процессе гидратации высокоглиноземистого цемента (ВГЦ). Добавки вводились в оптимальных дозировках: С-3 – 0,5 %, ЛСТ – 0,15 %, карбамидная смола – 1 %, лимонная кислота – 0,1 % и ССК – 0,2 % от массы цемента [1]. Влияние вида модификатора на тепловыделение определяли на цементном тесте нормальной густоты. Для регистрации количества выделяющейся теплоты использовали автоматический калориметр термосного типа.

На рис. 1 приведены температурные кривые немодифицированного цементного теста из ВГЦ и цементного теста с различными добавками, на которых можно выделить четыре периода. Первый характеризуется сравнительно небольшим подъемом температуры и соответствует начальному взаимодействию цемента с водой. В течение этого периода происходит гидратация поверхностного слоя цементных частиц. Второй период – индукционный, соответствует пологому участку кривой. В этом периоде происходит дальнейшая гидратация нижележащих слоев частиц цемента и накапливание на их поверхности продуктов гидратации. При этом выделяется незначительное количество теплоты.

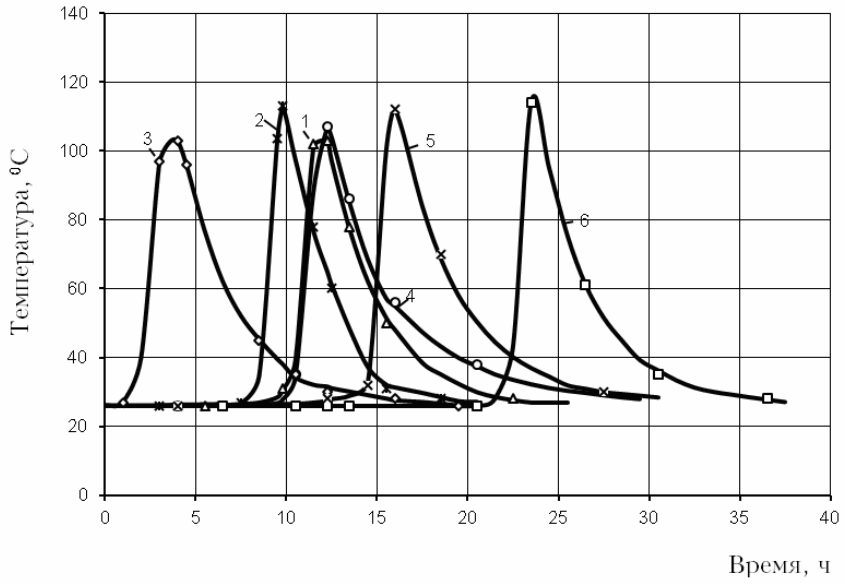


Рис. 1. Кинетика тепловыделения ВГЦ:
1 – без добавки; 2 – с добавкой 0,15 % ЛСТ; 3 – 1 % карбамидной смолы; 4 – 0,5 % С-3;
5 – 0,1 % лимонной кислоты; 6 – 0,2 % ССК

Третий период – ускорения (левая ветвь) – характеризуется бурным выделением тепла и заканчивается температурным максимумом, после чего наблюдается медленный спад температуры. В течение третьего периода продолжают накапливаться гелеобразные продукты гидратации, происходит уплотнение цементного камня. При температурном максимуме происходит кристаллизация гелеобразных новообразований. В четвертый период – замедления (правая ветвь) – температурная кривая полого идет вниз. При этом продолжается кристаллизация гелеобразных продуктов гидратации.

В табл. 1 показана продолжительность каждого периода для цементного теста без добавки и с добавками. Видно, что вводимые добавки не изменяют закономерностей термокинетики гидратации, но оказывают влияние на показатели интенсивности и общего тепловыделения.

Таблица 1

Влияние добавок на продолжительность периодов тепловыделения

Вид и дозировка добавки (% от массы цемента)	Продолжительность периодов гидратации на кинетических кривых тепловыделения, ч			
	I	II	III	IV
Без добавки	$\frac{6,5}{26,2}$	$\frac{3,5}{35,6}$	$\frac{22,5}{103}$	12
ЛСТ – 0,15 %	$\frac{6}{26,4}$	$\frac{2}{34,5}$	$\frac{1,3}{112,5}$	10,5
Карбамидная смола – 1 %	$\frac{1}{26,7}$	–	$\frac{2,5}{102,8}$	14,5
С-3 – 0,5 %	$\frac{8,5}{26,2}$	$\frac{2}{30,4}$	$\frac{1,5}{106,5}$	19
Лимонная кислота – 0,1 %	$\frac{10}{26,2}$	$\frac{4}{33}$	$\frac{1,5}{112}$	16
ССК – 0,2 %	$\frac{20,5}{26,1}$	$\frac{1}{26,5}$	$\frac{2}{114}$	14

В таблице: в числителе – продолжительность периода, час; в знаменателе – максимальная температура разогрева,°С.

Добавка ЛСТ после 7 часов от начала гидратации вызывает резкое повышение тепловыделения, сдвиг температурного максимума влево и увеличение его до 112,5 °С. Такое изменение характера тепловыделения объясняется ускорением процесса гидратации и более ранним появлением кристаллических новообразований. При введении карбамидной смолы также резко возрастает тепловыделение, практически исчезает индукционный период. Температурный максимум (102,8 °С) наблюдается через 3,5 ч гидратации. После него наблюдается более плавный спад температуры, чем у предыдущих составов. Кривая тепловыделения цементного теста с добавкой суперпластификатора С-3 мало отличается от температурной кривой немодифицированного цемента. В первые часы гидратации наблюдается некоторое небольшое снижение тепловыделения по сравнению с цементным тестом без добавки, в дальнейшем имеет место увеличение температурного максимума до 106,5°С и более медленный спад температуры. Добавки-замедлители – лимонная и сульфосалициловая кислоты – также вызывают повышение общего тепловыделения. ВГЦ с добавкой лимонной кислоты дает температурный максимум, равный 112 °С, через 15,5 ч гидратации. Температурная кривая цемента с добавкой сульфосалициловой кислоты имеет самый продолжительный первый период взаимодействия цемента с водой. Добавка ССК вызывает значительный сдвиг температурного максимума, равного 114 °С, вправо. Он наблюдается только через 23,5 ч после затворения.

Таким образом, добавки ЛСТ и карбамидной смолы способствуют ускорению тепловыделения, в то время как введение в состав цемента ССК и лимонной кислоты снижает скорость тепловыделения.

Расчет количества теплоты, выделившейся в процессе гидратации ВГЦ (табл. 2), проводился по методике, изложенной в ГОСТ 4798-57.

Тепловыделение композитов определяется теплофизическими характеристиками заполнителя и наполнителя, их дисперсным составом и объемной долей в составе композита, а также видом и концентрацией добавок. Исследование зависимости тепловыделения от объемной степени наполнения проводили на составах, изготовленных на основе двух фракций полиминерального отхода производства (ПМО) с удельными поверхностями 2,5 м^2/кг и 105 м^2/кг, соотношение между которыми было

принято 1,86:1. Объемная степень наполнения композитов ϑ_f составляла 0,66 и 0,70 при водоцементном отношении В/Ц = 0,5. Экспериментальные данные, представленные на рис. 2. и в табл. 3, показывают, что введение в цемент разного количества наполнителя в значительной степени изменяет величину и кинетику тепловыделения. Увеличение степени наполнения композитов приводит к значительному снижению величины температурного максимума и уменьшению количества выделившейся теплоты (табл. 3). Наполнитель способствует рассеиванию тепла, уменьшает температурные деформации. Полученные результаты хорошо коррелируются с данными по прочностным свойствам особо тяжелых композитов [2, 3, 4].

Таблица 2

Влияние добавок на теплоту гидратации ВГЦ

Вид добавки	Теплота гидратации, кДж/кг
Без добавки	340
Карбамидная смола	390
ЛСТ	347
С-3	370
Сульфосалициловая кислота	360
Лимонная кислота	402

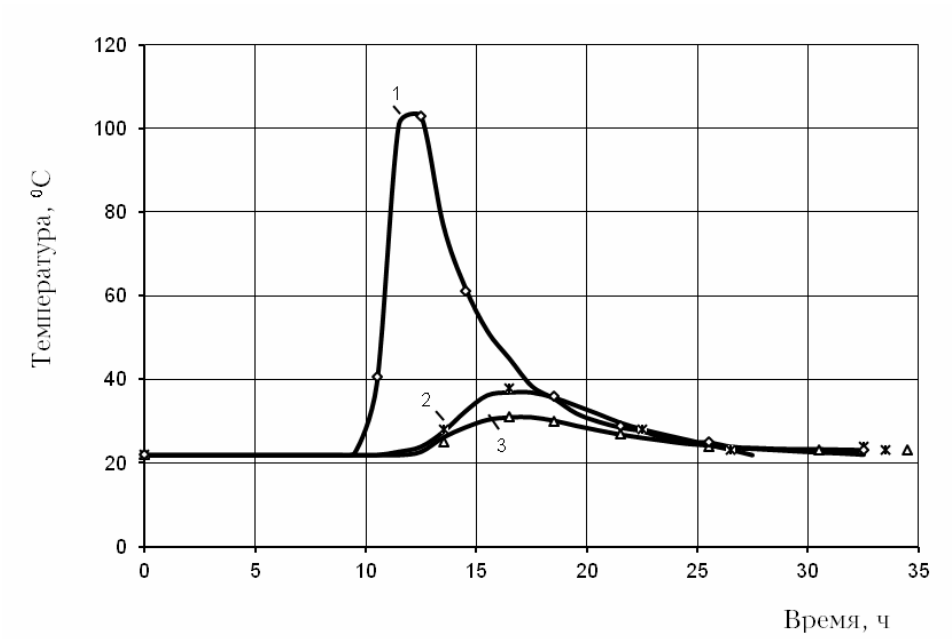


Рис. 2. Кинетика тепловыделения:
1 – ВГЦ; 2 – композит с объемной степенью наполнения $\vartheta_f = 0,59$; 3 – $\vartheta_f = 0,66$

Таблица 3

Максимальная температура разогрева композитов в адиабатических условиях и количество выделившейся теплоты (В/Ц = 0,5)

Показатель	Объемная степень наполнения		
	$\vartheta_f = 0,59$	$\vartheta_f = 0,66$	$\vartheta_f = 0,71$
Максимальная температура разогрева, °С	37	31	28
Количество выделившейся теплоты, кДж/кг	149	96	77

На рис. 3 приведены температурные кривые модифицированных растворов с одинаковым В/Ц = 0,5 и объемной степенью наполнения $\vartheta_f = 0,66$.

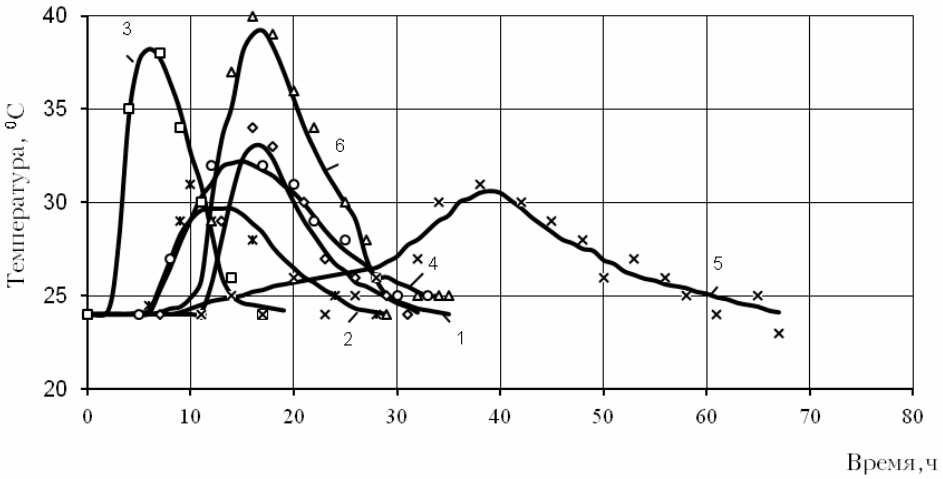


Рис. 3. Кинетика тепловыделения композитов:
1 – без добавки; 2 – с добавкой 0,15 % ЛСТ; 3 – 1 % карбамидной смолы; 4 – 0,5 % С-3;
5 – 0,1 % лимонной кислоты; 6 – 0,2 % ССК

Как видно из рис. 3, общий характер влияния добавок на тепловыделение особо тяжелых растворов, наполненных ПМО, аналогичен характеру влияния их на ненаполненные цементные системы.

Проведенные исследования позволили определить влияние вида модифицирующих добавок на процессы гидратации ВГЦ и особо тяжелых композитов на его основе. Снижение температурных максимумов наблюдается при введении высокоплотного наполнителя, что приведет к получению более качественного материала.

Список литературы

1. Реологические свойства радиационно-защитных растворов на основе высокоглиноземистого цемента / Е.В. Королев, Н.А. Очкина, Ю.М. Баженов [и др.] // Строительные материалы. – 2004. – №3. – С.8–11.

2. Прошин, А.П. Разработка и управление качеством строительных материалов с регулируемыми структурой и свойствами для защиты от радиации / А.П. Прошин, А.М. Данилов, Е.В. Королев [и др.] // Идентификация систем и задачи управления Sicpro 03: Труды II Международной конференции. – М.: ИПУ РАН. 2003. – С.2437–2460.

3. Гарькина, И.А. Строительные материалы как системы / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2006. – №7. – С.55–58.

4. Саденко, С.М. Композитные материалы специального назначения на основе отходов местной промышленности / С.М. Саденко, В.А. Худяков, С.И. Егоров // Известия вузов. Строительство. – 2003. – N 7. – С. 62–65.

References

1. Rheological properties of radiation-protective solutions based on high-alumina cement / E.V. Korolev, N.A. Ochkina, Yu.M. Bazhenov [etc.] // Building Materials. – 2004. – №3. – С.8–11.

2. Proshin, A.P. Elaboration and quality management of building materials with adjustable structure and properties for protection from radiation / A.P. Proshin, A.M. Danilov, Y.V. Korolev [etc.] // System Identification and Control Problems ´SICPRO 03: Proceedings of the II International Conference, IPM RAS. – M., 2003. – P. 2437–2460.

3. Garkina, I.A. Building materials as systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Building materials. – 2006. – No. 7. – P.55–58.

4. Sadenko, S.M Composite materials for special purposes on the basis of waste of local industry / S.M Sadenko, V.A Khudyakov, S.I Egorov // Izvestiya Vuzov. Building. – 2003. – N 7. – P. 62–65.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 69 DOI 10.54734/20722958_2022_3_101

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
Россия, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Клюев Сергей Васильевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов»
Клюев Александр Васильевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов»
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
Гарькин Игорь Николаевич,
доцент кафедры «Управление качеством и технология строительного производства»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Russia,Belgorod, 46,Kostyukova St.
Klyuev Sergey Vasilyevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Theoretical Mechanics and Resistance of Materials»
Klyuev Alexander Vasilyevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Theoretical Mechanics and Resistance of Materials»
Penza State University of Architecture and Construction
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77
Garkin Igor Nikolaevich,
Associate Professor of the department «Quality Management and Construction Technologies»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕРАЗРЕЗНЫХ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК

С.В. Клюев, И.Н. Гарькин, А.В. Клюев

Рассматриваются подкрановые конструкции промышленных цехов с использованием принципа концентрации материала Н.С. Стрелецкого. Учитываются эксцентриситеты при крановых нагрузках. Предлагаются новые эффективные профили для подкрановых балок, позволяющие повысить надежность, ремонтопригодность и долговечность конструкций в несколько раз при одновременном снижении материалоемкости (на 17–25 %) и значительном уменьшении трудоемкости при изготовлении конструкций.

Ключевые слова: строительные конструкции, неразрезные подкрановые балки, реализация, варианты конструкций, сравнительный анализ, оптимизация

COMPARATIVE ANALYSIS OF UNCUT CRANE BEAMS

S.V. Klyuev, I.N. Garkin, A.V. Klyuev

Crane structures of industrial shops are considered using the principle of material concentration by N.S. Streletsky. Eccentricities under crane loads are taken into account. New effective profiles for

crane beams are proposed, which make possible to increase the reliability, maintainability and durability of structures by several times reducing material consumption (17–25 %) and significantly reducing labor intensity in the manufacture of structures.

Keywords: building structures, continuous crane beams, implementation, design options, comparative analysis, optimization

В мартеновских цехах наиболее интенсивно эксплуатируемыми и повреждаемыми конструкциями являются подкрановые балки, усталостные разрушения в которых могут возникать уже после 3 лет эксплуатации с последующим нарушением или остановкой производственного процесса [1–3]. Требуются новые конструктивные решения подкрановых конструкций, долговечность которых будет сопоставима с долговечностью конструкций эксплуатируемых сооружений [4–6]. Ниже предлагаются три новых вида подкрановых балок с советующими улучшенными характеристиками [7].

Рис. 1. Подкрановая балка из эллиптических профилей

В частности, рассматривается подкрановая балка из эллиптических профилей, расчет которой произведен в соответствии с действующими нормами [8–10]. Балка выполнена из стали С255 (ВСт3 сп5) по ГОСТ 27772-88. Расчетные сопротивления: при изгибе R_y = 230 Мпа, при срезе $R_{ср} = 0{,}58 \cdot R_y$ = 133,4 МПа; коэффициент условия работы γ = 0,9; модуль упругости E = 206000 МПа; допустимый относительный прогиб $1/n_0 = 1/600$. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета подкрановой балки

Обозначение	Размерность	Величина
Нормативный момент в пролете $M_{пр}$	гН·м	36943
Расчетный момент в пролете $M_{пр}$	гН·м	43751
Нормативный момент в пролете $M_{оп}$	гН·м	112940
Расчетный момент на опоре $M_{оп}$	гН·м	131774
$(R_y - 20)\cdot\gamma$	МПа	189
Поперечная сила на опоре $Q_{оп}$	гН	44746
Поперечная сила в месте начала жесткой вставке Q	гН	16688
Момент в горизонтальной плоскости M_T	гН·м	3860,6

Требуемый момент сопротивления балки из условия прочности на изгиб :

$$W_{\text{тр}} = \frac{M}{\gamma \cdot (R_y - 20)} = \frac{4375100}{0,9 \cdot (230 - 20)} = 23148,8 \text{ см}^3.$$

Минимальный момент инерции балки при требуемой жёсткости (нагрузка нормативная):

$$I_{\min} = \frac{0,1 M_{\text{н}} l n_0}{E} = \frac{0,1 \cdot 3694300 \cdot 2400 \cdot 500}{206000} = 2152020 \text{ см}^4 .$$

Отсюда ориентировочная высота подкрановой балки составит

$$h = \left[\frac{1}{7} \cdots \frac{1}{10}\right] \cdot l = \left[\frac{1}{7} \cdots \frac{1}{10}\right] \cdot 2400 = 342...240 \text{ см} .$$

Принятые характеристики эллиптического сечения балки представлены на рис. 2.

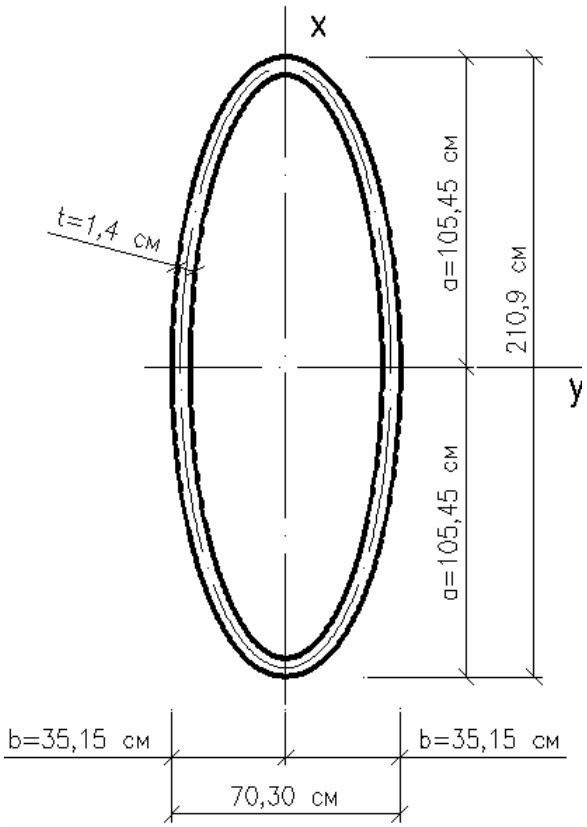


Рис. 2. Сечение балки в пролете

$I_x = 2578811,27$ см^4, $W_x = 24294,03$ см^3, $W_y = 24294,03$см^3, $I_y = 233112$см^4, $I_{\text{кр}} = 340407,89$ см^4, $i_x = 64,58$ см, $i_y = 19,42$ см, площадь сечения A=503,2 см^2.

Из условий прочности на срез минимальная площадь сечения составляет

$$A_{\text{ст}} = \frac{1,5Q}{R_{\text{ср}}} = \frac{1,5 \cdot 44746}{133,4} = 503,2 \text{ см}^2 .$$

Толщина стенки из условия прочности на срез составляет

$$t_{\text{ст}} = \frac{A_{\text{ст}}}{h_{\text{ст}}} = \frac{503,2}{200 \cdot 2} = 1,26 \text{ см} < 1,4 \text{ см} ,$$

из условия гибкости стенки

$$t_{\text{ст}} = \sqrt[3]{\frac{1,5W_x}{130^2}} = \sqrt[3]{\frac{1.5 \cdot 23148,8}{130^2}} = 1,3 \text{ см} < 1,4 \text{ см}.$$

Работа рельсового блока не учитывается. Крутящий момент $M_{\text{кр}} = T \cdot Y$; Y – расстояние от места приложения тормозной силы до центра тяжести сечения.

$$M_{\text{кр}} = 365,75 \cdot 1,0545 = 385,68 \text{ гН} \cdot \text{м};$$

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{M_{\text{кр}}}{W_{\text{кр}}} = \frac{385,68}{11,65} = 33,1 \text{ МПа};$$

$$n = \frac{H_H}{H_B} = \frac{105,45}{35,15} = 3;$$

$$W_{\text{кр}} = \frac{\pi}{16} \cdot n \cdot b_H^3 (1 - \alpha^4) = \frac{3,14}{16} \cdot 3 \cdot 9,515^3 (1 - 0,994^4) = 11,65 \text{ м}^3.$$

Тормозная балка предназначена для восприятия горизонтального изгибающего момента [11–13]. Здесь балка воспринимает горизонтальный изгибающий момент: проверка прочности сечения производится без учета тормозной балки. Имеем:

момент сопротивления крайней части сечения:

$$M = \frac{I_Y}{X_C} = \frac{233112}{35,15} = 6631,92 \text{ см}^3;$$

напряжение в надопорной части балки:

$$\sigma_n^{on} = \frac{M_{on}}{W_n} = \frac{4375100}{6631,9} = 156 \text{ МПа}.$$

Требуемый момент сопротивления балки из условия прочности на изгиб:

$$W_{\text{тр}} = \frac{M}{\gamma \cdot (R_y - 20)} = \frac{13177400}{0,9 \cdot (230 - 20)} = 697216,0 \text{ см}^3.$$

Далее рассматривается составное сечение из эллиптических профилей (рис.3) [14–16]. Ордината центра тяжести сечения относительно центра тяжести нижнего пояса балки

$$y_c = \frac{\sum S}{\sum A} = \frac{A_1 y_1 + A_2 y_2}{\sum A} =$$

$$= \frac{486,44 \cdot 82,95 + 618,39 \cdot (82,95 \cdot 2 + 105,45)}{486,44 + 618,36} = 188,75 \text{ см}.$$

Момент инерции сечения относительно оси, проходящей через центр тяжести сечения,

$$I_X = I_{X1} + A_1 a_1^2 + I_{X2} + A_2 a_2^2 = 2578811,3 + 618,39 \cdot 79,84^2 +$$

$$+ 1255303 + 486,44 \cdot 108,56^2 = 13508823,84 \text{ см}^4;$$

момент сопротивления нижнего пояса

$$W_{\text{ниж}} = \frac{I_x}{h_{\text{ниж}}} = \frac{13508823,84\ \text{см}^4}{191,51\ \text{см}} = 70538,5\ \text{см}^3 .$$

Напряжения на нижней грани балки

$$\sigma_{\text{Х.В}} = \frac{M}{W_{\text{МИН}}} = \frac{13177400}{70538,5} = 186,9\ \text{МПа} < R_{\text{у}} = 230\text{МПа} .$$

Момент сопротивления верхнего пояса

$$W_{\text{ВЕРХ}} = \frac{I_x}{h_{\text{верх}}} = \frac{13508823,84\ \text{см}^4}{185,29\ \text{см}} = 72906,4\ \text{см}^3 .$$

Напряжения на верхней грани балки

$$\sigma_{\text{Х.Н.}} = \frac{M}{W_{\text{МИН}}} = \frac{13177400}{72906,4} = 180,7\ \text{МПа} < R_{\text{у}} = 230\text{МПа} .$$

Выполним проверку прочности подкрановой балки при косом изгибе [17–20]. Наибольшие напряжения подкрановой балки при одновременном изгибе в вертикальной и горизонтальной плоскостях

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{M}{W_{\text{в}}} + \frac{M_{\text{т}}}{W_{\text{пр}}} = 186,9 + 39,23 = 226,13\ \text{МПа} \langle\ 230\ \text{МПа} .$$

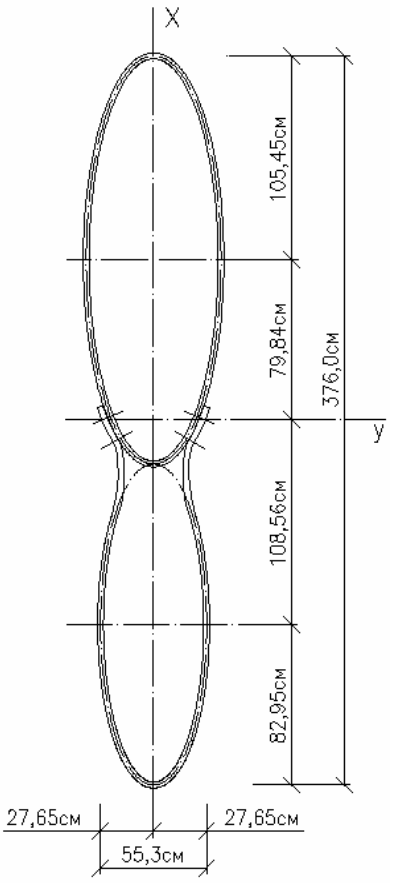


Рис. 3. Сечение подкрановой конструкции на опоре

Далее рассматривается подкрановая балка из V-образных двутавров (рис. 4). Аналогично определенные по ГОСТу 27772-88 значения: $R_у$ = 230 МПа; $R_{ср}$ = 0,58·$R_у$ = =133,4 МПа; γ = 0,9; E = 206000 МПа; $1/n_0$ = 1/600. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.

Рис. 4. Подкрановая балка из V-образных двутавров

Таблица 2

Данные для расчета подкрановой балки из V-образных двутавров

Обозначение	Размерность	Величина
Нормативный момент в пролете $M_{пр}$	гН·м	36943
Расчетный момент в пролете $M_{пр}$	гН·м	43751
Нормативный момент в пролете $M_{оп}$	гН·м	112940
Расчетный момент на опоре $M_{оп}$	гН·м	133754
$(R_у – 20)·γ$	МПа	189
Поперечная сила на опоре $Q_{оп}$	гН	44746
Поперечная сила в месте начала жесткой вставке Q	гН	16688
Момент в горизонтальной плоскости $M_Т$	гН·м	3860,6

Момент сопротивления балки из условия прочности на изгиб

$$W_{тр} = \frac{M}{\gamma \cdot (R_у - 20)} = \frac{4375100}{0.9 \cdot (230 - 20)} = 23148,8 \text{ см}^3.$$

Использован прокатный V-образный двутавр 140ЭП с указанными на рис.5 характеристиками: A=531,4 см^2, I_x=1888107 см^4, W_x=25862 см^3, I_y=193122 см^4, W_y=4558 см^3, $h_{ст}$=116,8 см, $t_{ст}$=16 мм, b=84,7 см, $t_{св}$=19 мм.

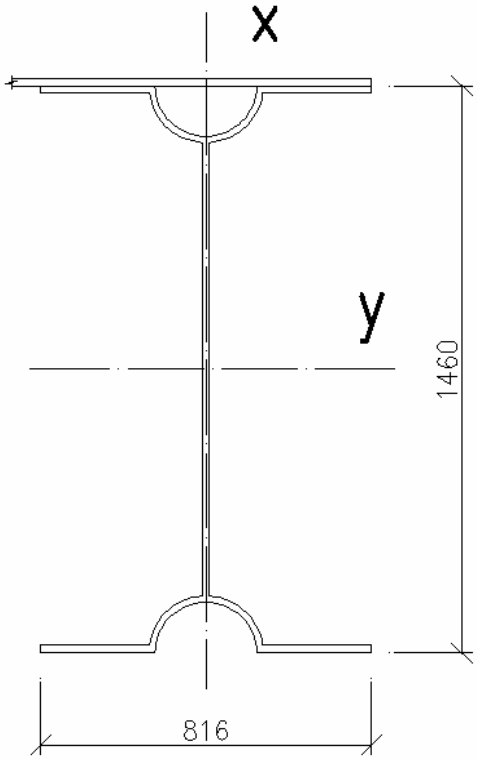


Рис. 5. Сечение балки в пролете

При проверке напряжений учитывается тормозная балка с толщиной 0,8 см. Ордината центра тяжести всего сечения относительно центра тяжести нижнего пояса балки

$$y_c = \frac{\sum S}{\sum A} = \frac{A_1 y_1 + A_2 y_2}{\sum A} = \frac{531,4 \cdot 73,0 + 65,28 \cdot 146,4}{65,28 + 531,4} = 81,0 \text{ см}.$$

$$I_X = I_{X1} + A_1 a_1^2 + I_{X2} + A_2 a_2^2 =$$

$$= 1888107 + 531,4 \cdot 10^2 + 3,48 + 65,28 \cdot 63,4^2 = 2203647,36 \text{ см}^4.$$

$$W_{\text{ниж}} = \frac{I_x}{h_{\text{ниж}}} = \frac{2203647,36 \text{ см}^4}{83,0 \text{ см}} = 26550,0 \text{ см}^3.$$

$$\sigma_X = \frac{M}{W_{\text{ниж}}} = \frac{4375100}{26550,4} = 164,8 \text{ МПа} < R_{\text{у}} = 230 \text{ МПа}.$$

Как видим, требуемая прочность обеспечивается. Требуемый момент сопротивления балки определяется из условия её прочности на изгиб:

$$W_{\text{тр}} = \frac{M}{\gamma \cdot (R_y - 20)} = \frac{13177400}{0,9 \cdot (230 - 20)} = 697216,0 \text{ см}^3.$$

Ордината центра тяжести всего сечения относительно центра тяжести нижнего пояса составной балки (рис. 6)

$$y_c = \frac{\sum S}{\sum A} = \frac{A_1 y_1 + A_2 y_2}{\sum A} = \frac{637,6 \cdot 80,0 + 531,4 \cdot 233 + 65,28 \cdot 303,4}{637,6 + 531,4 + 65,28} = 157,7 \text{см}.$$

Момент инерции сечения относительно оси, проходящей через центр тяжести сечения,

$$I_X = I_{X1} + A_1 a_1^2 + I_{X2} + A_2 a_2^2 + I_{X3} + A_3 a_3^2 = 2718874 + 637,6 \cdot 77,7^2 +$$

$$+ 1888107 + 531,4 \cdot 75,3^2 + 3,48 + 65,28 \cdot 148,7^2 = 12912897,5 \text{ см}^4.$$

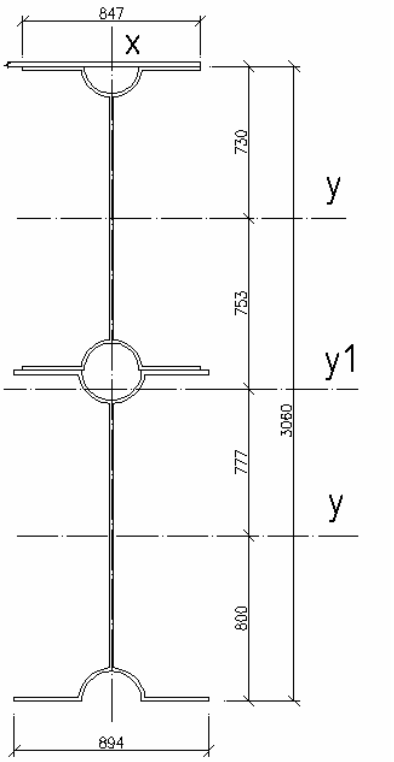


Рис. 6. Составная подкрановая балка

Момент сопротивления нижнего пояса

$$W_{\text{ниж}} = \frac{I_x}{h_{\text{ниж}}} = \frac{12912897,5\ \text{см}^4}{157,7\ \text{см}} = 81882,6\ \text{см}^3 .$$

Напряжения в пролете

$$\sigma_X = \frac{M}{W_{\text{ниж}}} = \frac{13177400}{81882,6} = 160,93\ \text{МПа} < R_{\text{у}} = 230\ \text{МПа} .$$

Как видим, прочность обеспечивается.

Предполагается, что тормозная балка состоит из верхнего пояса подкрановой балки, тормозного листа и внешнего пояса, выполненного из швеллера №30 (рис. 7).

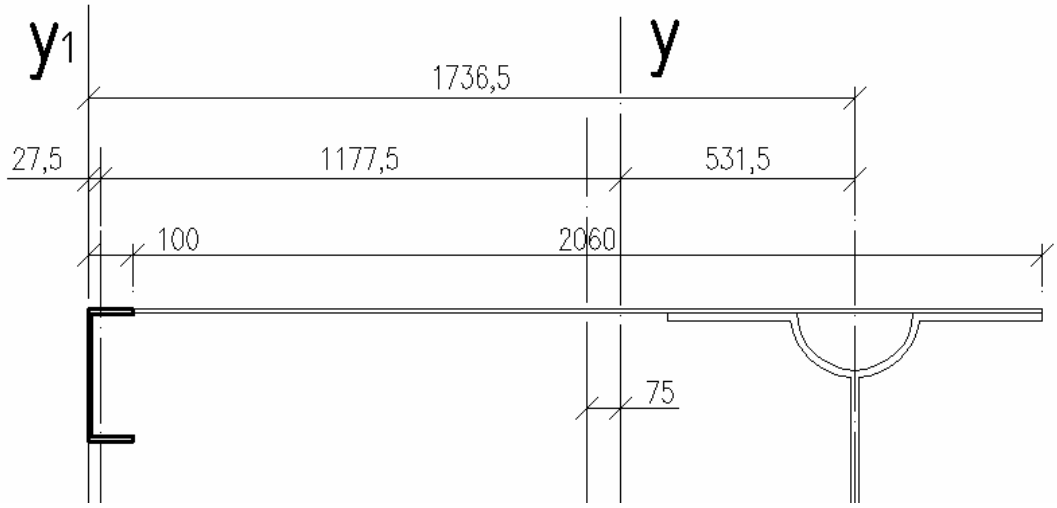


Рис. 7. Вид тормозной балки

Координата центра масс

$$X_c = \frac{\sum S}{\sum A} = \frac{A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3}{\sum A} =$$

$$= \frac{61,5 \cdot 2,75 + 164,8 \cdot 113 + 155,04 \cdot 175,3}{61,5 + 164,8 + 155,04} = 120,5 \text{ см.}$$

Момент инерции сечения

$$I_y = I_{y1} + A_1a_1^2 + I_{y2} + A_2a_2^2 + I_{y3} + A_3a_3^2 = 86028 + 155,04 \cdot 54,7^2 +$$

$$+8741816 + 164,8 \cdot 17,5^2 + 327 + 40,5 \cdot 117,75^2 = 1745041,0 \text{ см}^4.$$

Момент сопротивления левой части сечения

$$W_{Л} = \frac{I_y}{X_C} = \frac{1745041,0\ см^4}{120,5\ см} = 14481 \text{ см}^3.$$

Момент сопротивления правой части сечения

$$W_{ПР} = \frac{I_y}{B - X_C} = \frac{1745041,0\ см^4}{95,5\ см} = 18466 \text{ см}^3.$$

Напряжения с левой части балки

$$\sigma_{л} = \frac{M_T}{W_Л} = \frac{386000}{14481} = 26,65 \text{ МПа}.$$

Напряжения с правой части балки

$$\sigma_{ПР} = \frac{M_T}{W_{ПР}} = \frac{386000}{18466} = 20,9 \text{ МПа}.$$

Наибольшее напряжение при одновременном изгибе в вертикальной и горизонтальной плоскостях

$$\sigma = (\frac{M}{W_{в}} + \frac{M_{т}}{W_{пр}}) \langle R_y;$$

$$\sigma = (\frac{M}{W_{в}} + \frac{M_{т}}{W_{пр}}) = 160,93 + 26,65 = 187,58 \text{ МПа} \langle 230 \text{ МПа}.$$

И здесь прочность также обеспечивается.

Для повышения выносливости зоны балки около ребра она составляется из уголков, симметричных относительно стенки. По концам к уголкам приварены фланцы, посредством которых опорные ребра соединяются с верхним и нижним поясом. Ниже нейтральной оси балки уголки соединяются между собой фрикционными болтами через стенку.

Здесь требуемая площадь сечения опорного ребра определяется из условий его устойчивости:

$$A_P = \frac{Q}{\varphi \cdot R_y} = \frac{44746}{0,9 \cdot 230} = 216,2 \text{ см}$$

(4 уголка 200×16, A=248 см^2; 2 уголка 250×160×12 мм; $A_р$ = 48,3·2 = 96,6 см^2, $t_{ст}$ = 1,6; r_y= 8,77 см, $\lambda_y = h/r_y$ = 160/8,77 = 18,24, коэффициент продольного изгиба φ = 0,97).

Имеем:

$$\sigma = Q/A_р = 44746/248 = 180{,}42 < 0{,}97 \cdot 230 = 223{,}1 \text{ МПа}.$$

Требуемая устойчивость обеспечивается.

Наконец рассмотрим подкрановую балку из двутавровых сборных сечений (рис.8).

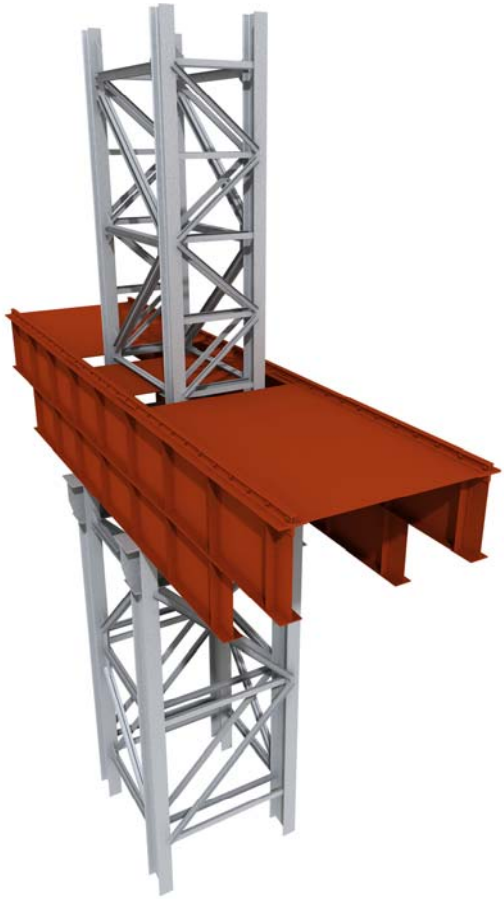


Рис. 8. Подкрановая балка из двутавровых сборных сечений

Балка изготавливается из стали (ВСт3 сп5) С255 ГОСТ 27772-88. Расчетные сопротивления: R_y = 230 МПа; $R_{ср} = 0{,}58 \cdot R_y$ = 133,4 МПа; γ = 0,9; E = 206000 МПа; $1/n_0 = 1/600$. Исходные данные приведены в табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные для расчета

Обозначение	Размерность	Величина
Нормативный момент в пролете $M_{пр}$	гН·м	36943
Расчетный момент в пролете $M_{пр}$	гН·м	43751
Нормативный момент в пролете $M_{оп}$	гН·м	112940
Расчетный момент на опоре $M_{оп}$	гН·м	131774
$(R_y - 20)\cdot\gamma$	МПа	189
Поперечная сила на опоре $Q_{оп}$	гН	44746
Поперечная сила в месте начала жесткой вставке Q	гН	16688
Момент в горизонтальной плоскости $M_Т$	гН·м	3860,6

Требуемый момент сопротивления балки из условия прочности её на изгиб

$$W_{тр} = \frac{M}{\gamma \cdot (R_y - 20)} = \frac{4375100}{0{,}9 \cdot (230 - 20)} = 23148{,}8 \text{ см}^3.$$

Минимальный момент инерции балки из условия её достаточной жёсткости (нагрузка нормативная) рассчитывается по формуле

$$I_{\min} = \frac{0{,}1 M_{н} l n_0}{E} = \frac{0{,}1 \cdot 3694300 \cdot 1800 \cdot 500}{206000} = 1614014{,}6 \text{ см}^4 .$$

Ориентировочная высота подкрановой балки:

$$h = \left[\frac{1}{7} \cdots \frac{1}{10}\right] \cdot l = \left[\frac{1}{7} \cdots \frac{1}{10}\right] \cdot 1600 = 230...160 \text{ см} .$$

Минимальная высота сечения балки

$$h_{мин} = \frac{2 \cdot I_{мин}}{W_{тр}} = \frac{2 \cdot 1614014}{23148{,}8} = 139{,}5 \text{ см} .$$

Минимальная площадь сечения стенки из условия прочности ее на срез

$$A_{ст} = \frac{1{,}5Q}{R_{ср}} = \frac{1{,}5 \cdot 16688}{133{,}4} = 187{,}7 \text{ см}^2 .$$

Определенная из условия прочности на срез толщина стенки

$$t_{ст} = \frac{A_{ст}}{h_{ст}} = \frac{187{,}7}{160} = 1{,}17 \text{см} ;$$

из условия гибкости –

$$t_{ст} = \sqrt[3]{\frac{1{,}5W_x}{130^2}} = \sqrt[3]{\frac{1.5 \cdot 23148{,}8}{140^2}} = 1{,}2 \text{ см.}$$

Толщина стенки принята $t_{ст} = 1{,}2$ см.

Имеем: $A = \sqrt{6Wt_{ст}} = \sqrt{6 \cdot 23148{,}8 \cdot 1{,}2} = 408{,}3$ см .

Оптимальная высота стенки балки при заданной толщине стенки 1,2 см составит

$$h_{опт} = \frac{0{,}5 \cdot \sum A}{t_{ст}} = \frac{0{,}5 \cdot 408{,}3}{1{,}2} = 170 \text{ см} .$$

Приняты следующие распределения площадей сечения $\sum A$ между поясами и стенкой: верхний пояс – 30 % от $\sum A$ $A_В = 122{,}5 \text{ см}^2$; стенка – 50 % от $\sum A$ $A_{ст} = 204{,}15 \text{ см}^2$; нижний пояс – 20 % от $\sum A$ $A_Н = 81{,}66 \text{ см}^2$ (табл. 4; рис. 9).

Таблица 4

Геометрические характеристики сечения

Элемент сечения	Площадь сечения, см^2	Момент инерции, см^4
Верхний пояс 2L250·160·20	$A_в$=123,4	$J_в$=3226
Стенка Лист 170×1,2	$A_{ст}$=204	$J_{ст}$=491300
Нижний пояс Лист 41×2,0	$A_н$=82	$J_н$=27,34
	$\sum A$=409,4см^2	

Справедливо:

$$y_c = \frac{\sum S}{\sum A} = \frac{A_1 y_1 + A_2 y_2 + A_3 y_3}{\sum A} =$$

$$= \frac{82{,}0 \cdot 1 + 204 \cdot 87 + 123{,}4 \cdot 168{,}15}{82{,}0 + 204 + 123{,}4} = 94{,}24 \text{ см.}$$

$$I_X = I_{X1} + A_1 a_1^2 + I_{X2} + A_2 a_2^2 = 3226 + 123,4 \cdot 73,91^2 +$$
$$+491300 + 204 \cdot 7,24^2 + 27,34 + 82 \cdot 93,24^2 = 1892225,5 \text{ см}^4.$$

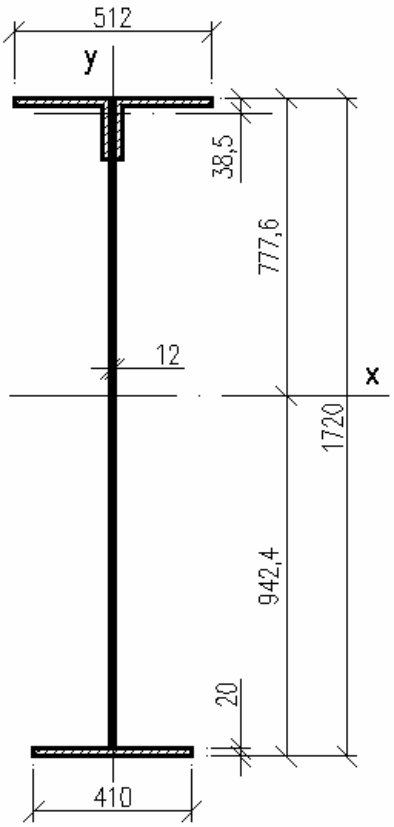


Рис. 9. Сечение в пролете

Момент сопротивления нижнего пояса

$$W_{\text{ниж}} = \frac{I_x}{h_{\text{ниж}}} = \frac{1892225,5 \text{ см}^4}{94,24 \text{ см}} = 20078,8 \text{ см}^3.$$

Напряжения на нижней грани балки

$$\sigma_{\text{Х.В}} = \frac{M}{W_{\text{МИН}}} = \frac{4375100}{20078,8} = 217,9 \text{ МПа} < R_{\text{у}} = 230\text{МПа}.$$

Момент сопротивления верхнего пояса

$$W_{\text{ВЕРХ}} = \frac{I_x}{h_{\text{верх}}} = \frac{1892225,5 \text{ см}^4}{77,76 \text{ см}} = 24334,2 \text{ см}^3.$$

Напряжения на верхней грани балки

$$\sigma_{\text{Х.В}} = \frac{M}{W_{\text{МИН}}} = \frac{4375100}{24334,2} = 179,8 \text{ МПа} < R_{\text{у}} = 230\text{МПа}.$$

Требуемый момент сопротивления балки из условия прочности на изгиб определяется как

$$W_{\text{тр}} = \frac{M}{\gamma \cdot (R_y - 20)} = \frac{13177400}{0,9 \cdot (230 - 20)} = 697216,0 \text{ см}^3.$$

Ордината центра тяжести всего сечения относительно центра тяжести нижнего пояса балки

$$Y_c = \frac{\sum S}{\sum A} = \frac{A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3 + A_4x_4 + A_5x_5}{\sum A} =$$

$$= \frac{82 \cdot 1 + 408 \cdot 104 + 164 \cdot 208 + 1,2 \cdot 170 \cdot 295 + 123.4 \cdot 376.13}{82 + 408 + 164 + 204 + 123,4} = 186,7 \text{ см}.$$

Момент инерции сечения

$$I_X = I_{X1} + A_1a_1^2 + I_{X2} + A_2a_2^2 + I_{X3} + A_3a_3^2 + I_{X4} + A_4a_4^2 + I_{X5} + A_5a_5^2 =$$

$$= 27,33 + 82 \cdot 185,7^2 + 1414944 + 408 \cdot 82,57^2 + 218,67 + 164 \cdot 21,3^2 +$$

$$+491300 + 204 \cdot 108,3^2 + 3226 + 123,4 \cdot 189,45^2 = 14423959,95 \text{ см}^4.$$

Напряжения на верхней части балки

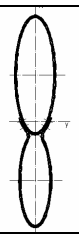
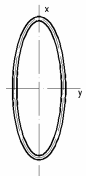
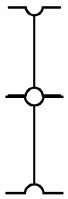
$$\sigma_{\text{ВЕРХ}} = \frac{M_{\text{ОП}}}{W_{\text{ВЕРХ}}} = \frac{13177400}{74619,56} = 176,60 \text{ МПа}.$$

Условия прочности выполняются.

На основе изложенного произведен сравнительный анализ трех видов подкрановых балок. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Итоговые данные

№	Варианты конструктивных решений подкрановых конструкций	Сечение подкрановой конструкции		Материалоемкость		Экономия металла, %
		на опоре	в пролете	Кг	%	
1	Подкрановая конструкция из эллиптического профиля			14475	75 %	25 %
2	Подкрановая конструкция из двутавров с лотками в поясах			16070	83 %	17 %
3	Подкрановая конструкция из листовой стали с верхним поясом из уголков			15295	79 %	21 %
Типовая сварная подкрановая конструкция (балка)				19360	100 %	–

ВЫВОДЫ

1. Предложены конструкции подкрановых балок с последующим их расчетом для различных профилей.
2. Произведен сравнительный анализ предложенных новых конструкций с типовой двутавровой подкрановой балкой.
3. Выявлено, что наиболее эффективными являются балки из эллиптических трубчатых профилей, далее следует составная двутавровая с верхним поясом из неравнополочных уголков, наконец – двутавровая балка с лотками в поясах.

Список литературы

1. Гарькин, И.Н. Теоретические исследования составных неразрезных подкрановых балок / И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 2 (35). – С. 100–104.
2. Клюев, С.В. Оптимальное проектирование конструкций с учетом устойчивости равновесия / С.В. Клюев, А.В. Клюев // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 9. – С. 62.
3. Туманов, В.А. Повышение выносливости стальных подкрановых балок / В.А. Туманов // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 1. – С. 75–82.
4. Нежданов, К.К. Решение проблемы обеспечения достаточной выносливости и ресурса интенсивно эксплуатирующихся подкрановых балок / К.К. Нежданов, А.А. Лаштанкин, Д.Х. Курткезов // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2013. – № 5. – С.41–47.
5. Сабуров, В.Ф. Использование моделей упругого основания для анализа распределения локальных напряжений в стенке стальных составных балок / В.Ф. Сабуров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 15–20.
6. Клюев, С.В. Оптимальное проектирование стержневых систем при силовых и температурных воздействиях с учетом безопасной устойчивости / С.В. Клюев, А.В. Клюев // Фундаментальные исследования. – 2009. – № 1. – С. 30–31.
7. Нежданов, К.К. Способ проката двутаврового профиля сечения из низколегированной стали / К.К. Нежданов, И.Н. Гарькин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – № 4 (237). – С. 51–54.
8. Клюев, С.В. Оптимальное проектирование стержневых конструкций / С.В. Клюев, А.В. Клюев // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2009. – № 3. – С. 31–36.
9. Клюев, С.В. Оптимальное проектирование стержневой пространственной конструкции / С.В. Клюев, А.В. Клюев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2007. – № 1 (7). – С. 17–22.
10. Garkina, I.A. Materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Selyaev // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 11. – P. 2461–2464.
11. Ерёмин, К.И. Обзор аварий и сооружений, произошедших в 2010 году / К.И. Ерёмин, Н.А. Шишкина // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сборник научных трудов. – Магнитогорск: ООО «Велд», 2011. – С.1–20.
12. Ведяков, И.И. Обследование конструкций зданий и сооружений завода ОАО «Тагмет» / И.И. Ведяков, М.И. Гукова, М.И. Фарфель, Д.В. Кондрашов, С.Н. Яровой // Строительная механика и расчет сооружений. – 2013. – № 1 (246). – С. 58–64.
13. Заика, А.М. Значимость проведения геодезических работ при проведении экспертизы промышленной безопасности объекты, на которых используются стационарно установленные грузоподъемные механизмы / А.М. Заика, Е.А. Мироненко, Е.А. Казанкова // Научный аспект. – 2015. – № 4–2. – С. 218–222.
14. Клюев, С.В. Оптимальное проектирование стержневых систем на основе энергетического критерия при силовых и температурных воздействиях с учетом

безопасной устойчивости / С.В. Клюев, А.В. Клюев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2009. – № 1. – С. 60–63.

15. Лобзов, В.Г. Комплексное обследование кранового пути. Цели и задачи / В.Г. Лобзов // Оригинальные исследования. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 72–75.

16. Хаметов, Т.И. Наблюдения за деформациями строительных конструкций, зданий и сооружений геодезическими методами / Т.И. Хаметов. – Пенза, 2018.

17. Куштин, В.И. Современные методы мониторинга деформаций зданий и сооружений / В.И. Куштин, А.А. Ревякин, В.А. Соколова, Н.Ф. Добрынин // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 11 (71). – С. 27–37.

18. Абовский, Н.П. Обеспечение живучести пространственных конструкций в условиях неопределенности внешних воздействий / Н.П. Абовский, Л.В. Енджиевский // Инновационные проблемы конструкций: безопасность, эффективность, управляемость, экологичность, творчество: юбилейное издание посвящённое 80-летию Н.П.Абовского / СФУ; МАНВШ РААСН. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 291 с.

19. Клюев, С.В. Управление проектными параметрами в задачах оптимального проектирования / С.В. Клюев, А.В. Клюев // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2010. – № 1. – С. 15–19.

20. Нежданов, К.К. Применение толстостенных двутавровых крановых рельсов / К.К. Нежданов, А.А. Кузьмишкин, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 3. – С. 79–84.

References

1. Garkin, I.N. Theoretical studies of composite continuous crane beams / I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 2 (35). – P. 100–104.

2. Klyuev, S.V. Optimal design of structures taking into account the stability of equilibrium / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev // Fundamental research. – 2008. – No. 9. – P. 62.

3. Tumanov, V.A. Increasing the endurance of steel crane beams / V.A. Tumanov // Regional architecture and engineering. – 2012. – No. 1. – P. 75–82.

4. Nezhdanov, K.K. Solving the problem of ensuring sufficient endurance and resource of intensively exploited crane beams / K.K. Nezhdanov, A.A. Lashtankin, D.Kh. Kurtkezov // Construction mechanics and calculation of structures. – 2013. – No. 5. – P. 41–47.

5. Saburov, V.F. Using elastic foundation models to analyze the distribution of local stresses in the wall of steel composite beams/ V.F. Saburov // Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and architecture. – 2014. – T. 14, № 4. – P. 15–20.

6. Klyuev, S.V. Optimal design of rod systems under force and temperature effects, taking into account safe stability / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev // Fundamental research. – 2009. – No. 1. – P. 30–31.

7. Nezhdanov, K.K. A method of rolling an I-section profile from low-alloy steel / K.K. Nezhdanov, I.N. Garkin // Construction mechanics and calculation of structures. – 2011. – No. 4 (237). – P. 51-54.

8. Klyuev, S.V. Optimal design of bar structures / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev // Construction mechanics of engineering structures and structures. – 2009. – No. 3. – P. 31–36.

9. Klyuev, S.V. Optimal design of a rod spatial structure / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev // Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2007. – No. 1 (7). – P. 17–22.

10. Garkina, I.A. Materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Selyaev // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 11. – P. 2461–2464.

11. Eremin, K.I. Overview of accidents and structures that occurred in 2010 / K.I. Eremin, N.A. Shishkina // Prevention of accidents in buildings and structures: a collection of scientific papers. – Magnitogorsk: Weld LLC, 2011. – P.1–20.

12. Vedyakov, I.I. Inspection of structures of buildings and structures of the plant JSC «Tagmet» / I.I. Vedyakov, M.I. Gukova, M.I. Farfel, D.V. Kondrashov, S.N. Yarovoy // Construction mechanics and calculation of structures. – 2013. – No. 1 (246). – P. 58–64.

13. Zaika, A.M. Significance of geodetic works during the examination of industrial safety of objects on which permanently installed load-lifting mechanisms are used / A.M. Zaika, E.A. Mironenko, E.A. Kazankova // Scientific aspect. – 2015. – No. 4–2. – P. 218–222.

14. Klyuev, S.V. Optimal design of rod systems based on the energy criterion under force and temperature effects, taking into account safe stability / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. – 2009. – No. 1. – P. 60–63.

15. Lobzov, V.G. Comprehensive inspection of the crane track. Goals and objectives / V.G. Lobzov // Original research. –2018. – Vol. 8, No. 2. – P. 72–75.

16. Khametov, T.I. Observation of deformations of building structures, buildings and structures by geodetic methods / T.I. Khametov. – Penza, 2018.

17. Kushtin, V.I. Modern methods of monitoring deformations of buildings and structures / V.I. Kushtin, A.A. Revyakin, V.A. Sokolova, N.F. Dobrynin // Engineering Bulletin of the Don. – 2020. – No. 11 (71). – P. 27–37.

18. Abovsky, N.P. Ensuring the survivability of spatial structures in conditions of uncertainty of external influences / N.P. Abovsky, L.V. Endzhievsky // Innovative problems of structures: safety, efficiency, controllability, environmental friendliness, creativity: anniversary edition dedicated to the 80th anniversary of N.P. Abovsky / SibFU; MANVSH RAASN. – Krasnoyarsk: IPK SFU, 2009. – 291 p.

19. Klyuev, S.V. Control of design parameters in optimal design problems / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev // Construction mechanics of engineering structures and structures. – 2010. – No. 1. – P. 15–19.

20. Nezhdanov, K.K. The use of thick-walled double-tee crane rails / K.K. Nezhdanov, A.A. Kuzmishkin, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering . – 2012. – No. 3. – P. 79–84.

УДК 539.3/.6 DOI 10.54734/20722958_2022_3_117

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

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

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

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

РАСЧЁТ ТОНКОГО НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОГО СТЕРЖНЯ

С.В. Бакушев

Рассматривается напряжённо-деформированное состояние физически и геометрически (в смысле В.В. Новожилова) нелинейного тонкого прямолинейного стержня. Нелинейные графики диаграмм объёмного и сдвигового деформирования аппроксимируются билинейными функциями. Решение строится в перемещениях. Разработан словесный алгоритм расчёта. Представленная в статье методика расчёта напряжённо-деформированного состояния нелинейно-упругого тонкого прямолинейного стержня, при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений физических соотношений, может найти применение при расчёте стержневых конструкций, математическая модель деформирования элементов которых описывается нелинейными зависимостями между инвариантами напряжённого и деформированного состояний.

Ключевые слова: тонкий прямолинейный стержень, физическая нелинейность, геометрическая нелинейность, алгоритм расчёта

THIN NONLINEAR ELASTIC ROD CALCULATION

S.V. Bakushev

Stress-strain state of a physically and geometrically (according to V.V. Novozhilov) nonlinear thin rectilinear rod is considered. Nonlinear graphs of volumetric and shear deformation diagrams are approximated by bilinear functions. The solution is done in displacements. A verbal calculation algorithm has been developed. Presented in this article a calculating method of the stress-strain state of a nonlinearly elastic thin rectilinear rod at bilinear approximation of closing equations of physical relations can be applied in the calculation of bar structures, mathematical model of elements deformation of which is described by nonlinear dependencies between the invariants of stressed and deformed states.

Keywords: thin rectilinear rod, physical nonlinearity, geometrical nonlinearity, calculation algorithm

Введение. Стержневые конструкции, элементы которых работают на осевое растяжение – сжатие, составляют значительную часть инженерных сооружений. Расчёт таких конструкций выполняется, как правило, по упругой стадии работы. Однако в нормах проектирования предписывается учитывать и пластическую составляющую деформации, то есть выполнять расчёт элементов строительных конструкций с учётом неупругой работы [1]. Вместе с тем в работе [2] «указывается на декларативность нормативных требований относительно обязательности выполнения нелинейных расчетов объектов строительства. Приводится перечень проблем, отсутствие решения которых мешает полноценному использованию нелинейного анализа в проектировании. Утверждается, что на настоящем этапе нелинейные расчеты можно рассматривать лишь как некоторый дополнительный инструмент, который используют в тех случаях, когда применение простых стандартных методов расчета сечений является недостаточным».

Расчёту стержней и стержневых конструкций с учётом нелинейной работы издавна уделялось значительное внимание [3, 4, 5]. В настоящее время интерес к расчёту стержневых конструкций с учётом их нелинейной работы не только не угасает, но и продолжает активно развиваться [6, 7]. Так, в работе [8] представлены уравнения квадратичного приближения для нелинейной теории стержней Коссера–Тимошенко. В статье [9] обсуждается влияние наличия на начальном участке диаграммы растяжения точки перегиба на сходимость процесса расчёта физически нелинейных стержневых систем. В работе [10] описывается метод расчёта физически нелинейных стержней при растяжении-сжатии; приводится алгоритм реализации данной задачи аналитическим и численным методом. В статье [11] предлагается при рассмотрении изгиба стержней из негуковского материала вводить некоторые функции, которые учитывают как размер и форму поперечного сечения, так и нелинейную диаграмму растяжения и роль которых аналогична изгибной жёсткости сечения линейно-деформируемого стержня.

Опишем процедуру расчёта тонкого прямолинейного стержня, выполненного из физически нелинейно-упругого материала и нагруженного силами, приложенными по его торцам. Расчёт будем строить как с учётом, так и без учёта геометрической нелинейности (по В.В. Новожилову).

Физически нелинейная, но геометрически линейная модель. Стержень будет находиться в условиях одноосного обобщённого напряжённого состояния:

$$\sigma_{xx} \neq 0; \sigma_{yy} = 0; \sigma_{zz} = 0; \sigma_{xy} = 0; \sigma_{yz} = 0; \sigma_{zx} = 0. \tag{1}$$

При этом физические уравнения будут иметь вид:

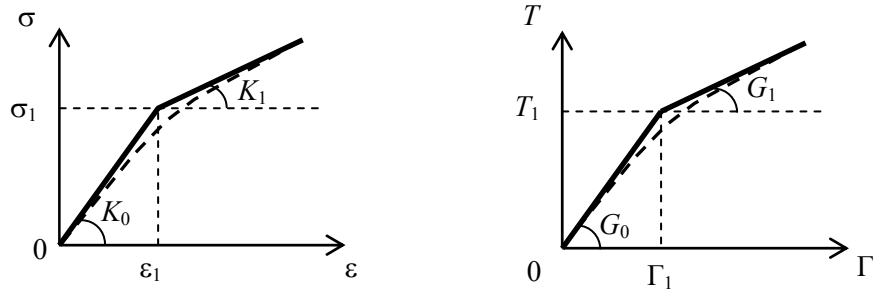
$$\left.\begin{aligned} \sigma_{xx} - \frac{1}{3}\sigma &= 2G\left(\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon\right); \\ -\frac{1}{3}\sigma &= 2G\left(\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon\right); \\ -\frac{1}{3}\sigma &= 2G\left(\varepsilon_{zz} - \frac{1}{3}\varepsilon\right). \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Здесь $\sigma = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$; $\varepsilon = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$. (3)

Замыкающие уравнения

$$\sigma = 3K\varepsilon \text{ и } T = G\Gamma \tag{4}$$

описывают кривые объёмного и сдвигового деформирования соответственно (на рисунке это пунктирные линии). Здесь K – переменный секущий модуль объёмного деформирования; G – переменный секущий модуль сдвигового деформирования; σ – первый инвариант тензора напряжений; ε – первый инвариант тензора деформаций; T – интенсивность касательных напряжений; Γ – интенсивность деформаций сдвига.



Диаграммы объёмного $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ и сдвигового $T = T(\Gamma)$ деформирования

Используя методику, описанную в работах [12, 13], аппроксимируем кривые объёмного $\sigma = 3K\varepsilon$ и сдвигового $T = G\Gamma$ деформирования билинейными функциями (аппроксимирующие прямые на рисунке – это сплошные линии).

На рисунке обозначено: K_0 – начальный модуль объёмного расширения (сжатия); G_0 – начальный модуль сдвига; K_1 – модуль упрочнения при объёмном расширении (сжатии); G_1 – модуль упрочнения при сдвиге; σ_1, ε_1 – координаты точки излома графика билинейной диаграммы объёмного деформирования; T_1, Γ_1 – координаты точки излома графика билинейной диаграммы сдвигового деформирования; σ – первый инвариант тензора напряжений; ε – первый инвариант тензора деформаций; T – интенсивность касательных напряжений; Γ – интенсивность деформаций сдвига.

Как следует из рисунка, на первом прямолинейном участке диаграмм объёмного и сдвигового деформирования

$$\sigma = K_0\varepsilon\,;\; T = G_0\varepsilon\,. \tag{5}$$

Принимая во внимание формулы (4), получаем выражения для модулей объёмного расширения (сжатия) и сдвига на первом прямолинейном участке:

$$K^I = \frac{1}{3}K_0; G^I = G_0\,. \tag{6}$$

На втором прямолинейном участке диаграмм объёмного и сдвигового деформирования

$$\sigma - \sigma_1 = K_1\left(\varepsilon - \varepsilon_1\right);\; T - T_1 = G_1\left(\Gamma - \Gamma_1\right). \tag{7}$$

Выразим в формулах (7_1) и (7_2) деформации через напряжения:

$$\varepsilon = \frac{1}{K_1}\left(1 - \frac{\sigma_1}{\sigma} + \frac{K_1\varepsilon_1}{\sigma}\right)\sigma\,;\; \Gamma = \frac{1}{G_1}\left(1 - \frac{T_1}{T} + \frac{G_1\Gamma_1}{T}\right)T\,. \tag{8}$$

Учитывая формулы (4), получаем выражения для модулей объёмного расширения (сжатия) и сдвига на втором прямолинейном участке:

$$K^{II} = \frac{\sigma K_1}{3\left(\sigma - \sigma_1 + \varepsilon_1 K_1\right)}; G^{II} = \frac{TG_1}{T - T_1 + \Gamma_1 G_1}\,. \tag{9}$$

Используя уравнение (2_1), выразим напряжение в стержне через продольную относительную деформацию:

$$\sigma_{xx} = \frac{9KG}{3K + G}\varepsilon_{xx}\,. \tag{10}$$

В соответствии с диаграммами объёмного и сдвигового деформирования, напряжения и деформации в стержне возможны для следующих четырёх случаев значений модулей объёмного расширения (сжатия) и сдвига:

Случай I: $K = K^I; G = G^I$.

При этом напряжение в стержне будет связано с продольной деформацией соотношением

$$\sigma_{xx} = \frac{3K_0G_0}{K_0 + G_0}\varepsilon_{xx}\,. \tag{11}$$

Дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня в перемещениях без учёта объёмных сил будет иметь вид:

$$\frac{3K_0G_0}{K_0 + G_0}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0\,. \tag{12}$$

Случай II: $K = K^{II}; G = G^{I}$.

При этом

$$\sigma_{xx} = \frac{3K_1G_0}{K_1+G_0}\varepsilon_{xx} - \frac{G_0\left(\varepsilon_1K_1-\sigma_1\right)}{K_1+G_0}. \tag{13}$$

Дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня в перемещениях без учёта объёмных сил будет иметь вид:

$$\frac{3K_1G_0}{K_1+G_0}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0. \tag{14}$$

Случай III: $K = K^{I}; G = G^{II}$.

При этом, учитывая, что в нашем случае $T = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_{xx}$, получаем:

$$\sigma_{xx} = \frac{3K_0G_1}{K_0+G_1}\varepsilon_{xx} - \frac{\sqrt{3}K_0\left(G_1\Gamma_1-T_1\right)}{K_0+G_1}. \tag{15}$$

Дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня в перемещениях без учёта объёмных сил будет иметь вид:

$$\frac{3K_0G_1}{K_0+G_1}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0. \tag{16}$$

Случай IV: $K = K^{II}; G = G^{II}$.

При этом

$$\sigma_{xx} = \frac{3K_1G_1}{K_1+G_1}\varepsilon_{xx} - \frac{\sqrt{3}K_1\left(G_1\Gamma_1-T_1\right)}{K_1+G_1} - \frac{G_1\left(K_1\varepsilon_1-\sigma_1\right)}{K_1+G_1}. \tag{17}$$

Дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня в перемещениях без учёта объёмных сил будет иметь вид:

$$\frac{3K_1G_1}{K_1+G_1}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0. \tag{18}$$

Геометрически и физически нелинейная модель. Тонкий прямолинейный геометрически и физически нелинейный стержень будет находиться в условиях одноосного обобщённого напряжённого состояния, если

$$\sigma^*_{xx} \neq 0; \sigma^*_{yy} = 0; \sigma^*_{zz} = 0; \sigma^*_{xy} = 0; \sigma^*_{yz} = 0; \sigma^*_{zx} = 0. \tag{19}$$

Физические уравнения при этом будут иметь вид [13, 14]:

$$\left.\begin{aligned} \sigma^*_{xx} - \frac{1}{3}\sigma^* &= 2G^*\left(\varepsilon^*_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right); \\ -\frac{1}{3}\sigma^* &= 2G^*\left(\varepsilon^*_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right); \\ -\frac{1}{3}\sigma^* &= 2G^*\left(\varepsilon^*_{zz} - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right). \end{aligned}\right\} \tag{20}$$

Здесь $$\sigma^* = \sigma^*_{xx} + \sigma^*_{yy} + \sigma^*_{zz};\ \varepsilon^* = \varepsilon^*_{xx} + \varepsilon^*_{yy} + \varepsilon^*_{zz}, \quad (21)$$

причём $\sigma^*_{xx}, \sigma^*_{yy}, \sigma^*_{zz}$ – обобщённые напряжения; $\varepsilon^*_{xx}, \varepsilon^*_{yy}, \varepsilon^*_{zz}$ – нелинейные деформации.

Замыкающие уравнения

$$\sigma^* = 3K^*\varepsilon^* \text{ и } T^* = G^*\Gamma^* \quad (22)$$

описывают кривые объёмного и сдвигового деформирования соответственно. Ранее приведенный рисунок будет соответствовать соотношениям (22), если у всех величин на рисунке проставить звёздочки. Таким образом, K^* – геометрически нелинейный аналог переменного секущего модуля объёмного деформирования; G^* – геометрически нелинейный аналог переменного секущего модуля сдвигового деформирования; σ^* – первый инвариант тензора обобщённых напряжений; ε^* – первый инвариант тензора нелинейных деформаций; T^* – интенсивность обобщённых касательных напряжений; Γ^* – интенсивность нелинейных деформаций сдвига.

Аппроксимируя кривые объёмного $\sigma^* = 3K^*\varepsilon^*$ и сдвигового $T^* = G^*\Gamma^*$ деформирования билинейными функциями, получаем на первом прямолинейном участке диаграмм объёмного и сдвигового деформирования

$$\sigma^* = K^*_0\varepsilon^*;\ T^* = G^*_0\varepsilon^*. \quad (23)$$

На втором прямолинейном участке диаграмм объёмного и сдвигового деформирования

$$\sigma^* - \sigma^*_1 = K^*_1\left(\varepsilon^* - \varepsilon^*_1\right);\ T^* - T^*_1 = G^*_1\left(\Gamma^* - \Gamma^*_1\right). \quad (24)$$

Здесь K^*_0 – геометрически нелинейный аналог начального модуля объёмного сширения (сжатия); G^*_0 – геометрически нелинейный аналог начального модуля сдвига; K^*_1 – геометрически нелинейный аналог модуля упрочнения при объёмном расширении (сжатии); G^*_1 – геометрически нелинейный аналог модуля упрочнения при сдвиге; σ^*_1, ε^*_1 – координаты точки излома кривой на диаграмме объёмного деформирования; T^*_1, Γ^*_1 – координаты точки излома кривой на диаграмме сдвигового деформирования.

Таким образом, на первом прямолинейном участке выражения для модулей объёмного расширения (сжатия) и сдвига имеют вид:

$$K^{*I} = \frac{1}{3}K^*_0; G^{*I} = G^*_0. \quad (25)$$

На втором прямолинейном участке

$$K^{*II} = \frac{\sigma^* K^*_1}{3\left(\sigma^* - \sigma^*_1 + \varepsilon^*_1 K^*_1\right)}; G^{*II} = \frac{T^* G^*_1}{T^* - T^*_1 + \Gamma^*_1 G^*_1}. \quad (26)$$

Связь между обобщённым напряжением σ^*_{xx} и нелинейной деформацией ε^*_{xx}, как это следует из соотношения (20_1), будет описываться зависимостью

$$\sigma^*_{xx} = \frac{9K^*G^*}{3K^* + G^*}\varepsilon^*_{xx}. \quad (27)$$

Здесь [3] $\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\right]$. .

Учитывая малость рассматриваемых перемещений, пренебрегаем квадратами производных от поперечных перемещений по сравнению с квадратом производной от продольного перемещения точек стержня. То есть принимаем $\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2$.

Уравнения равновесия при учёте геометрической нелинейности сводятся к одному уравнению [9]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)\sigma^*_{xx}\right] + F^*_\xi = 0. \tag{28}$$

Как и для геометрически линейной модели, при использовании геометрически нелинейной модели напряжения и деформации в стержне возможны для следующих четырёх случаев значений обобщённых модулей объёмного расширения (сжатия) и сдвига:

Случай I: $K^* = K^{*I}$; $G^* = G^{*I}$.

При этом напряжение в стержне будет связано с деформацией соотношением

$$\sigma^*_{xx} = \frac{3K^*_0 G^*_0}{K^*_0 + G^*_0}\varepsilon^*_{xx}. \tag{29}$$

Дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня в перемещениях без учёта объёмных сил будет иметь вид:

$$\frac{3K^*_0 G^*_0}{K^*_0 + G^*_0}\left\{\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\right] + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\right\}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0. \tag{30}$$

Случай II: $K^* = K^{*II}; G^* = G^{*I}$.

При этом

$$\sigma^*_{xx} = \frac{3K^*_1 G^*_0}{K^*_1 + G^*_0}\varepsilon^*_{xx} - \frac{G^*_0\left(\varepsilon^*_1 K^*_1 - \sigma^*_1\right)}{K^*_1 + G^*_0}. \tag{31}$$

Дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня в перемещениях будет иметь вид:

$$\left\{\frac{3K^*_1 G^*_0}{K^*_1 + G^*_0}\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\right] - \frac{G^*_0\left(\varepsilon^*_1 K^*_1 - \sigma^*_1\right)}{K^*_1 + G^*_0} + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \frac{3K^*_1 G^*_0}{K^*_1 + G^*_0}\right\}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0. \tag{32}$$

Случай III: $K^* = K^{*I}; G^* = G^{*II}$.

При этом, учитывая, что в нашем случае $T^* = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma^*_{xx}$, получаем:

$$\sigma^*_{xx} = \frac{3K^*_0 G^*_1}{K^*_0 + G^*_1}\varepsilon^*_{xx} - \sqrt{3}\frac{K^*_0\left(G^*_1 \Gamma^*_1 - T^*_1\right)}{K^*_0 + G^*_1}. \tag{33}$$

Дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня в перемещениях без учёта объёмных сил будет иметь вид:

$$\left\{\frac{3K^*_0 G^*_1}{K^*_0 + G^*_1}\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\right] - \sqrt{3}\frac{K^*_0\left(G^*_1 \Gamma^*_1 - T^*_1\right)}{K^*_0 + G^*_1} + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \frac{3K^*_0 G^*_1}{K^*_0 + G^*_1}\right\}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0. \tag{34}$$

Случай IV: $K^* = K^{*II}; G^* = G^{*II}$.

При этом

$$\sigma_{xx}^* = \frac{3K_1^* G_1^*}{K_1^* + G_1^*}\varepsilon_{xx}^* - \sqrt{3}\frac{K_1^*\left(G_1^*\Gamma_1^* - T_1^*\right)}{K_1^* + G_1^*} - \frac{G_1^*\left(K_1^*\varepsilon_1^* - \sigma_1^*\right)}{K_1^* + G_1^*}. \quad (35)$$

Дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня в перемещениях без учёта объёмных сил будет иметь вид:

$$\left\{\frac{3K_1^* G_1^*}{K_1^* + G_1^*}\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\right] - \sqrt{3}\frac{K_1^*\left(G_1^*\Gamma_1^* - T_1^*\right)}{K_1^* + G_1^*} - \right.$$
$$\left. - \frac{G_1^*\left(K_1^*\varepsilon_1^* - \sigma_1^*\right)}{K_1^* + G_1^*} + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \frac{3K_1^* G_1^*}{K_1^* + G_1^*}\right\}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0. \quad (36)$$

Алгоритм расчёта тонкого нелинейно-упругого стержня. При формулировке алгоритма определения напряжённо-деформированного состояния тонкого нелинейно-упругого стержня, нагруженного торцевыми силами, будем ориентироваться на геометрически линейную модель.

1. Принимаем $K = K^I; G = G^I$.
2. Решая уравнение (12), находим перемещение в стержне: $u = c_1 x + c_2$, затем продольную деформацию: $\varepsilon_{xx} = c_1 = \text{const}$.
3. По формуле (11) определяем напряжение σ_{xx}.
4. Далее вычисляем первый инвариант тензора напряжений $\sigma = \sigma_{xx}$ и интенсивность касательных напряжений $T = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_{xx}$.
5. Проверяем выполнение условий:

a) $\sigma \le \sigma_1;\ T \le T_1$, то есть $K = K^I; G = G^I$.

b) $\sigma \le \sigma_1;\ T \ge T_1$, то есть $K = K^{II}; G = G^I$.

c) $\sigma \ge \sigma_1;\ T \le T_1$, то есть $K = K^I; G = G^{II}$.

d) $\sigma \ge \sigma_1;\ T \ge T_1$, то есть $K = K^{II}; G = G^{II}$.

6. Если выполняется условие «a», то есть напряжение в стержне соответствует случаю I, то по диаграмме объёмных деформаций для известного напряжения σ находим деформацию ε. Из уравнений (2_2) и (2_3) вычисляем поперечные деформации ε_{yy} и ε_{zz}. Зная поперечные деформации, путём интегрирования определяем поперечные перемещения v и w. Расчёт закончен.
7. Если условие «a» не выполняется, а выполняется, например, условие «b», то есть напряжение в стержне должно соответствовать случаю II, то по формуле (13) вычисляем напряжение σ_{xx}, затем первый инвариант тензора напряжений $\sigma = \sigma_{xx}$ и интенсивность касательных напряжений $T = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_{xx}$.
8. Проверяем выполнение условий пункта 5.
9. Если условие «b» выполняется, то есть напряжение в стержне соответствует случаю II, то по диаграмме объёмных деформаций для известного напряжения σ находим деформацию ε. Из уравнений (2_2) и (2_3) вычисляем поперечные деформации ε_{yy} и ε_{zz}. Зная поперечные деформации, путём интегрирования определяем поперечные перемещения v и w. Расчёт закончен.

10. Если условие «b» не выполняется, а выполняется, например, условие «c», то есть напряжение в стержне должно соответствовать случаю III, то по формуле (15) вычисляем напряжение σ_{xx}, затем первый инвариант тензора напряжений $\sigma = \sigma_{xx}$ и интенсивность касательных напряжений $T = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_{xx}$.

11. Проверяем выполнение условий пункта 5.

12. Если условие «c» выполняется, то есть напряжение в стержне соответствует случаю III, то по диаграмме объёмных деформаций для известного напряжения σ находим деформацию ε. Из уравнений (2_2) и (2_3) вычисляем поперечные деформации ε_{yy} и ε_{zz}. Зная поперечные деформации, путём интегрирования определяем поперечные перемещения v и w. Расчёт закончен.

13. Если условие «c» не выполняется, а выполняется, например, условие «d», то есть напряжение в стержне должно соответствовать случаю IV, то по формуле (17) вычисляем напряжение σ_{xx}, затем первый инвариант тензора напряжений $\sigma = \sigma_{xx}$ и интенсивность касательных напряжений $T = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_{xx}$.

14. Проверяем выполнение условий пункта 5.

15. Если условие «d» выполняется, то есть напряжение в стержне соответствует случаю IV, то по диаграмме объёмных деформаций для известного напряжения σ находим деформацию ε. Из уравнений (2_2) и (2_3) вычисляем поперечные деформации ε_{yy} и ε_{zz}. Зная поперечные деформации, путём интегрирования определяем поперечные перемещения v и w. Расчёт закончен.

16. Чтобы убедиться в правильности расчёта, проверяем выполнение уравнения (2_1).

Сформулированный алгоритм без существенных изменений, за исключением ссылок на номера формул, применим и для геометрически нелинейной модели.

Следует отметить, что данный алгоритм можно использовать и при решении задачи расчёта тонкого нелинейно-упругого стержня в напряжениях, если материал стержня описывается геометрически линейной моделью.

Заключение и выводы. Представленная в статье методика расчёта напряжённо-деформированного состояния нелинейно-упругого тонкого прямолинейного стержня, при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений физических соотношений, может найти применение при расчёте стержневых конструкций, математическая модель деформирования элементов которых описывается нелинейными зависимостями между инвариантами напряжённого и деформированного состояний.

Список литературы

1. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – М., 2017.

2. Перельмутер, А.В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании? / А.В. Перельмутер, В.В. Тур // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. – 2017. – Т. 13, № 3. – С. 86–102.

3. Стриклин, Дж. Оценка методов решения задач строительной механики, нелинейность которых связана со свойствами материала и/или геометрией / Дж. Стриклин, В. Хайслер // Ракетная техника и космонавтика. – 1973. – №3. – С. 46–56.

4. Лукаш, П.А. Основы нелинейной строительной механики / П.А. Лукаш. – М.: Стройиздат, 1978. – 204 с.

5. Харланов, В.Л. Метод расчета металлических стержневых систем в упругопластической стадии / В.Л. Харланов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2004. – № 2 (542). – С. 27–32.

6. Игнатьев, В.А. Нелинейная строительная механика стержневых систем. Электрон. изд. сетевого доступа / В.А. Игнатьев, А.В. Игнатьев, В.В. Галишникова, Е.В. Онищенко. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2014. – 97 с. – EDN: YKXRTB

7. Петров, В.В. Нелинейная инкрементальная строительная механика / В.В. Петров. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 480 с. – EDN: SFTTJV

8. Лалин, В.В. Квадратичное приближение в нелинейной теории стержней / В.В. Лалин, Е.А. Мякшикова // AlfaBuild. – 2018. – № 3 (5). – С. 20–32.

9. Киселев, В.Е. Анализ упругогеометрической характеристики сечения стержня из негуковского материала / В.Е. Киселев // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. – 2017. – Т. 3. – С. 238–242.

10. Иванов, С.П. О расчёте физически нелинейных стержней / С.П. Иванов, А.С. Иванова // Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: Технологическая. – 2015. – № 3. – С. 126–130.

11. Киселев, В.Е. Жёсткость сечения стержня из нелинейно-упругого материала / В.Е. Киселев // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – 2020. – Т. 1, № 1. – С. 45–48.

12. Бакушев, С.В. Аппроксимация диаграмм деформирования билинейными функциями / С.В. Бакушев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2019. – №2 (283). – С.2–11.

13. Бакушев, С.В. Дифференциальные уравнения и краевые задачи механики деформируемого твёрдого тела: моногр. / С.В. Бакушев. – М.: ЛЕНАНД, 2020 – 304 с.

14. Новожилов, В.В. Теория упругости / В.В. Новожилов. – М.: Судпромгиз, 1958. – 370 с.

References

1. SP 16.13330.2017. Steel structures. Updated edition of SNiP II-23-81*. – M., 2017.

2. Perelmuter, A.V. Whether we are ready to proceed to a nonlinear analysis at designing? / A.V. Perelmuter, V.V. Tur // International journal for the calculation of civil and building structures. – 2017. – Vol. 13, No. 3. – P. 86–102.

3. Stricklin, J. Evaluation of methods for solving problems of structural mechanics, the nonlinearity of which is associated with material properties and/or geometry / J. Stricklin, V. Heisler // Rocket technology and astronautics. – 1973. – No. 3. – P. 46–56.

4. Lukash, P.A. Fundamentals of non-linear structural mechanics/ P.A. Lukash. – M.: Stroyizdat, 1978. – 204 p.

5. Kharlanov, V.L. Calculation method for metal rod systems in the elastoplastic stage / V.L. Kharlanov // News of higher educational institutions. Construction. – 2004. – No. 2 (542). – P. 27–32.

6. Ignatiev, V.A. Nonlinear Structural Mechanics of Rod Systems. Electron. ed. network access / V.A. Ignatiev, A.V. Ignatiev, V.V. Galishnikova, E.V. Onishchenko. – Volgograd: VolgGASU, 2014. – 97 p. – EDN: YKXRTB.

7. Petrov, V.V. Nonlinear incremental structural mechanics / V.V. Petrov. – M.: Infra-Engineering, 2014. – 480 p. – EDN: SFTTJV.

8. Lalin, V.V. The quadratic approximation in nonlinear theory of rods / V.V. Lalin, E.A. Myakshikova // AlfaBuild. – 2018. – № 3 (5). – P. 20–32.

9. Kiselev, V.E. The analysis of elastic-geometrical characteristics of section of the core from non-hookean material / V.E. Kiselev // New ideas of the new century: materials of the international scientific conference FAD PNU. – 2017. – Vol. 3. – P. 238–242.

10. Ivanov, S.P. The analysis of physically nonlinear beam / S.P. Ivanov, A.S. Ivanova // Proceedings of the Volga State Technological University. Series: Technological. – 2015. – № 3. – P. 126–130.

11. Kiselev, V.E. Rigidity of section of a rod of nonlino elastic material / V.E. Kiselev // Far East: problems of development of the architectural and construction complex. – 2020. – Vol. 1, № 1. – P. 45–48.

12. Bakushev, S.V. Approximations of warp diagrams using bilinear functions / S.V. Bakushev // Structure mechanics and analysis of constructions. – 2019. – N 2 (283). – P. 2–11.

13. Bakushev, S.V. Differential equations and boundary problems in the mechanics of a deformable solid / S.V. Bakushev. – M.: LENAND Publ.; 2020. – 304 p.

14. Novozhilov, V.V. The theory of elasticity / V.V. Novozhilov.– M.: Sudpromgiz, 1958. – 370 p.

УДК 624.012 DOI 10.54734/20722958_2022_3_126

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
E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

Толушов Сергей Александрович,
кандидат технических наук, доцент
E-mail: stolushov@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

Snezhkina Olga Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

Tolushov Sergey Aleksandrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
E-mail: stolushov@mail.ru

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ БАЛКИ В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ

О.В. Снежкина, С.А. Толушов

Смоделирована работа железобетонной балки с относительным пролетом среза от 1 до 3 в виде распорной системы с горизонтальным растянутым поясом, представленным продольной арматурой, и аркой криволинейного очертания, представленной сжатой бетонной полосой. Определены внутренние силовые факторы в поперечных сечениях расчетной модели, выявлены оптимальные схемы нагружения.

Ключевые слова: железобетонные балки, относительный пролет среза, прочность, физическое моделирование, трехшарнирная арка с затяжкой

REINFORCED CONCRETE BEAMS IN THE AREA OF TRANSVERSAL FORCES ACTION

O.V. Snezhkina, S.A. Tolushov

The work of a reinforced concrete beam with a relative shear span from 1 to 3 in the form of a spacer system with a horizontal stretched belt, represented by longitudinal reinforcement and a curvilinear arch, represented by a compressed concrete strip, is presented. The internal force factors in the cross sections of the calculation model are determined, the optimal loading schemes are identified.

Keywords: reinforced concrete beams, relative shear span, strength, physical modeling, three-hinged arch with tightening

На современном этапе развития теории железобетона невозможно выделить универсальную методику расчета железобетонных конструкций по наклонным сечениям. Методы расчета железобетонных конструкций на действие поперечных сил, представленные в наиболее значимых нормативных документах (СП, EN, ACI), существенно отличаются друг от друга, содержат различные эмпирические зависимости, а в ряде случаев не обеспечивают заданного уровня надежности [1–3]. И если применяемая в настоящее время деформационная модель для расчета прочности железобетонных конструкций по нормальным сечениям на действие изгибающих моментов и продольных сил разработана и принята для практического использования, то расчет по наклонным сечениям требует уточнения [4–8]. При проектировании железобетонных балок согласно действующему в Российской Федерации своду правил рекомендуется использовать две методики расчета. Расчет прочности коротких балок (с малым относительным пролетом среза $a/h_0<1$) рекомендуется производить на основе каркасно-стержневой модели, состоящей из сжатых прямолинейных наклонных полос бетона и растянутого арматурного пояса [9–10]. Однако расчет коротких балок на основе каркасно-стержневой модели ограничен условными границами относительного пролета среза $a/h_0<1$. Оценка прочности обычных балок (границы a/h_0 не установлены) производится на основе традиционного нормативного подхода по наклонному (наибо-

лее опасному) и нормальному сечениям. Причем расчет прочности изгибаемых элементов по наклонным сечениям ведется раздельно на действие поперечных сил и изгибающих моментов, хотя известно, что разрушение по наклонным сечениям является следствием совместного действия этих усилий и показывает существенные расхождения с экспериментальными данными при оценке прочности наклонного сечения. Наиболее заметны расхождения между опытными и расчетными величинами в балках с относительным пролетом среза $a/h_0<3$ [11–12].

Является очевидным, что необходима методика расчета, позволяющая гармонизировать действующие методы оценки прочности (СП 63.13330.2018) изгибаемых железобетонных элементов с относительным пролетом среза до 1 и более 3, обеспечивающая единый подход к оценке прочности и трещиностойкости, учитывающая совместное действие поперечных сил и моментов в наклонном сечении. Методологические основы анализа и синтеза сложных многокритериальных систем достаточно полно рассмотрены в [13–15].

Таким образом, необходимо искать качественно новые альтернативные подходы к решению данной задачи, позволяющие разработать универсальную методику расчета строительных конструкций по наклонным и нормальным сечениям на основе методов строительной механики при оценке прочности и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов.

Рассматривается возможность представления работы железобетонной балки с относительным пролетом среза от 1 до 3 в виде трехшарнирной арки криволинейного очертания с затяжкой, которая представляет собой статически определимую систему. Трехшарнирная арка имеет два шарнира, расположенных непосредственно на опорах на уровне продольной арматуры, с помощью третьего шарнира связываются между собой две полуарки, опирающиеся шарнирно на опоры. Таким образом, работа железобетонной балки с пролетом среза от 1 до 3 моделируется как распорная система с горизонтальным растянутым поясом, представленным продольной арматурой, и сжатой бетонной аркой криволинейного очертания (рис.1).

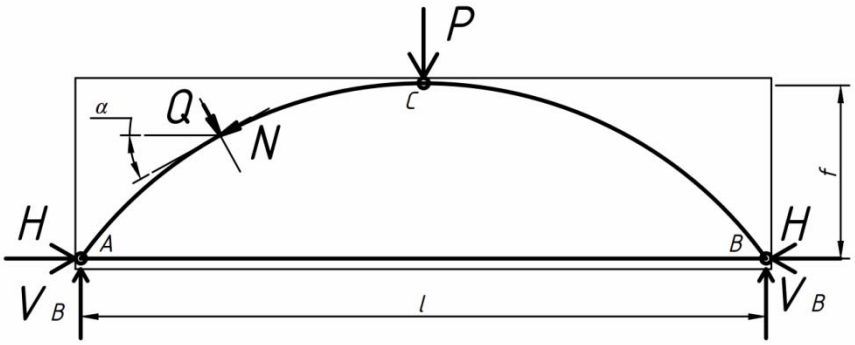


Рис. 1. Расчетная модель определения внутренних силовых факторов

Ниже приводится аналитическое определение внутренних силовых факторов (продольных, поперечных усилий, моментов и распора) в поперечных сечениях арки и затяжки при разных видах нагружения. Анализируется четыре случая нагружения: одной сосредоточенной силой P=200 кН, приложенной к ключевому шарниру С (рис. 2), одной сосредоточенной силой P=200 кН, приложенной слева от ключевого шарнира (расстояние от левой опоры составляет 0,5 м, рис. 3), двумя сосредоточенными силами P_1=P_2=100 кН, приложенными на расстоянии a=0,5 м от левой и правой опор (рис. 4), и равномерно-распределенной нагрузкой q=100 кН/м (общая нагрузка по длине балки составляет 200 кН, рис. 5). Все образцы имели одинаковые геометрические характеристики: постоянную высоту в ключевом шарнире f = 0,5 м и постоянную длину между опорными реакциями l = 2 м, ключевой шарнир располагался в середине пролета балки (см. рис. 5). Во всех случаях ось арки представлена квадратичной параболой.

Уравнение параболы, проходящей через шарниры *A*, *B*, *C*, имеет вид

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

Легко убедиться в том, что значения опорных реакций в трехшарнирной балке ничем не отличаются от вертикальных реакций левой и правой опор, которые получились бы от рассматриваемой нагрузки, если бы трехшарнирная арка была заменена простой балкой. При определении изгибающего момента относительно шарнира *C* (например, для левой части арки) получим

$$M_c^0 - Hf = 0 , \quad (2)$$

или

$$H = \frac{M_c^0}{f} , \quad (3)$$

где M^0_c представляет собой суммарный момент всех левых по отношению к шарниру *C* вертикальных сил, т.е. изгибающий момент, который получился бы от заданных сил в сечении *C* простой балки.

Введение распора в расчетную модель железобетонной балки с малым и средним относительным пролетом среза позволяет «погасить» момент, присущий обычной балке. Следует отметить, что: перемещение ключевого шарнира *C* по вертикали влечет за собой изменение величины распора (обратно пропорционально высоте).

Зависимость (3) показывает, что при любой вертикальной нагрузке распор:

- не зависит от формы оси балки (при заданном расположении шарниров);
- при заданной нагрузке зависит от расположения шарниров;
- равен изгибающему моменту простой балки, разделенной на высоту арки.

В произвольном сечении расчетной модели (арки с затяжкой), нагруженной вертикальными силами, изгибающий момент определяется как

$$M = M^0 - Hy \quad (4)$$

и выражает собой эпюру изгибающих моментов.

Наличие распора приводит к резкому уменьшению изгибающих моментов: вместо момента M^0 (при отсутствии распора) появляются разности M^0–Hy. Уменьшение влияния изгиба говорит о качественном отличии работы железобетонных балок с малым и средним пролетом среза от обычных балок (предположительно, с a/h_0>3).

В случае, когда изгибающий момент обращается в нуль, ось арки принимает оптимальное положение (рациональная ось). Для этого необходимо и достаточно, чтобы все ординаты оси арки были пропорциональны соответствующим ординатам балочной эпюры изгибающих моментов.

Так, в случае равномерно-распределенной нагрузки рациональной осью является квадратная парабола (1) и состояние системы не изменится при произвольном положении шарнира *C* на параболической оси.

Для произвольного сечения арки, опоры которой расположены на одном уровне, поперечная сила определяется как

$$Q = Q^0 \cos\alpha - H \sin\alpha , \quad (5)$$

где Q^0 представляет собой поперечную силу в соответствующем сечении простой балки с горизонтальной осью (выступ на эпюре поперечных сил равен $P_i \cos\alpha$).

Таким образом, в трехшарнирной арке не только эпюра изгибающих моментов, но и эпюра поперечных сил имеет меньшие значения по сравнению с обычной балкой. Уменьшение моментов и поперечных сил в сечении влечет за собой появление нового усилия (отсутствующего в простой балке), характеризирующего сжатый наклонный бетонный подкос – продольную силу *N*.

Спроецировав все силы на касательную к оси арки в сечении K, определим продольную силу как

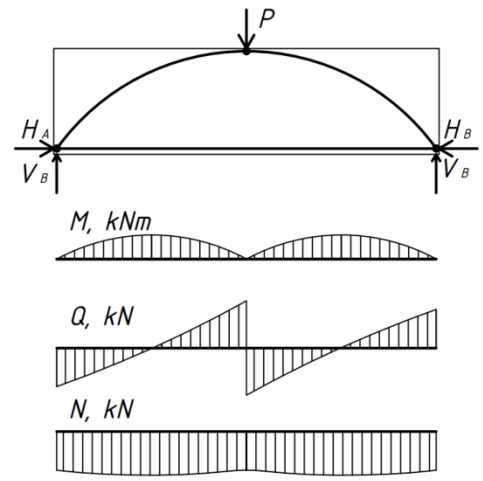
$$N = -(Q^0 \sin\alpha - H\cos\alpha)\,. \qquad (6)$$

Выступ на эпюре продольных сил равен $P_i \sin\alpha$.

По расчетным зависимостям (3)–(6) определены значения моментов, распора, поперечной и продольной сил в расчетных сечениях арки при заданных схемах нагружения: одной сосредоточенной силой P=200 кН, приложенной к ключевому шарниру С (рис. 2), одной сосредоточенной силой P=200 кН, приложенной слева от ключевого шарнира (рис. 3), двумя сосредоточенными силами P_1=P_2=100 кН, приложенными на расстоянии a=0,5 м от левой и правой опор (рис. 4), и равномерно-распределенной нагрузкой q=100 кН/м (рис. 5).

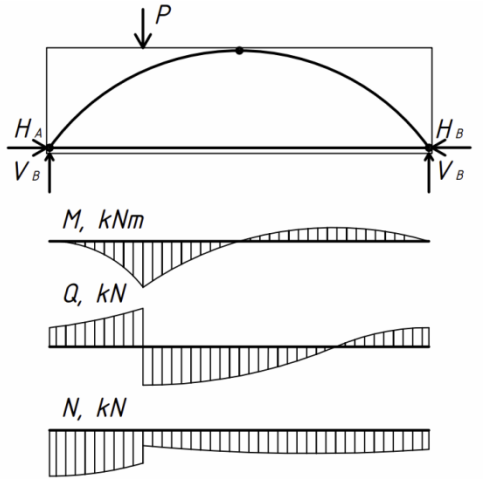
При определении внутренних силовых факторов в расчетных сечениях арки при нагружении одной сосредоточенной силой P=200 кН в ключевом шарнире C выявлено, что: минимальные значения моментов (M_{min}=–25 кН·м) наблюдаются на расстоянии a=0,5 м от левой и правой опор при N = –223,607 кН, максимальные значения моментов (M_{max}=0) наблюдаются в шарнирах A, B и C; максимальное значение поперечной силы (Q_{max} =100 кН) наблюдается в ключевом шарнире C при N= –200 кН; максимальное значение продольной силы (N_{max} =–223,607 кН) наблюдается на расстоянии a=0,5 м от левой и правой опор; усилие в затяжке (распор) H=200 кН (рис. 2).

При определении внутренних силовых факторов в расчетных сечениях арки при нагружении одной сосредоточенной силой P=200 кН приложенной слева от ключевого шарнира, выявлено, что: минимальные значения моментов (M_{min}=–12,5 кН·м) наблюдаются на расстоянии a=0,5 м от шарнира B при N= –111,803 кН, максимальные значения моментов (M_{max}=37,5 кН·м) наблюдаются на расстоянии a=0,5 м от шарнира A при N = –67,082 кН; максимальное значение поперечной силы (Q_{max} =89,443 кН) наблюдается на расстоянии a=0,5 м от левой опоры при N = –67,082 кН; максимальное значение продольной силы (N_{max} =–176,777 кН) наблюдается на левой опоре; усилие в затяжке (распор) H=100 кН (см. рис. 3).



M_{min}= –25 кН·м,
M_{max}=0 кН·м,
N_{max}= –223.607 кН (x=0,5 м, x=1,5 м),
Q_{max}=100 кН (x=1 м),
H=200 кН

Рис. 2. Эпюры внутренних силовых факторов N, Q, M в поперечных сечениях арки при нагружении одной сосредоточенной силой P=200 кН в ключевом шарнире C

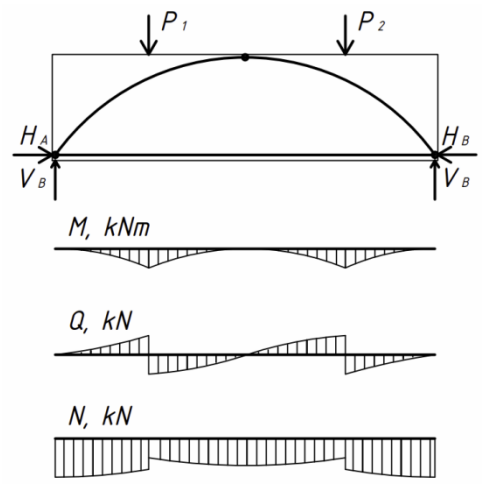


M_{min}= –12,5 кН·м (x=1,5 м),
M_{max}= 37,5 кН·м (x=0,5 м),
N_{max}= –176,777 кН (x=0 м),
Q_{max}= –89,44 кН (x=0,5 м)
H=100 кН

Рис. 3. Эпюры внутренних силовых факторов N, Q, M в поперечных сечениях арки при нагружении одной сосредоточенной силой P=200 кН, приложенной слева от ключевого шарнира

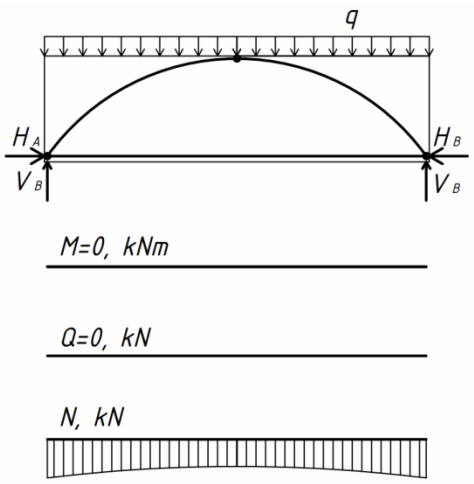
При определении внутренних силовых факторов в расчетных сечениях арки при нагружении двумя сосредоточенными силами P_1=P_2=100 кН, приложенными на расстоянии a=0,5 м от левой и правой опор выявлено, что: минимальные значения моментов (M_{min}=0 кН·м) наблюдаются в шарнирах A, B и C при N= –141,421 кН, максимальные значения моментов (M_{max}=12,5 кН·м) наблюдаются на расстоянии a=0,5 м от шарниров A и B при N= –89,443 кН; максимальное значение поперечной силы (Q_{max} =44,721 кН) наблюдается на расстоянии a=0,5 м от левой и правой опор при N= –134,164 кН; максимальное значение продольной силы (N_{max} =–141,421 кН) наблюдается на левой и правой опорах; усилие в затяжке (распор) H=100 кН (см. рис. 4).

При определении внутренних силовых факторов в расчетных сечениях арки при нагружении равномерно-распределенной нагрузкой q=100 кН/м выявлено, что: значения моментов и поперечной силы равны нулю по всей оси арки; максимальное значение продольной силы (N_{max} =–141,421 кН) наблюдается на левой и правой опорах; усилие в затяжке (распор) H=100 кН (см. рис. 5).



M_{min}= 0 кН·м,
M_{max}= 12,5 кН·м,
N_{max}= –141,421 кН,
Q_{max}= –44,721 кН,
H=100 кН

Рис. 4. Эпюры внутренних силовых факторов N, Q, M в поперечных сечениях арки при нагружении двумя сосредоточенными силами P_1=P_2=100 кН, приложенными на расстоянии a=0,5 м от левой и правой опор



M= 0 кН·м,
N_{max}= –141,421 кН (x=0 м),
Q =0 кН,
H=100 кН

Рис. 5. Эпюры внутренних силовых факторов N, Q, M в поперечных сечениях арки при нагружении равномерно-распределенной нагрузкой q=100 кН/м

По продольной силе равнозначными являются схемы нагружения равномерно-распределенной нагрузкой и двумя сосредоточенными силами (N_{max}= –141,421 кН), наиболее опасным является нагружение одной сосредоточенной силой, приложенной в ключевом шарнире (N_{max}= –223,687 кН), при нагружении одной сосредоточенной силой, приложенной слева от ключевого шарнира, N_{max}= –176,777 кН.

По поперечной силе предпочтительным является нагружение равномерно-распределенной нагрузкой (Q=0 кН по всей оси арки), наиболее опасным является нагружение одной сосредоточенной силой, приложенной в ключевом шарнире (Q_{max}= 100 кН), при нагружении одной сосредоточенной силой, приложенной слева от ключевого шарнира, Q_{max}= 89,443 кН, при нагружении двумя сосредоточенными силами Q_{max}= 44,721 кН.

Эпюры изгибающих моментов дают статическую характеристику трехшарнирной арки и подчеркивают ее отличие от безраспорной системы. По моменту предпочтительным является нагружение равномерно-распределенной нагрузкой (M=0 кН·м по всей оси арки), наиболее опасным является нагружение одной сосредоточенной

силой, приложенной в ключевом шарнире (M_{max}= –25 кН·м), при нагружении одной сосредоточенной силой, приложенной слева от ключевого шарнира и при нагружении двумя сосредоточенными силами M_{max}= –12,5 кН·м,

Следует отметить, что влияние изгибающего момента при всех схемах нагружения при выбранной оси арки в виде квадратичной функции является незначительным. Наибольшее усилие возникает в сжатом бетонном подкосе, представленном продольной силой *N*.

По усилию в затяжке равнозначными являются схемы нагружения равномерно-распределенной нагрузкой, двумя сосредоточенными силами (*H*=100 кН), при нагружении одной сосредоточенной силой в ключевом шарнире распор *H*=200 кН.

Выводы

Разрабатываемая модель позволяет:

– создать новый, единый подход к расчету прочности и трещиностойкости нормального и наклонного сечений изгибаемых железобетонных элементов;

– учесть совместное действие поперечных сил и моментов в наклонном сечении;

– объединить действующие методы оценки прочности (СП 63.13330.2018) изгибаемых железобетонных элементов с относительным пролетом среза до 1 и более 3;

– обеспечить максимальную экономию материалов бетона и арматуры за счет их рационального использования при заданном уровне надежности и долговечности.

Список литературы

1. Залесов, А.С. Расчет прочности железобетонных балок с использованием объемных конечных элементов в развитие норм по проектированию железобетонных конструкций / А.С. Залесов, А.А. Пащанин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – № 4.– С. 66–71.

2. Плевков, В.С., Оценка прочности и трещиностойкости железобетонных конструкций по российским и зарубежным нормам / В.С. Плевков, А.П. Малиновский, И.В. Балдин // Вестник ТГАСУ. – 2013. – №2.– С. 144–153.

3. Снежкина, О.В. Сравнение методов расчета прочности железобетонных балок на действие поперечных сил / О.В. Снежкина, А.В. Корнюхин //Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 2. – С. 94–101.

4. Кодыш, Э.Н. Совершенствование нормативной базы проектирования железобетонных конструкций / Э.Н. Кодыш, Н.Н. Теркин // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – №6. – С.25–28.

5. Филатов, В.Б. Анализ расчетных моделей при расчете прочности наклонных сечений железобетонных балок на действие поперечных сил / В.Б. Филатов, А.С. Арцыбасов, М.А. Багаутдинов, Д.И. Гордеев, А.И. Кортунов, Р.А. Никитин// Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, №4(3). – С. 642–645.

6. Силантьев, А.С. Экспериментальные исследования влияния продольного армирования на сопротивление изгибаемых железобетонных элементов без поперечной арматуры по наклонным сечениям / А.С. Силантьев // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – №1. – С. 64–67.

7. Старишко, И.Н. Результаты экспериментальных исследований влияния основных факторов на несущую способность по наклонным сечениям в изгибаемых железобетонных балках прямоугольного и таврового профиля / И.Н. Старишко // Вестник МГСУ. – 2016. – №7. – С. 18–35.

8. Соколов, Б.С. Исследование напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных изгибаемых элементов в зоне совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил / Б.С. Соколов, О.В. Радайкин // VIII Академические чтения РААСН. Международная научно-практическая конференция «Механика разрушения строительных материалов и конструкций». – 2014. – С. 312–317.

9. Баранова, Т.И. Оценка эффективности нового метода расчета изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных на основе аналоговых каркасно-стержневых

моделей / Т.И. Баранова, О.В. Лаврова // Вестник ВРО РААСН. – 2010. – Вып. 13. – С. 204–212,

10. Лаврова, О.В. Прочность железобетонных коротких балок на основе каркасно-стержневых моделей / О.В. Лаврова // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №1(34). – С. 91–96.

11. Снежкина, О.В. Моделирование работы железобетонных балок с относительным пролетом среза a/h_0 от 1 до 3 / О.В. Снежкина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 1(42). – С. 156–162.

12. Snezhkina, O.V. Engineering method for assessing the strength of reinforced concrete beams / O.V. Snezhkina // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – 537. – 022050. – DOI:10.1088/1757-899X/537/2/022050

13. 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.

14. Гарькина, И.А. Единая концепция системного проектирования сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1(38). – С. 119–123.

15. Garkina, I. Property modelling and durability of composite materials / I. Garkina, A. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Enginneering. – 2019. – P. 032004.

References

1. Zalesov, A.S. Calculation of the strength of reinforced concrete beams using volumetric finite elements in the development of norms for the design of reinforced concrete structures / A.S. Zalesov, A.A. Paschanin A.A.// Structural mechanics and calculation of structures. – 2011. – No. 4. – P. 66–71.

2. Plevkov, V.S. Evaluation of the strength and crack resistance of reinforced concrete structures according to Russian and foreign standards / V.S. Plevkov, A.P. Malinovsky, I.V. Baldin // Vestnik TGASU. – 2013. – No. 2. – P. 144–153.

3. Snezhkina, O.V. Comparison of methods for calculating the strength of reinforced concrete beams on the action of transverse forces / O.V. Snezhkina, A.V. Kornyukhin // Regional architecture and engineering . – 2021. – No. 2. – P. 94–101.

4. Kodysh, E.N. Improvement of the regulatory framework for the design of reinforced concrete structures / E.N. Kodysh, N.N. Terkin // Industrial and civil construction. – 2016. – №6. – P.25–28.

5. Filatov, V.B. Analysis of calculation models in the calculation of the strength of inclined sections of reinforced concrete beams on the action of transverse forces / V.B. Filatov, A.S. Artsybasov, M.A. Bagautdinov, D.I. Gordeev, A.I. Kortunov, R.A. Nikitin // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 16, No. 4(3). – P. 642–645.

6. Silantiev, A.S. Experimental studies of the effect of longitudinal reinforcement on the resistance of bent reinforced concrete elements without transverse reinforcement along inclined sections / A.S. Silantiev // Industrial and civil construction. – 2012. – No. 1. – P. 64–67.

7. Starishko, I.N. The results of experimental studies of the influence of the main factors on the bearing capacity along inclined sections in bent reinforced concrete beams of rectangular and tee profiles / I.N. Starishko // Vestnik MGSU. – 2016. – No. 7. – P. 18–35.

8. Sokolov, B.S. Study of the stress-strain state of concrete and reinforced concrete bending elements in the zone of joint action of bending moments and transverse forces / B.S. Sokolov, O.V. Radaikin // VIII Academic Readings of the RAASN. International Scientific and Practical Conference «Fracture Mechanics of Building Materials and Structures». – 2014. – P. 312–317.

9. Baranova, T.I. Evaluation of the effectiveness of a new method for calculating bending reinforced concrete structures based on analog frame-rod models / T.I. Baranova, O.V. Lavrova // Vestnik VRO RAASN. – 2010. – Issue 13. – P. 204–212.

10. Lavrova, O.V. Strength of reinforced concrete short beams based on frame-rod models / O.V. Lavrova // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 1(34). – P. 91–96.

11. Snezhkina O.V. Simulation of reinforced concrete beams with shear span a/h_0 from 1 to 3 Regional architecture and engineering . – 2020. – No. 1(42). – P. 156–162.

12. Snezhkina, O.V. Engineering method for assessing the strength of reinforced concrete beams / O.V. Snezhkina // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – 537. – 022050. – DOI:10.1088/1757-899X/537/2/022050.

13. Garkina, I.A. Design and optimization of the properties of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 4 (37). – P. 5–11.

14. Garkina, I.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.

15. Garkina, I. Property modeling and durability of composite materials / I. Garkina, A. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 032004.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 698 DOI 10.54734/20722958_2022_3_134

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

Ерёмкин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Леонтьев Виктор Александрович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»
E-mail: tgv@pguas.ru

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г.Пенза, ул. Красная, д.40,
тел.: (8412) 36-82-09

Пономарева Инна Константиновна,
кандидат экономических наук,
доцент кафедры «Информационное обеспечение управления и производства»
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

Leontiev Victor Aleksandrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Heat, Gas Supply and Ventilation»
E-mail: tgv@pguas.ru

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 «Information Support Management and Production»
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ОБЩЕОБМЕННЫХ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНЫХ МЕТОДОВ ПО НАЛАДКЕ ВОЗДУШНОГО БАЛАНСА ЗДАНИЯ НА ПРИМЕРЕ МТРК «КОЛЛАЖ»

А.И. Еремкин, В.А. Леонтьев, И.К. Пономарева

Проведено натурное исследование систем вентиляции, кондиционирования, тепло- и холодоснабжения приточных установок МТРК «Коллаж» в г. Пензе. По результатам обследования выявлено, что системы вентиляции, кондиционирования, тепло- и холодоснабжения приточных установок находятся в ограниченно работоспособном состоянии и не обеспечивают комфортного микроклимата в помещениях объекта. Разработаны научно-технические решения, направленные на усовершенствование технологического процесса создания микроклимата в части воздушного баланса здания для исключения подсосов воздуха через неплотности и входные группы здания.

Ключевые слова: воздушный баланс, микроклимат, вентиляция, кондиционирование, хладоснабжение, аэродинамические испытания, приток, вытяжка

FUNCTIONING OF GENERAL EXCHANGE VENTILATION SYSTEMS AND DEVELOPMENT OF ENGINEERING METHODS FOR ADJUSTING THE AIR BALANCE OF A BUILDING ON THE EXAMPLE OF COLLAGE

A.I. Eremkin, V.A. Leontiev, I.K. Ponomareva

The authors of the article conducted a full-scale study of ventilation air conditioning, heat and cold supply systems of air handling units of the Collage shopping center in Penza. According to the results of the survey, it was revealed that the ventilation, air conditioning, heat and cold supply systems of the air handling units are in a limited working condition and do not provide a comfortable microclimate in the premises of the center. Based on the results, scientific and technical solutions have been developed with the aim of improving the technological process of creating the microclimate of the building in terms of the air balance of the building to exclude air leaks through leaks and entrance groups of the building.

Keywords: air balance, microclimate, ventilation, air conditioning, cold supply, aerodynamic tests, intake, exhaust

Основной принцип воздушного баланса здания состоит в том, что объем приточного воздуха должен соответствовать объему удаляемого воздуха. В идеальном случае объем приточного воздуха, подающегося через системы вентиляции и кондиционирования здания, должен превышать объем уходящего воздуха, чтобы обеспечить некоторое избыточное давление внутри здания. Это предотвращает неконтролируемую инфильтрацию наружного воздуха на входах и выходах из здания и, как следствие, обеспечивает экономию расхода теплоты.

Тепловая нагрузка за счет обработки наружного воздуха является наибольшей составляющей общей тепловой нагрузки здания. Часто для снижения затрат прибегают к уменьшению объема приточного воздуха путем прикрытия наружных воздушных заслонок центрального кондиционера.

Сокращение общего объема приточного воздуха от центрального кондиционера приводит к недостаточной подаче воздуха в помещения здания и ухудшению заданных комфортных условий. Наружный воздух, поступающий в здание за счет инфильтрации, компенсируется работой вытяжных систем. Это приводит к дополнительным затратам на охлаждение и нагревание внутреннего воздуха в разные периоды года.

Возможна и другая ситуация, когда приточная вентиляция и кондиционирование используются для забора меньшего объёма холодного воздуха в холодный период ради экономии на отоплении. В данном случае внутри здания формируется область низкого давления, в результате холодный воздух за счет инфильтрации поступает в здание через двери и щели в оконных проёмах с наружными загрязнениями.

Зная сложившуюся практику использования систем вентиляции и кондиционирования, специалисты ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» провели исследование микроклимата многофункционального торгово-развлекательного комплекса «Коллаж» (МТРК «Коллаж») в г.Пензе с целью выявления возможных нарушений воздушного баланса и выработки решений по их преодолению. В рамках исследования оценивались работоспособность и производительность приточных и вытяжных вентиляционных систем и их соответствие проектным техническим решениям.

Объект обследования – многофункциональный торгово-развлекательный комплекс «КОЛЛАЖ», расположенный по адресу: г. Пенза, проспект Строителей, д. 1В.Здание введено в эксплуатацию в 2012 г. Собственник ООО «Инвест-Европа-Пенза». Общая площадь здания 58172,75 м^2. Этажность здания переменная (2-3 эт.). Общий вид обследуемого здания представлен на рис. 1.

Схема расположения основных помещений МТРК «Коллаж» на 1-м этаже приведена на рис 2.

Рис. 1. Общий вид МТРК «Коллаж»

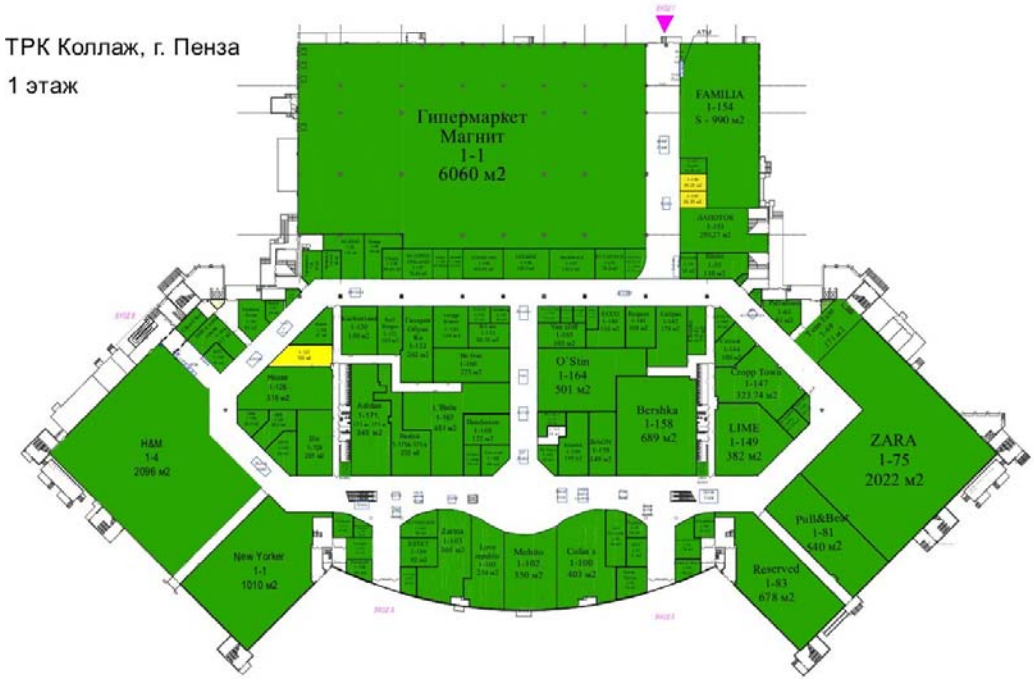


Рис. 2. План расположения помещений на 1-м этаже здания МТРК «Коллаж»

Воздухообмен в помещениях здания в рабочем проекте рассчитан следующим образом:

- в торговых помещениях – исходя из подачи минимального количества наружного воздуха для людей;
- в офисных помещениях – 40 м^3/ч наружного воздуха на человека в помещениях с естественным освещением, 60 м^3/ч в помещениях без естественного освещения, 20 м^3/ч на человека, временно (менее 2 часов) находящегося в помещении;
- в ресторанах, кафе, фуд-корте – из условия ассимиляции теплоизбытков согласно технологическому заданию.

Для обеспечения нормативного воздухообмена в различных помещениях здания рабочим проектом предусмотрена приточно-вытяжная вентиляция с механическим и естественным побуждением. В проекте запроектированы следующие вентиляционные системы:

- приточно-вытяжные вентиляционные установки с функцией рекурперации воздуха торговой марки «Korf», «Remak» в количестве 35 шт. (системы вентиляции ПВ1-ПВ32);
- приточно-вытяжные вентиляционные установки с функцией рециркуляции воздуха торговой марки «Korf», «Remak» в количестве 8 шт. (системы вентиляции ПВ16-ПВ23);

- приточные установки торговой марки «Korf», «VTS» в количестве 16 шт. (системы вентиляции П1-П16);
- канальные вытяжные вентиляторы торговой марки «Korf», «VTS» в количестве 60 шт. (системы вентиляции В1-В60).

Согласно рабочему проекту годовой расход теплоты на вентиляцию здания в холодный период года составляет 3996,91 кВт, годовой расход холода в теплый период года – 1020,25 кВт.

При выполнении исследований работы общеобменных систем вентиляции использованы современные измерительные приборы (рис. 3).

Тепловизор Testo 882 применяли для проведения тепловизионного исследования вентиляционных установок. Заводской номер 0560088202203835, прибор поверен, информация о поверке приведена на официальном сайте госповерителя.

Рис. 3. Общий вид тепловизора Testo 882

Для измерения скорости и расхода воздушного потока использовались приборы Testo 405-v1 (рис. 4) и Testo 440 (0563 4401) (рис. 5). Результаты сравнивали с результатами, полученными с помощью термоанемометра класса Testo 405-v1.

Рис. 4. Общий вид термоанемометра класса Testo 405-v1

Рис. 5. Общий вид прибора Testo 440 (0563 4401)

Термоанемометр класса Testo 405-v1 применяли для измерения скоростей движения воздуха (м/с) в воздуховодах. По полученным данным с учетом размера воздуховода определяли расход воздуха ($м^3$/ч) вентиляционной установкой.

Измерение скоростей воздуха в воздуховодах проводили согласно ГОСТ 12.3.018-79 ССБТ. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний.

Для измерения скоростей движения воздуха в воздуховодах выбирали прямые участки с расположением измерительных сечений на расстояниях не менее шести гидравлических диаметров (диаметр круглого воздуховода) от места возмущения потока (отвода, шибера, диафрагмы и т.п.) и (или) не менее двух гидравлических диаметров до него. Гидравлический диаметр находили по формуле

$$D_a = \frac{4F}{\Pi}, \tag{1}$$

где F – площадь сечения воздуховода, м^2; П – периметр сечения воздуховода, м.

При необходимости размещали мерное сечение непосредственно в месте внезапного расширения или сужения потока. При этом размер мерного сечения принимали соответствующим наименьшему сечению канала.

Координаты точек измерений давлений и скоростей, а также количество точек определяли в зависимости от формы и размеров мерного сечения по рис. 6 и 7. Максимальное отклонение координат точек измерений от указанных на чертежах не должно превышать ±10 %.

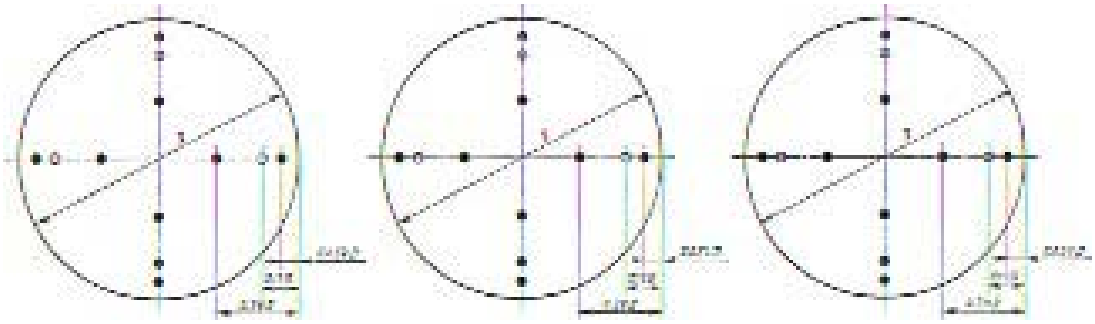


Рис. 6. Координаты точек измерения давлений и скоростей
в воздуховодах цилиндрического сечения

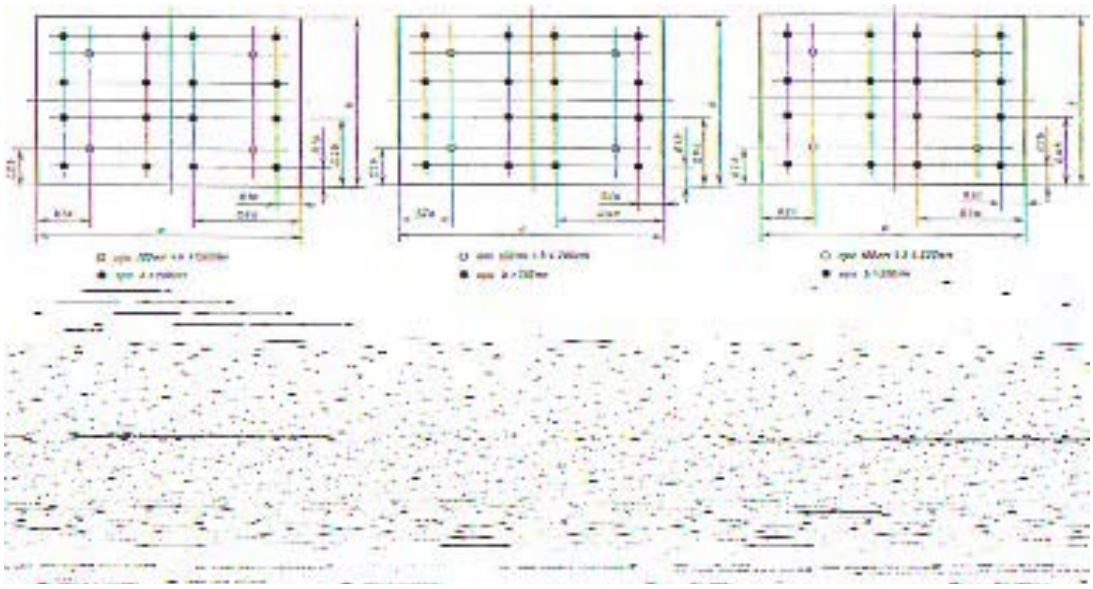


Рис. 7. Координаты точек измерения давлений и скоростей
в воздуховодах прямоугольного сечения

Количество измерений в каждой точке было не менее трех, причем разность между результатами измерений была не более 5 %, что делает дополнительные измерения нецелесообразными.

Расход воздуха в вентиляционных установках определяли по формуле

$$L = F \cdot v \cdot 3600, \quad (2)$$

где F – площадь сечения воздуховода, м^2; υ – скорость воздуха в воздуховоде, м/с.

При формулировании выводов по результатам исследования работоспособности вентиляционных систем, а именно соответствия фактических расходов воздуха проектным данным, учитывали относительную погрешность определения расхода воздуха, связанную с неравномерностью распределения скоростей в мерном сечении воздуховода (табл. 1).

Таблица 1

Значения относительных погрешностей

Форма мерного сечения	Число точек измерений	Предельная относительная погрешность, вызванная неравномерностью распределения скоростей в мерном сечении воздуховода, %, при расстоянии от места возмущения потока до мерного сечения в гидравлических диаметрах *Dd*				
		1	2	3	5	>5
Цилиндрическое сечение	4	20	16	12	6	3
	8	16	12	10	5	2
	12	12	8	6	3	2
Прямоугольное сечение	4	24	20	15	8	4
	16	12	8	6	3	2

С помощью инфракрасной диагностики – теплового метода неразрушающего контроля, основанного на дистанционной регистрации тепловых полей объекта обследования по его собственному инфракрасному излучению, – провели обследование поверхности нагрева теплообменных аппаратов по ГОСТ 26629-85 и ГОСТ 31937-2011. Тепловизионная съемка произведена при перепаде температур между поверхностью элемента системы отопления и внутренним воздухом не менее 20°С и при отсутствии прямого солнечного облучения.

Места установки тепловизора выбирали так, чтобы теплообменное оборудование находилось в прямой видимости под углом наблюдения (между нормалью к поверхности и оптической осью прибора) не более 60°, а допустимую удаленность тепловизора L в метрах от контролируемой поверхности определяли по формуле

$$L = \frac{H \cdot N_c}{2 \cdot \mathrm{tg}\varphi}, \quad (3)$$

где φ – угловой размер поля зрения объектива тепловизора, град; ΔH – линейный размер подлежащего выявлению участка системы отопления, принимаемый от 0,01 до 0,05 м; N_c – число элементов по строке термограммы, разрешаемых с заданным уровнем модуляции температурного контраста (при измерениях требуемый уровень модуляции не менее 99 %).

Тепловизионную регистрацию температурных полей теплообменной поверхности осуществляли с учетом излучательной способности обследуемой поверхности.

Тепловизор устанавливали в выбранных точках и в соответствии с инструкцией по его эксплуатации производили съемку элементов системы отопления.

Участки с нарушенной равномерностью нагрева (охлаждения) выявляли при просмотре тепловых изображений элементов системы отопления. К ним относят участки, тепловое изображение которых не соответствует модели термограммы, и участки, значения выходных сигналов тепловизора от поверхности которых меньше на цену деления шкалы изотерм базовых участков.

Обработку результатов измерений скоростей воздуха в воздуховодах систем вентиляции производили в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011.

При статистической обработке группы результатов прямых многократных независимых измерений скоростей воздуха выполняли следующие операции:

- исключали известные систематические погрешности из результатов измерений;
- вычисляли среднее квадратическое отклонение результатов измерений;
- проверяли наличие грубых погрешностей и при необходимости исключали их;
- проверяли гипотезу о принадлежности результатов измерений нормальному распределению;
- вычисляли доверительные границы случайной погрешности (доверительную, случайную, погрешность) оценки измеряемой величины.

Обработка результатов контроля при проведении качественного анализа тепловизионного контроля заключалась в обработке и расшифровке термограмм. Записанные на носитель цифровой информации термограммы анализировали, идентифицировали зоны температурных аномалий и принимали решение о соответствии аномалии скрытому дефекту или конструктивным особенностям контролируемого объекта.

По результатам анализа термограмм выявляются температурные аномалии, связанные с нарушением работы теплообменных аппаратов (неравномерно прогревающиеся участки, нарушение тепловой изоляции и т.п.). Дефектные участки заносятся в дефектную ведомость.

Для наглядности представления результатов рекомендуется компьютерное совмещение видимого и теплового изображения одного и того же участка конструкции или оконтуривание дефектных зон на видимом изображении после их обнаружения на термограммах.

Оценка тепловых аномалий производится как по величине температурного перепада в зоне аномалии, так и с помощью метода сравнения с реперной зоной.

Тепловые аномалии отображаются на термограммах в виде областей пониженной температуры, которые соответствуют:

- конструктивным особенностям объекта контроля;
- неоднородностям коэффициента излучения поверхности;
- неоднородностям теплообмена;
- дефектам.

Количественный анализ результатов контроля заключается в определении численных значений характеристик контролируемого объекта и обнаруженных дефектов. Расчеты и анализ термограмм производятся в соответствии с требованиями нормативной технической документации на контролируемый объект.

Натурное исследование работоспособности и производительности вентиляционных систем, анализ фактических и проектных расходов воздуха выявили несоответствие фактических расходов в установках ПВ2, ПВ4, ПВ5 (вытяжная часть), ПВ6, ПВ7 (приточная часть), ПВ7* (приточная часть), ПВ9 (приточная часть), ПВ9*(приточная часть), ПВ10 (приточная часть), ПВ11, ПВ12, ПВ15*, ПВ20 (приточная часть), ПВ21 (вытяжная часть), ПВ24 (приточная часть), ПВ26, ПВ27 (вытяжная часть), ПВ28 (приточная часть), ПВ30 (приточная часть), ПВ32 (приточная часть), П1, П2, П3, П4, П6, П10, П11, П13, П14. Все вытяжные установки работают в соответствии с проектными параметрами.

В ходе определения фактического воздушного баланса помещений, групп помещений и всего здания в целом было выявлено, что здание МТРК «Коллаж» представляет собой единый аэродинамический объем, внутри которого воздух может легко перетекать между помещениями. Практически все помещения соединены между собой постоянно открытыми дверными проемами, в большинстве помещений стены не сплошные. Над помещениями 2-го этажа расположен технический этаж, где фактически отсутствуют сплошные перегородки и воздух может свободно перемещаться. Результаты расчета фактического воздушного баланса МТРК «Коллаж» представлены в табл.2.

Таблица 2

Результаты расчета текущего (фактического) воздушного баланса в МТРК «Коллаж»

Система вентиляции	Воздухообмен, м³/ч	
	Приток	Вытяжка
Приточно-вытяжные		
ПВ1	5994	5346
ПВ2	8618	3226
ПВ3	26245	29035
ПВ4	5482	2794
ПВ5	10052	13127
ПВ6	4996	2065
ПВ7	3017	3788
ПВ7*	3894	4283
ПВ8	11346	10596
ПВ9	0	6303
ПВ9*	1661	6088
ПВ10	0	5157
ПВ11	3763	4266
ПВ12	1826	3125
ПВ13	4631	4591
ПВ14	3893	2880
ПВ14*	1149	1302
ПВ15	5265	5009
ПВ15*	2276	4901
ПВ16	3548	3824
ПВ17	3391	4074
ПВ18	3018	4072
ПВ19	2840	3705
ПВ20	745	2905
ПВ21	2657	1786
ПВ22	4199	3982
ПВ23	3458	4235
ПВ24	0	9420
ПВ25	6871	6090
ПВ26	10591	0
ПВ27	18572	10581
ПВ28	7592	14417
ПВ30	891	4791
ПВ31	4174	3176
ПВ32	0	4902
Итого по системам ПВ1-ПВ32:	176656	199843

Система вентиляции	Воздухообмен, м³/ч
	Приток
Приточные	
П1	4392
П2	864
П3	2218
П4	6303
П5	311
П6	150
П7	5200
П8	5768
П9	304
П10	1179
П11	1296
П12	10291
П13	5312
П14	614
П15	4439
П16	11571
Итого:	60211
Системы вентиляции. не предусмотренные проектом	
П17	2115
Итого по системам П1-П17:	62327

Система вентиляции	Воздухообмен, м³/ч	Система вентиляции	Воздухообмен, м³/ч
	Вытяжка		Вытяжка
Вытяжные, расположенные в освновном объеме ТРК "Коллаж"			
В2*	6952	В31	845
В3	7286	В32	4098
В4	2177	В33	231
В5	999	В34	100
В6	1078	В39	685
В7	5389	В41	58
В8	2396	В42	359
В10	53	В43	2534
В11	108	В44	790
В12	352	В45	1994
В13	197	В46	145
В14	316	В47	326
В15	1397	В48	376
В16	2719	В49	445
В17	1285	В50	3962
В18	1388	В51	2171
В19	1315	В52	2843
В20	494	В53	1507
В21	938	В54	3565
В22	9862	В55	2010
В23	1198	В56	4293
В24	1176	В57	0
В25	696	В58	0
В27	1496	В59	0
В29	11380	В60	1443
В30	1063		
Итого по системам В3-В8, В10-В25, В27, В29-В34, В39, В41-В60:			91537
В61	2553	В64	2964
В62	5471	В65	2427
В63	174	В66	2131
Итого по системам В61-В66:			15720
Итого по системам В3-В8, В10-В25, В27, В29-В34, В39, В41-В66			107258

Система вентиляции	Воздухообмен, м³/ч
	Вытяжка
Вытяжные, расположенные в пристроях ТРК "Коллаж"	
В1	58
В9	1102
В26	728
В28	442
В35	542
В36	500
В37	571
В38	250
В40	92
Итого	4284

Примечание: *вентиляционные установки системы В2-3 работают поочередно, поэтому при расчете воздушного баланса учитывали только расход вентиляционной установки В3, т.к. при работе этой системы расход больше и это увеличивает значение отрицательного баланса по зданию

Общее количество воздуха, подаваемое в общий объем здания ТРК "Коллаж"	238983	м³/ч
Общее количество воздуха, удаляемого из общего объема здания ТРК "Коллаж"	307100	м³/ч
Итоговый воздушный баланс по единому объему здания ТРК "Коллаж" за исключением пристроев	**-68117**	м³/ч

Приведенные в табл. 2 данные позволяют сделать следующие выводы. Системы вытяжной вентиляции В1, В9, В26, В28, В35-В38, В40 расположены в пристроях, не соединенных с общим объемом здания, поэтому эти системы не учтены при расчете фактического воздушного баланса МТРК «Коллаж», т.к. не оказывают влияния на воздушный баланс здания.

Установлено, что текущий (фактический) суммарный баланс по всем приточно-вытяжным установкам составил -23187 м^3/ч. Количество воздуха, подаваемого приточными установками, 62377 м^3/ч (в том числе не предусмотренной проектом системой П17 – 2115 м^3/ч). Количество воздуха, удаляемого вытяжными установками, 107258 м^3/ч (в том числе не предусмотренными проектом системами В61-В66 – 15720 м^3/ч).

Предусмотрен проектный воздушный баланс по зданию 10875 м^3/ч (положительный баланс).

Отрицательный баланс воздухообмена в здании приводит к проникновению холодного наружного воздуха в здание МТРК через неплотности в притворах окон, входные группы, узлы прохода коммуникаций через покрытие, что вызывает дискомфорт у арендаторов и посетителей комплекса, а также требует дополнительных затрат на нагрев воздуха в помещениях.

Установлено, что причиной отрицательного баланса является разрегулировка оборудования приточно-вытяжных установок шести дополнительных вытяжных систем. Низкая эффективность работы приточно-вытяжных установок связана с загрязненностью фильтров, поверхности теплообменных аппаратов и их систем теплоснабжения, отсутствием пусконаладочных работ вентиляционных установок, некорректной работой противопожарных клапанов КПС (закрытый/не полностью открытый/не отрегулированный клапаны), закрытием дроссельных заслонок, некорректно настроенными частотными преобразователями на электродвигателях вентиляторов, некорректно работающими секциями рециркуляции вентиляционных установок.

Методом тепловизионного контроля выявлены потери теплоты через изоляцию воздуховодов, повреждения тепловой изоляции теплопроводов систем теплоснабжения, вентиляционных установок, через узлы прохода коммуникаций покрытия торгового центра.

Для приведения работы вентиляционных установок и воздушного баланса здания в проектный режим рекомендуются следующие научно-технические решения:

1. Очистка (замена) воздушных фильтров в приточных установках и приточных частях приточно-вытяжных установок.
2. Очистка поверхности теплообменника в приточных установках и приточных частях приточно-вытяжных установок.
3. Промывка теплопроводов системы теплоснабжения, воздухоподогревателей, приточных установок.
4. Промывка гидравлической части воздухонагревателей.
5. Увеличение расстояния между устройствами для забора и удаления наружного воздуха, в приточно-вытяжных установках с целью предотвращения попадания грязного воздуха в приточную часть установки.
6. Пусконаладочные работы вентиляционных установок на максимальные проектные расходы воздуха.

После выполнения вышеуказанных мероприятий необходимо провести повторные исследования воздушного баланса здания.

Список литературы

1. Сотников, А.Г. Систематизация и обобщение характеристик местных вытяжных устройств – основа инженерной методики проектирования эффективных СПВ / А.Г. Сотников, А.Г. Боровицкий // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 6(32). – С. 54–59.

2. Столер, В.Д. Эффективные устройства местной вентиляции на промышленных объектах / В.Д. Столер, Ю.Л. Савельев, Ю.А. Иванов, В.Л. Шегал. – СПб.: Лань, 2017. – 252 с.

3. Пухкал, В.А. Влияние схемы организации воздухообмена в помещении на эффективность вытяжного зонта / В.А. Пухкал, В.Б. Панков // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 7. – С. 54–59.

4. Батурин, В.В. Основы промышленной вентиляции / В.В. Батурин. – М.: Профиздат, 1990. – 448с.

5. Полушкин, В.И. Вентиляция / В.И. Полушкин, С.М. Анисимов, В.Ф. Васильев, В.В. Дерюгин. – М.: Академия, 2008. – 416 с.

6. Рымкевич, А.А. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха / А.А. Рымкевич. – М.: Стройиздат, 1990. – 300 с.

7. Сотников, А.Г. Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха. (Полный комплекс требований, исходных данных и расчетной информации для СО, СПВ, СКВ, СГВС и СХС) / А.Г. Сотников. – СПб., 2012. – Т. I. – 420 с.; Т. II. – 408 с.

References

1. Sotnikov, A.G. Systematization and generalization of the characteristics of local exhaust devices – the basis of the engineering methodology for designing effective air handling units / A.G. Sotnikov, A.G. Borovitsky // Engineering and Construction Journal. – 2012. – No. 6(32). – P. 54–59.

2. Stoler, V.D. Effective local ventilation devices at industrial facilities / V.D. Stoler, Yu.L. Saveliev, Yu.A. Ivanov, V.L. Shegal. – St. Petersburg: Lan, 2017. – 252 p.

3. Pukhkal, V.A. Influence of the scheme of organization of air exchange in the room on the efficiency of the exhaust hood / V.A. Pukhkal, V.B. Pankov // Engineering Bulletin of the Don. – 2020. – No. 7. – P. 54–59.

4. Baturin, V.V. Fundamentals of industrial ventilation / V.V. Baturin. – M.: Profizdat, 1990. – 448p.

5. Polushkin, V.I. Ventilation / V.I. Polushkin, S.M. Anisimov, V.F. Vasiliev, V.V. Deryugin. – M.: Academy, 2008. 416 p.

6. Rymkevich, A.A. System analysis of optimization of general ventilation and air conditioning / A.A. Rymkevich. – M.: Stroyizdat, 1990. – 300 p.

7. Sotnikov, A.G. Design and calculation of ventilation and air conditioning systems. (Full set of requirements, initial data and settlement information for CO, SPV, SCR, SGVS and SHS) / A.G. Sotnikov. – St. Petersburg, 2012. – Vol. I. – 420 p.; Vol. II. – 408 p.

УДК 69:519.7 DOI 10.54734/20722958_2022_3_144

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

Moscow Polytechnic University
Russia, 107023, Moscow,
38, B.Semenovskaya St.
Budylina Eugenia Aleksandrovna,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the department «Infocognitive Technologies»
E-mail: bud-ea@yandex,ru
Penza State University of Architecture and Construction
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77
Garkina Irina Aleksandrovna,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Mathematics
and Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru
Danilov 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

ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: ФОРМИРОВАНИЕ НАВЫКОВ УПРАВЛЕНИЯ

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

Требуемая точность моделирования динамики эргатических систем, в том числе в области строительства, связана с условиями формирования полноценных профессиональных навыков в процессе обучения на имитационных моделях. Совершенствование математического моделирования динамики объекта может осуществляться за счет построения рациональных математических моделей на основе гибкого модульного программно-математического обеспечения, автоматизации проектирования и тестирования, разработки методов идентификации, настройки моделей. Объединение даже совершенных имитаторов в единую иерархическую структуру может привести к получению тотальных ошибок моделирования, искажающих воспринимаемую оператором инструментальную, зрительную, акселерационную и другую информацию.

Авторами предложен операторный метод оценки влияния параметров запаздывания в подсистемах (латентный период операторской моторики, люфт в каналах управления и др.), связанный с инженерно-психологическими основами формирования операторских управляющих сигналов (детерминированное моделирование задержек и их дислокаций в канале управления). Приведен пример практической реализации метода. Результаты исследований прошли практическую апробацию при разработке и настройке ряда сложных систем с учетом влияния запаздывания при моделировании физических факторов.

Ключевые слова: эргатические системы, строительные машины, имитационное моделирование, навыки управления, операторный метод

SIMULATION MODELS OF ERGATIC SYSTEMS IN CONSTRUCTION: DEVELOPING MANAGEMENT SKILLS

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

The required accuracy of modeling the dynamics of ergatic systems, including in the field of construction, is associated with the conditions for the formation of full-fledged professional skills with training on simulation models. Improving the mathematical modeling of the dynamics of an object can be carried out by building rational mathematical models based on flexible modular software and mathematical software, automating design and testing, developing identification methods, and setting up models. Combining even perfect simulators into a single hierarchical structure can lead to total modeling errors that distort the instrumental, visual, acceleration and other information perceived by the operator. The authors propose an operator method for assessing the influence of delay parameters in subsystems (latent period of operator motility, backlash in control channels, etc.), associated with the engineering and psychological foundations for the formation of operator control signals (deterministic modeling of delays and their dislocations in the control channel). An example of the practical implementation of the method is given. The results of the research have been practically tested in the development and tuning of a number of complex systems, taking into account the influence of delay in the simulation of physical factors.

Keywords: ergatic systems, construction machines, simulation, management skills, operator method

1. Введение

К настоящему времени уже накоплен значительный экспериментальный материал, позволяющий определить структуру управляющих движений [1, 2] в эргатической системе; выявить процесс адаптации оператора к специфике управления имитационной моделью объекта (*строительные машины*). Экспериментальные данные подтвердили гипотезу о том, что имитационная модель фактически навязывает оператору алгоритмы рабочих операций, пространственно-временные характеристики которых не всегда соответствуют рабочим операциям оператора по управлению реальным объектом. В [3] показано, что идентичность структур операторской деятельности в двух эргатических системах («оператор – объект», «оператор – имитационная модель объекта») при выполнении одних и тех же задач определяется полнотой и точностью моделирования. Для их оценки можно использовать следующие показатели:

– пространственно-временные характеристики действий оператора на органах управления (тождество движений на реальном объекте и в услових имитационного моделирования);

– распределение и переключение внимания оператора на рассматриваемом участке движения реального объекта и модели;

– физиологические реакции оператора на движения объекта и имитационной модели в рассматриваемый период времени.

Эти критерии являются обобщенными; охватывают внешние проявления операторской деятельности. Они определяют достаточную полноту и точность моделирования. Объем необходимых экспериментов для определения структуры операторской деятельности на данном типе объекта зависит от условий получения статистической достоверности оценок структуры операторской деятельности, обусловленной случайными колебаниями параметров объекта и чувствительностью человека к этим изменениям. Операторская деятельность по управлению объектом представляет собой фактически поведенческий акт, объединяющий процессы восприятия и переработки информации, а также формирование и выполнение на этой основе двигательных действий. Можно считать установленным, что в структуре навыка сенсомоторного управления моторный компонент является интегральным показателем, отражающим полноту и качество обработки оператором информации, поступающей по каналам различных анализаторов. В итоге практически вся информация, воспринимаемая оператором (с задержкой!), реализуется в управляющих движениях. Фактическое соответствие систем «оператор – объект – среда» и «оператор – имитационная модель» можно оценить по [4…7]. Естественно определилась и методика оптимизации имитационных

моделей в два этапа с возможностью их корректировки. На первом этапе производится согласование технических характеристик модели и реального объекта для разомкнутого контура; на втором обеспечивается сближение управляющих движений оператора.

2. Операторный метод оценки эффекта задержки

Ограничимся конкретной системой

$$\left.\begin{aligned}
&\alpha'(t)=a_{11}\alpha(t)+a_{12}\omega(t)+b_1u(t)\\
&\omega'(t)=a_{21}\alpha(t)+a_{22}\omega(t)+b_2u(t)\\
&cu'(t)=p_1\alpha(t-\tau_1)+p_2\omega(t-\tau_2)+p_3\theta(t-\tau_2)-u(t)\\
&\theta'(t)=\omega(t)\\
&t\ge 0\\
&\tau_1,\tau_2>0
\end{aligned}\right\},\ \left.\begin{aligned}
&\alpha(t)=S_1(t),\ t\le 0\\
&\omega(t)=S_2(t),\ t\le 0\\
&\alpha(+0)=S_1(0)\\
&\omega(+0)=S_2(0)\\
&u(+0)=u_0\\
&\theta(+0)=\int_{-\tau_2}^{0}S_2(\eta)d\eta
\end{aligned}\right\}.$$

Произведение $\varphi*\psi$ двух функций (каждая обращается в нуль слева от некоторой точки; ψ локально абсолютно непрерывна) рассматривается как свертка

$$\varphi*\psi=\frac{d}{dt}\int_{-\infty}^{\infty}\varphi(t-\eta)\psi(\eta)d\eta=\frac{d}{dt}(\varphi\times\psi)=\int_{-\infty}^{\infty}\varphi(t-\eta)\psi'(\eta)d\eta=(\varphi\times\psi').$$

Здесь

$$\left(\varphi(t)\right)_+=\left\{\varphi(t),t>0;\quad 0,t\le 0\right\};$$

$\psi=\left[\psi(t)\right]$ – оператор функционального типа $\psi(t)$; $\gamma_+=\{\gamma,t>0;\quad 0,t\le 0\}$; D – оператор дифференцирования: $\varphi'=D*\left(\varphi-\varphi(+0)\right)$, $\varphi=\left[\left(\varphi(t)\right)_+\right]$; $T_\tau*\psi=\psi(t-\tau)$; $T_0=1_+$. Значение оператора над функцией и произведение двух операторов также обозначаются символом ($*$).

В операторной форме после исключения последнего уравнения имеем:

$$\left.\begin{aligned}
&D*\left(\alpha-S_1(0)\right)=a_{11}\alpha+a_{12}\omega+b_1u\\
&D*\left(\omega-S_2(0)\right)=a_{21}\alpha+a_{22}\omega+b_2u\\
&cD*(u-u_0)=p_1T_{\tau_1}*(S_1+\alpha)+p_2T_{\tau_2}*(S_2+\omega)+\\
&\qquad+p_3T_{\tau_3}*D^{*-1}*(S_2+\omega)-u
\end{aligned}\right\},$$

$$\alpha=\left[\left(\alpha(t)\right)_+\right],\quad \omega=\left[\left(\omega(t)\right)_+\right],\quad u=\left[\left(u(t)\right)_+\right],$$

$$S_1=\left[0,t<-\tau_i;\quad S_i(t),-\tau_i\le t\le 0;\quad 0,t>0\right]\quad (i=1,2);$$

из третьего уравнения следует:

$$E=\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix}-\begin{aligned}&u=(cD+1)^{*-1}*\\&*\left(cu_0D+p_1T_{\tau_1}*(S_1+\alpha)+p_2T_{\tau_2}*(S_2+\omega)+p_3T_{\tau_2}*D^{*-1}*(S_2+\omega)\right)\end{aligned}.$$

Введем

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}a_{11}&a_{12}\\a_{21}&a_{22}\end{bmatrix},\ \mathbf{b}=\begin{bmatrix}b_1\\b_2\end{bmatrix},\ Q=\begin{bmatrix}b_1p_1&b_1p_2\\b_2p_1&b_2p_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}b_1\\b_2\end{bmatrix}\left[p_1\ p_2\right]=\mathbf{bp},\ \mathbf{p}=\left[p_1\ p_2\right];$$

$$\overline{\tau}=\begin{bmatrix}\tau_1\\\tau_2\end{bmatrix},\ T_{\overline{\tau}}=\begin{bmatrix}T_{\tau_1}&0\\0&T_{\tau_2}\end{bmatrix},\ \overline{x}=\begin{bmatrix}\alpha\\\omega\end{bmatrix},\overline{S}=\begin{bmatrix}S_1\\S_2\end{bmatrix},\overline{S}_0=\begin{bmatrix}S_1(0)\\S_2(0)\end{bmatrix}.$$

Имеем

$$cD^{*3}E + D^{*2}\left(E - cA\right) - D*\left(A + QT_{\bar{\tau}}\right) - p_3T_{\tau_2}\bar{b}\left[0\,1\right]^{*-1} * \bar{x} =$$
$$= cD^{*3} * \bar{S}_0 + D^{*2}\left(\bar{S}_0 + cu_0\bar{b}\right) + D*QT_{\bar{\tau}} * S + p_3T_{\tau_2} * S_2\bar{b}.$$

В общем случае определитель матрицы $\bar{x}$ является квазиполиномом шестой степени. Решение задачи определится в виде

$$\bar{x} = \left(cD^{*3}E + D^{*2}\left(E - cA\right) - D*\left(A + A + QT_{\bar{\tau}}\right) - p_3T_{\tau_2}\bar{b}\left[0\,1\right]^{*-1}\right)*$$
$$*\left(cD^{*3} * \bar{S}_0 + D^{*2}\left(\bar{S}_0 + cu\bar{b}\right) + D*QT_{\bar{\tau}} * \bar{S} + p_3T_{\tau_2} * S_2\bar{b}\right).$$

Из $c = 0,\ p_3 = 0$ следует:

$$\bar{x} = \left(DE - A - QT_{\bar{\tau}}\right)^{*-1} * \left(D\bar{S}_0 + QT_{\tau} * \bar{S}\right).$$

При $\tau_1 = \tau_2 = 0$

$$\bar{x}\,|_{\bar{\tau}=0} = \left(DE - A - Q\right)^{*-1} * D\bar{S}_0,$$
$$\left(DE - A - Q\right)^{*-1} * QT_{\bar{\tau}} * \bar{S} = \left(\left(DE - A - Q\right)^{*-1} * Q\right) * \bar{S} = 0;$$
$$\left(DE - K\right)^{*-1} = \left(D^{*2} - \left(k_{11} + k_{22}\right) * D + \left|K\right|\right)^{*-1} * \left(DE - \hat{K}\right);$$
$$\left|K\right| = \det K,\ \hat{K} = \begin{bmatrix} k_{22} & -k_{12} \\ -k_{21} & k_{11} \end{bmatrix}.$$

Отсюда

$$\bar{x} = \left(D^{*2} - \left(k_{11} + k_{22}\right) * D + \left|K\right|\right)^{*-1} * \left(D^{*2}\bar{S}_0 + D*\left(QT_{\bar{\tau}} * \bar{S} - \hat{K}\bar{S}_0\right) + \hat{K}QT_{\bar{\tau}} * \bar{S}\right),$$

$$\bar{x}\,|_{\bar{\tau}=0} = \left(D^{*2} - \left(k_{11}^0 + k_{22}^0\right) * D + \left|K^0\right|\right)^{*-1} * \left(D^{*2}\bar{S}_0 - D\hat{K}\bar{S}_0\right),$$

$$\left|K\right| = \begin{vmatrix} a_{11} + b_1p_1T_{\tau_1} & a_{12} + b_1p_2T_{\tau_2} \\ a_{21} + b_2p_1T_{\tau_1} & a_{22} + b_2p_2T_{\varsigma_2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} + p_1\begin{vmatrix} b_1a_{12} \\ b_2a_{22} \end{vmatrix}T_{\tau_1} + p_2\begin{vmatrix} a_{11}b_1 \\ a_{21}b_2 \end{vmatrix}T_{\tau_2},$$

$$\left|Q\right| = \begin{vmatrix} b_1p_1 & b_1p_2 \\ b_2p_1 & b_2p_2 \end{vmatrix} = 0;\ \left|K^0\right| = \begin{vmatrix} a_{11} + b_1p_1 & a_{12} + b_1p_2 \\ a_{21} + b_2p_1 & a_{22} + b_2p_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} + p_1\begin{vmatrix} b_1a_{12} \\ b_2a_{22} \end{vmatrix} + p_2\begin{vmatrix} a_{11}b_1 \\ a_{21}b_2 \end{vmatrix}.$$

$$\Delta = \left|A\right| = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix},\ \Delta_1 = \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} \\ b_2 & a_{22} \end{vmatrix},\ \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 \\ a_{21} & b_2 \end{vmatrix},\ \sigma = a_{11} + a_{22};$$

$$\left|K\right| = \Delta + p_1\Delta_1T_{\tau_1} + p_2\Delta_2T_{\tau_2},\ \left|K^0\right| = \Delta + p_1\Delta_1 + p_2\Delta_2,\ k_{11} + k_{22} = \sigma + b_1p_1T_{\tau_1} + b_2p_2T_{\tau_2};$$

$$k_{11}^0 + k_{22}^0 = \sigma + b_1p_1 + b_2p_2,\ \hat{K} = \hat{A} + \hat{T}_{\bar{\tau}}\hat{Q},\ \hat{K}^0 = \hat{A} + \hat{Q}.$$

Справедливо:

$$\bar{x} = \left(D^{*2} - \left(\sigma + b_1p_1T_{\tau_1} + b_2p_2T_{\tau_2}\right) * D + \Delta + p_1\Delta_1T_{\tau_1} + p_2\Delta_2T_{\tau_2}\right)^{*-1} *$$
$$*\left(D^{*2}\bar{S}_0 + D*\left(QT_{\bar{\tau}} * \bar{S}\right) - \hat{A}\bar{S}_0 - \hat{T}_{\bar{\tau}}\hat{Q}\bar{S}_0\right) - \hat{A}QT_{\bar{\tau}} * \bar{S}),$$

$$\bar{x}\,|_{\bar{\tau}=0} = \left(D^{*2} - \left(\sigma + b_1p_1 + b_2p_2\right) * D + \Delta + p_1\Delta_1 + p_2\Delta_2\right)^{*-1} * \left(D^{*2}\bar{S}_0 - D\left(\hat{A} + \hat{Q}\right)\bar{S}_0\right);$$

$$\bar{\upsilon} = \left[\bar{\upsilon}(t)\right] = QT_{\bar{\tau}} * \bar{S} - \hat{T}_{\bar{\tau}}\hat{Q}\hat{S}_0;\ \bar{\omega} = \left[\bar{\omega}(t)\right] = -\hat{A}QT_{\bar{\tau}} * \bar{S};$$

$$\overline{\upsilon}=\begin{bmatrix} b_1p_1 & b_1p_2 \\ b_2p_2 & b_2p_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} T_{\overline{\tau}} & 0 \\ 0 & T_{\tau_2} \end{bmatrix}*\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}-\begin{bmatrix} T_{\tau_1} & 0 \\ 0 & T_{\tau_2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} b_2p_2 & -b_1p_2 \\ -b_2p_1 & b_1p_1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} S_1(0) \\ S_2(0) \end{bmatrix}=$$

$$=\begin{bmatrix} b_1p_1T_{\tau_1}*S_1+b_1p_2T_{\tau_2}*S_2 \\ b_2p_1T_{\tau_1}*S_1+b_2p_2T_{\tau_2}*S_2 \end{bmatrix}-\begin{bmatrix} b_2p_2T_{\tau_2}S_1(0) & -b_1p_2T_{\tau_2}S_2(0) \\ -b_2p_1T_{\tau_1}S_1(0) & b_1p_1T_{\tau_1}S_2(0) \end{bmatrix}.$$

$$\overline{\upsilon}=\begin{bmatrix} b_1p_1T_{\tau_1}*S_1+b_1p_2T_{\tau_2}*S_2+p_2\left(b_1S_2(0)-b_2S_1(0)\right)T_{\tau_2} \\ b_2p_1T_{\tau_1}*S_1+b_2p_2T_{\tau_2}*S_2+p_1\left(b_2S_1(0)-b_1S_2(0)\right)T_{\tau_1} \end{bmatrix},$$

$$\overline{\omega}=\begin{bmatrix} -a_{22} & a_{12} \\ a_{21} & -a_{11} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} b_1p_1 & b_1p_2 \\ b_2p_1 & b_2p_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} T_{\tau_1} & 0 \\ 0 & T_{\tau_2} \end{bmatrix}*\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}=-\begin{bmatrix} p_1\Delta_1T_{\tau_1}*S_1+p_2\Delta_1T_{\tau_2}*S_2 \\ p_1\Delta_2T_{\tau_1}*S_1+p_2\Delta_2T_{\tau_2}*S_2 \end{bmatrix};$$

$$T_{\tau_1}*S_1=\left[0,t<0;S_1(t-\tau_1),0\le t\le\tau_1;0,t>\tau_1\right],$$

$$T_{\tau_2}*S_2=\left[0,t<0;S_2(t-\tau_2),0\le t\le\tau_2;0,t>\tau_2\right].$$

Для $\tau_i=0\,(i=1,2)$ $T_{\tau_i}*S_i=S_i$, существует оператор типа функции, который может быть отличен от нуля только в точке $t=0$ (ибо $\tau_i=0$ в выражениях υ,ω, можно опускать члены S_i, содержащие множитель).

При $\tau_1=\tau_2=\tau>0$ получим:

$$\overline{\upsilon}=T_\tau*\begin{bmatrix} b_1\left(p_1S_1+p_2S_2\right)+p_2\left(b_1S_2(0)-b_2S_1(0)\right) \\ b_2\left(p_1S_1+p_2S_2\right)+p_1\left(b_2S_1(0)-b_1S_2(0)\right) \end{bmatrix},$$

$$\overline{\omega}=-T_\tau\circ\begin{bmatrix} p_1\Delta_1S_1+p_2\Delta_1S_2 \\ p_1\Delta_2S_1+p_2\Delta_2S_2 \end{bmatrix}.$$

Из вышеизложенного следует:

$$\overline{x}=\left(D^{*2}-\left(\sigma+b_1p_1T_{\tau_1}+b_2p_2T_{\tau_2}\right)*D+\Delta+p_1\Delta_1T_{\tau_1}+p_2\Delta_2T_{\tau_2}\right)^{*-1}*$$

$$*\left(D^{*2}\overline{S}_0+D*\left(\overline{\upsilon}-\hat{A}\overline{S}_0\right)+\overline{\omega}\right).$$

При $\overline{\tau}\ne 0$ возможны случаи:

1. $\tau_1>0,\tau_2>0$;

$$\overline{x}=\left(D^{*2}-\sigma D+\Delta\right)^{*-1}*\left(1-\left(D^{*2}-\sigma D+\Delta\right)\right).$$

Тогда:

$$\overline{x}=\left(D^{*2}-\sigma D+\Delta\right)^{*-1}*\left(D^{*2}\overline{S}_0+D*\left(\overline{\upsilon}-\hat{A}\overline{S}_0\right)\overline{\omega}\right)+$$

$$+\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{k}\binom{k}{m}T_{m\tau_1+(k-m)\tau_2}*\left(D^{*2}-\sigma D+\Delta\right)^{*-k}*\left(b_1p_1D-p_1\Delta_1\right)^{*m}*\left(b_2p_2D-p_2\Delta_2\right)^{*k-m}*$$

$$*\left(D^{*2}-\sigma D+\Delta\right)^{*-1}*\left(D^{*2}\overline{S}_0+D*\left(\overline{\upsilon}-\hat{A}\overline{S}_0\right)+\overline{\omega}\right).$$

2. $\tau_1>0,\tau_2=0$;

$$\overline{x}=\left(D^{*2}-\left(\sigma+b_2p_2\right)D+\Delta+p_2\Delta_2\right)^{*-1}*$$

$$*\left(1-\left(D^{*2}-\left(\sigma+b_2p_2\right)D+\Delta+p_2\Delta_2\right)^{*-1}*T_{\tau_1}*\left(b_1p_1D-p_1\Delta_1\right)\right)^{*-1}*$$

$$*\left(D^{*2}\overline{S}_0+D*\left(\overline{\upsilon}-\hat{A}\overline{S}_0\right)+\overline{\omega}\right).$$

Отсюда

$$\overline{x}=\left(D^{*2}-\left(\sigma+b_2p_2\right)D+\Delta+p_2\Delta_2\right)^{*-1}*\left(D^{*2}\overline{S}_0+D*\left(\overline{\upsilon}-\hat{A}\overline{S}_0\right)+\overline{\omega}\right)+$$

$$+\sum_{k=1}^{\infty}T_{\mu\tau_1}*\left(D^{*2}-\left(\sigma+b_2p_2\right)D+\Delta+p_2\Delta_2\right)^{*-k}*\left(b_1p_1D-p_1\Delta_1\right)^{*k}*$$

$$*\left(D^{*2}-\left(\sigma+b_2p_2\right)D+\Delta+p_2\Delta_2\right)^{*-1}*\left(D^{*2}\overline{S}_0+D*\left(\overline{\upsilon}-\hat{A}\overline{S}_0\right)+\overline{\omega}\right)$$

3. $\tau_1=0,\tau_2>0$.

Аналогично предыдущему получим:

$$\overline{x}=\left(D^{*2}-\left(\sigma+b_1p_1\right)D+\Delta+p_1\Delta_1\right)^{*-1}*\left(D^{*2}\overline{S}_0+D*\left(\overline{\upsilon}-\hat{A}\overline{S}_0\right)+\overline{\omega}\right)+$$

$$+\sum_{k=1}^{\infty}T_{k\tau_2}*\left(D^{*2}-\left(\sigma+b_1p_1\right)D+\Delta+p_1\Delta_1\right)^{*-k}*\left(b_2p_2D-p_2\Delta_2\right)^{*k}*$$

$$*\left(D^{*2}-\left(\sigma+b_1p_1\right)D+\Delta+p_1\Delta_1\right)^{*-1}*\left(D^{*2}\overline{S}_0+D*\left(\overline{\upsilon}-\hat{A}\overline{S}_0\right)+\overline{\omega}\right)$$

Если $\overline{\tau}=0$ $\left(\tau_1=\tau_2=0\right)$,

$$\overline{x}\,|_{\overline{\tau}=0}=\left(D^{*2}-\left(\sigma+b_1p_1+b_2p_2\right)D+\Delta+p_1\Delta_1+p_2\Delta_2\right)^{*-1}*\left(D^{*2}\overline{S}_0-D\left(\hat{A}+\hat{Q}\right)\overline{S}_0\right).$$

Можно показать:

$$F=\left(D^{*2}+2\frac{a_1}{2}D+\frac{a_1^2}{4}\right)+\left(a_2-\frac{a_1^2}{4}\right)=\left(D+\frac{a_1}{2}\right)^{*2}+\left(a_2-\frac{a_1^2}{4}\right)=$$

$$\begin{cases}\left(D-\gamma\right)^{*2}, & \lambda^2=0\\ \left(D-\gamma\right)^{*2}-\lambda^2, & \lambda^2>0\\ \left(D-\gamma\right)^{*2}+\mu^2, & \lambda^2=-\mu^2<0\end{cases},$$

$$\gamma=-\frac{a_1}{2},\quad \lambda^2-\frac{a_1^2}{4}-a_2,\quad \mu^2=a_2-\frac{a_1^2}{4}.$$

Пусть ζ,ξ – числовые операторы (скалярные или векторные).

$$\text{Тогда } F^{*-1}*\left(D^{*2}\zeta+D\xi\right)=\begin{cases}\left(e^{\gamma t}\left(\zeta+t\left(\gamma\zeta+\xi\right)\right)\right)_+, & \lambda^2=0\\ \left(e^{\lambda t}\left(ch\left(\lambda t\right)\zeta+\frac{1}{\lambda}sh\left(\lambda t\right)\left(\gamma\zeta+\xi\right)\right)\right)_+, & \lambda^2>0\\ \left(e^{\gamma t}\left(\cos\left(\mu t\right)\right)\zeta+\frac{1}{\mu}\sin\left(\mu t\right)\left(\gamma\zeta+\xi\right)\right)_+, & \lambda^2=-\mu^2<0\end{cases};$$

$$F^{*-1}*D^{*2}=\begin{cases}\left(\left(1+\gamma t\right)e^{\gamma t}\right)_+;\ \lambda^2=0\\ \left(e^{\gamma t}\left(ch\left(\lambda t\right)+\frac{\gamma}{\lambda}sh\left(\lambda t\right)\right)\right)_+;\ \lambda^2>0\\ \left(e^{\gamma t}\left(\cos\left(\mu t\right)+\frac{\gamma}{\mu}\sin\left(\mu t\right)\right)\right)_+;\ \lambda^2=-\mu^2<0\end{cases};$$

$$F^{*-1} * D = \begin{cases} \left(te^{\gamma t}\right)_+ ; \lambda^2 = 0 \\ \left(\dfrac{1}{\lambda} e^{\gamma t} sh(\lambda t)\right)_+ ; \lambda^2 > 0 \\ \left(\dfrac{1}{\mu} e^{\lambda t} \sin(\mu t)\right)_+ ; \lambda^2 = -\mu^2 < 0 \end{cases}.$$

Используя приведенные выше формулы, получим

$$\overline{x} = \begin{cases} \overline{f} + \sum\limits_{k=1}^{\infty} \sum\limits_{m=0}^{k} \left(\dfrac{k}{m}\right) T_{m\tau_1 + (k-m)\tau_2} * \left(\underbrace{f_1 \times \ldots \times f_1}_{m} \times \underbrace{f_2 \times \ldots \times f_2}_{k-m} \times \overline{f}\right), & \tau_1 > 0, \tau_2 > 0 \\ \overline{f} + \sum\limits_{k=1}^{\infty} T_{k\tau_1} * \left(\underbrace{f_1 \times \ldots \times f_1}_{k} \times \overline{f}\right), & \tau_1 > 0, \tau_2 = 0 \\ \overline{f} + \sum\limits_{k=1}^{\infty} T_{k\tau_2} * \left(\underbrace{f_2 \times \ldots \times f_2}_{k} \times \overline{f}\right), & \tau_1 = 0, \tau_2 > 0 \end{cases}$$

При $\overline{\tau} = 0$

$$F = D^{*2} - \left(\sigma + b_1 p_1 + b_2 p_2\right) D + \Delta + p_1 \Delta_1 + p_2 \Delta_2 ,$$

$$\gamma = \frac{\sigma + b_1 p_1 + b_2 p_2}{2}, \lambda^2 = \frac{\left(\sigma + b_1 p_1 + b_2 p_2\right)^2}{4} - \Delta - p_1 \Delta_1 - p_2 \Delta_2 = -\mu^2 ;$$

$$\overline{x} = \begin{cases} \left(e^{\gamma t}\left(E + t\left(\gamma E - \left(\hat{A} + Q\right)\right)\right)\overline{S}_0\right)_+ , & \lambda^2 = 0 \\ \left(e^{\gamma t}\left(ch(\lambda t) E + \dfrac{1}{\lambda} sh(\lambda t)\left(\gamma E - \left(\hat{A} + \hat{Q}\right)\right)\right)\overline{S}_0\right)_+ , & \lambda^2 > 0 \\ \left(e^{\gamma t}\left(\cos(\mu t) E + \dfrac{1}{\mu} \sin(\mu t)\left(\gamma E - \left(\hat{A} + \hat{Q}\right)\right)\right)\right)\overline{S}_{0+}, & \lambda^2 = -\mu^2 < 0. \end{cases}$$

Получили точное решение задачи ($c = o, p_3 = 0$). При $\overline{\tau} = 0$ решение представлено в окончательном виде.

При $\overline{\tau} \neq 0$ бесконечный ряд, входящий в решение, есть совокупность сдвигов (в каждой ограниченной области переменной содержится лишь конечное число слагаемых); в области $0 \le t \le \tau$

$$\tau = \begin{cases} \min\left(\tau_1, \tau_2\right) \text{при} \tau_1 > 0, \tau_2 > 0; \\ \tau_1 \text{ при } \tau_1 > 0, \tau_2 = 0; \\ \tau_2 \text{ при } \tau_1 = 0, \tau_2 > 0 \end{cases}$$

(ряд содержит только начальный член).

По числовым значениям γ и $\lambda^2\left(\mu^2\right)$, соответствующим случаям $\overline{\tau} = 0$ и $\overline{\tau} \neq 0$, легко установить характер процесса в каждом из этих случаев или различие между ними.

3. Пример реализации

Проиллюстрируем на примере конкретной системы:

$$\left.\begin{aligned}&\alpha'(t)=-0,0117\alpha(t)+\omega(t)+0,000502u(t)\\&\omega'(t)=0,0076\alpha(t)-0,589\omega(t)-0,0332u(t)\\&u(t)=\alpha(t-\tau_1)+\frac{\pi}{360}\omega(t-\tau_2)\\&(t\ge 0)\end{aligned}\right\};$$

$$A=\begin{bmatrix}a_{11} & a_{12}\\ a_{21} & a_{22}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-0,0117 & 1\\ 0,0076 & -0,589\end{bmatrix},\ b=\begin{bmatrix}b_1\\ b_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0,000502\\ -0,0332\end{bmatrix},\ \overline{p}=\begin{bmatrix}p_1\\ p_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1\\ \frac{\pi}{360}\end{bmatrix},$$

$$S_1(t)=1,\quad S_2(t)=0;\ \sigma=a_{11}+a_{22}=-0,6007;\ \Delta=a_{11}a_{22}-a_{21}a_{12}=-0,0007087;$$

$$\Delta_1=b_1a_{22}-b_2a_{12}=0,032904322;\ \Delta_2=a_{11}b_2-a_{21}b_1=0,0003846248;$$

$$\hat{A}=\begin{bmatrix}a_{22} & -a_{12}\\ -a_{21} & a_{11}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-0,589 & -1\\ -0,0076 & -0,0117\end{bmatrix},$$

$$Q=\begin{bmatrix}b_1p_1 & b_1p_2\\ b_2p_1 & b_2p_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0,000502 & 0,0000043\\ -0,0332 & -0,0002897\end{bmatrix};$$

$$\hat{Q}=\begin{bmatrix}b_2p_2 & -b_1p_2\\ -b_2p_1 & b_1p_1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-0,0002897 & -0,0000043\\ 0,0332 & 0,000502\end{bmatrix}.$$

Справедливо:

1. $\tau_1=\tau_2=0$:

$$\overline{x}=\begin{bmatrix}\alpha\\ \omega\end{bmatrix}=\left\{\begin{aligned}&0,\ t\le 0;\\&e^{-0,30024t}ch(0,2406t)\begin{bmatrix}1\\ 0\end{bmatrix}+e^{-0,30024t}sh(0,2406t)\begin{bmatrix}1,202354\\ -0,10631\end{bmatrix},t>0\end{aligned}\right\}.$$

2. $\tau_1=\tau_2=\tau>0,\quad \tau=0,15$:

$$\begin{bmatrix}\alpha(t)\\ \omega(t)\end{bmatrix}=e^{-0,30035t}\left(ch(0,3015t)\begin{bmatrix}-45,429518\\ -0,54271878\end{bmatrix}+sh(0,3015t)\begin{bmatrix}-45,292955\\ -0,62552262\end{bmatrix}\right)+$$
$$+\begin{bmatrix}46,429518\\ 0,54271878\end{bmatrix}.$$

Выводы

Разработан операторный метод оценки влияния параметров задержек в подсистемах на основе моделирования задержек и их дислокаций в канале управления. Получено точное аналитическое решение для системы с запаздыванием ($c=0, p_3=0$):

– при $\overline{\tau}=0$ решение представлено в окончательном виде;

– при $\overline{\tau}\ne 0$ бесконечный ряд, входящий в решение, представляет собой ряд сдвигов;

– численные значения γ и $\lambda^2(\mu^2)$ позволяют установить характер процесса в каждом из случаев или различие между ними.

Список литературы

1. Таран, В.А. Эргатические системы управления. Оценки качества эргатических процессов / В.А. Таран. – М.: Машиностроение, 1976. – 188 с.
2. Garkina, I. Tasks of building materials from the viewpoint of control theory / I. Garkina, A. Danilov // Key Engineering Materials. – 2017. – Т. 737. – P. 578–582.
3. Бюшгенс, Г.С. Аэродинамика самолета: динамика продольного и поперечного движения / Г.С. Бюшгенс, Р.В. Студнев. – М.: Машиностроение, 1979. – 352 с.
4. Andreev, A.N. Information models for designing conceptual broad-profile flight simulators / A.N. Andreev, A.M. Danilov, B.V. Klyuev, E.V. Lapshin, A.V. Blinov, N.K. Yurkov // Measurement Techniques. – 2000. – Т. 43, № 8. – P. 667–672.
5. Данилов, А.М. Формализация оценки оператором характеристик объекта управления / А.М. Данилов, Э.Р. Домке, И.А. Гарькина // Информационные системы и технологии. – 2012. – № 2 (70). – С. 5–10.
6. Гарькина, И.А. Математическое моделирование управляющих воздействий оператора в эргатической системе / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Э.Р. Домке // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2011. – № 2 (25). – С. 18–23.
7. Garkina, I. Imitators of Dynamic Systems with Landing / I. Garkina, A. Danilov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2018. – Vol. 449.– P. 012002.

References

1. Taran, V.A. Ergatic control systems. Estimates of the quality of ergatic processes / V.A. Taran. – M.: Mashinostroenie, 1976. – 188 p.
2. Garkina, I. Tasks of building materials from the viewpoint of control theory / I. Garkina, A. Danilov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 737. – P. 578–582.
3. Byushgens, G.S. Aircraft aerodynamics: dynamics of longitudinal and transverse motion / G.S. Byushgens, R.V. Studnev. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 352 p.
4. Andreev, A.N. Information models for designing conceptual broad-profile flight simulators / A.N. Andreev, A.M. Danilov, B.V. Klyuev, E.V. Lapshin, A.V. Blinov, N.K. Yurkov // Measurement Techniques. – 2000. – Vol. 43, № 8. – P. 667–672.
5. Danilov, A.M. Formalization of the operator's assessment of the characteristics of the control object / A.M. Danilov, E.R. Domke, I.A. Garkina // Information systems and technologies. – 2012. – № 2 (70). – P. 5–10.
6. Garkina, I.A. Mathematical modeling of operator control actions in an ergatic system / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.R. Domke // Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI). – 2011. – № 2 (25). – P. 18–23.
7. Garkina, I. Imitators of Dynamic Systems with Landing / I. Garkina, A. Danilov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2018. – Vol. 449. – P. 012002.

УДК 628.34 DOI 10.54734/20722958_2022_3_153

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

Кошев Александр Николаевич, доктор химических наук, профессор, действительный член Нью-Йоркской академии наук, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы»
E-mail: koshev@pguas.ru

Кузина Валентина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-вычислительные системы»
E-mail: kuzina@pguas.ru

Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения РАН
Россия, 630128, Новосибирск, Кутателадзе, 18, тел.: (383) 332-40-02

Варенцов Валерий Константинович, доктор технических наук, профессор
E-mail: vvk@ngs.ru

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

Koshev Aleksander Nikolaevich, Doctor of Chemistry Science, Professor, the full member of the New York Akademy of Sciences, Professor of the department «Information and computing systems»
E-mail: koshev@pguas.ru

Kuzina Valentina Vladimirovna, Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Information and computing systems»
E-mail: kuzina@pguas.ru

Institute of Solid and Mechanochemistry of the Siberian Branch of RAS
Russia, 630128, Novosibirsk, 18, Kutateladze St. tel.: (383) 332-40-02.

Varentsov Valery Konstantinovich, Doctor of Sciences, Professor
E-mail: vvk@ngs.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА В ПРОТОЧНОМ ТРЕХМЕРНОМ ЭЛЕКТРОДЕ ПРИ РЕГЕНЕРАЦИИ ОКИСЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

А.Н. Кошев, В.К. Варенцов, В.В. Кузина

Одним из важных и практически не изученных вопросов в теории и промышленном использовании электролиза с проточными трехмерными электродами является исследование многостадийных реакций как при катодном восстановлении ионов металлов, так и при анодном окислении металлов. Такого рода реакции хорошо известны в электрохимии металлов, например, Cu(II)-Cu(u)-Cu, Cr(VI)-Cr(III)-Cr(II)-Cr. В настоящей статье рассмотрены подходы, физико- математические модели и результаты численного моделирования для решения этих вопросов на примере электроосаждения железа для системы Fe(III)/Fe(II)/Fe с учетом процессов, которые могут протекать при восстановлении ионов водорода и молекулярного кислорода.

Ключевые слова: трехмерные проточные электроды, электровосстановление, электроактивные компоненты, электролиз, математическое моделирование, численный расчет

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF ELECTROCHEMICAL REDUCTION OF IRON IONS IN A FLOWING THREE-DIMENSIONAL ELECTRODE DURING THE REGENERATION OF OXIDIZED ELECTROLYTES

A.N. Koshev, V.K. Varentsov, V.V. Kuzina

One of the important and practically unexplored issues in the theory and industrial use of electrolysis with flowing three-dimensional electrodes is the study of multistage reactions

both in the cathodic reduction of metal ions and in the anodic oxidation of metals. Such reactions are well known in the electrochemistry of metals, for example, Cu(II)-Cu(u)-Cu, Cr(VI)-Cr(III)-Cr(II)-Cr. This article discusses approaches, physical and mathematical models, and results of numerical simulation for solving these issues using the example of iron electrodeposition for the Fe(III)/Fe(II)/Fe system, taking into account possible reduction processes of hydrogen ions and molecular oxygen.

Keywords: flowing three-dimensional electrodes, electroreduction, electroactive components, electrolysis, mathematical modeling, numerical calculation

Исследуются методом математического моделирования электрохимические процессов в проточном трехмерном электроде (ПТЭ) при одновременном восстановлении $Fe^{+3}\rightarrow Fe^{+2}$ и $Fe^{+2}\rightarrow Fe$ с учетом электродных реакций восстановления ионов водорода и молекулярного кислорода, а также с учетом изменения электропроводности электрода, скорости протока электролита, концентраций электроактивных веществ и других параметров электрода и электролита по толщине ПТЭ в процессе электролиза. Кроме того, в цель работы входили численные исследования перечисленных электродных процессов в проточных трехмерных электродах из углеродных волокнистых материалов (УВМ).

Материальный баланс в потоке перечисленных заряженных частиц, принимающих участие в электродном процессе, описывается уравнением

$$\partial C_i/\partial t = -\mathrm{div}\left(z_i\mu_i F C_i \mathrm{grad}(U) + C_i v\right). \quad (1)$$

Здесь и далее z_i, C_i (моль/см^3); μ_i – соответственно заряд, концентрация и подвижность i-го электроактивного компонента ($i = 1, \ldots, 4$) в псевдогомогенной среде; F (Кл·моль$^{-1}$) – число Фарадея; grad(U) – градиент потенциала электрического поля U (В); v – вектор скорости конвективного переноса электролита; div – дивергенция вектора.

Из уравнения (1) следует, что концентрационные изменения в потоке определяются величиной градиента потенциала U и вектором скорости потока электролита v, которые непосредственно не зависят от концентраций и плотностей тока парциальных электрохимических реакций. Эти функции являются определяющими по отношению к распределению электрохимического процесса в проточном трехмерном электроде. В соответствии с этим положением сформулированы математические модели распределения поляризации, плотности тока и концентрации веществ, принимающих участие в электродной реакции для электрохимических систем с двумя и более электроактивными компонентами. Математическая модель электроосаждения металла на ПТЭ с учетом реакции выделения водорода [1]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = S_V\left(\frac{1}{\chi_{\text{т}}(x)} + \frac{1}{\chi_{\text{ж}}(x)}\right)\left(J_M(x) + J_{\text{Н}}(x)\right), \quad (2)$$

$$|v|\, zF\frac{\partial C}{\partial x} = -S_V J_M(x), \quad (3)$$

где S_V (см^2/см^3) – реакционная поверхность; J_M (А/см^2) – плотность поляризующего тока по металлу; $J_{\text{Н}}$ (А/см^2) – плотность поляризующего тока по водороду; $\chi_{\text{т}}$ и $\chi_{\text{ж}}$ – удельная электропроводность твердой и жидкой фаз системы; x – координата по толщине электрода.

Преобразуя уравнение (1), для стационарного случая получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial\left(\chi\dfrac{dU}{dx}\right)}{\partial x} + vF\sum z_i\frac{\partial C_i}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x}F\sum z_i C_i = 0, \quad (4)$$

$$|v|\frac{\partial C_i}{\partial n} = -\frac{S_V}{z_i F} J_{Si}. \quad (5)$$

Здесь J_{Si} (см^2/см^3) – плотность поляризующего тока по i-му компоненту; n – направление движения электролита; χ (См/см) – величина, характеризующая электропроводные свойства системы.

Система уравнений (4) и (5) может быть дополнена поляризационными кинетическими уравнениями [1], связывающими значения плотностей тока и потенциала в точке x:

$$J_{Si}(x) = j_{0i}\frac{\exp\left(\alpha_i z_i F(u-\varphi_{Ri}/RT\right) - \exp\left((\alpha_i - 1) z_i F(u-\varphi_{Ri}/RT\right)}{1 + j_{0i}\exp\left(\alpha_i z_i F(u-\varphi_{Ri}/RT\right)/z_i F K_{mi} C_i}, \quad (6)$$

с начальными и граничными условиями, накладываемыми на неизвестные функции:

$$\frac{\partial U}{\partial x}(0) = I\rho_{\text{т}};\ \frac{\partial U}{\partial x}(L) = -I\rho_{\text{ж}};\ C_i(0) = C_{i0}. \quad (7)$$

Здесь I (А/см^2) – габаритная плотность тока, проходящего через электрод; L – толщина ПТЭ.

Следует отметить, что уравнение (5) для концентрации второго электроактивного компонента (Fe^{+2}) рассматриваемой нами системы Fe(III)/Fe(II)/Fe должно быть существенно преобразовано, так как в силу электродной реакции $Fe^{+3} \rightarrow Fe^{+2}$ в процессе восстановления трехвалентного железа до двухвалентного концентрация двухвалентного железа в электролите с течением времени будет меняться.

В рассматриваемом случае проведения электролиза на ПТЭ направление протока электролита совпадает с направлением распределения плотности тока – x; следовательно, уравнение (5) может быть записано в виде

$$|v|\frac{\partial C_i}{\partial x} = -\frac{S_V}{z_i F} J_{Si}.$$

Для расчета изменения концентрации первого компонента электродной реакции (Fe^{+3}) можно записать выражение $|v|dC_i = -\frac{S_V}{z_i F} J_{Si} dx$ либо в конечной разностной форме $\Delta C_1(x_i) = -\frac{S_V}{|v| z_1 F} J_{S1} \Delta x_i$.

Очевидно, что отрицательное приращение концентрации трехвалентного железа в точке электрода x_i равно приращению концентрации двухвалентного железа в той же точке. Следовательно, разностное уравнение для концентрации двухвалентного железа из группы (5) можно записать в виде

$$\Delta C_2(x_i) = \left(\frac{S_V}{|v| z_1 F} J_{S1} + \frac{S_V}{|v| z_2 F} J_{S2}\right)\Delta x_i.$$

В этом случае уравнение (5), моделирующее распределение концентрации Fe^{+2} на ПТЭ, примет следующий вид:

$$|v|\frac{dC_2}{dx} = \frac{S_V}{F}\left(\frac{J_{S1}}{z_1} + \frac{J_{S2}}{z_2}\right).$$

Система уравнений (4) – (7) замкнута относительно неизвестных функций $U(t,x)$, $C_i(t,x)$, которые могут быть решены с использованием алгоритмов расчета распределения изменяющихся в процессе электролиза электрохимических параметров процесса и электрода, таких, как электропроводность электрода, удельная реакционная поверхность, пористость УВМ, скорость протока раствора и др. [1, 2]. Однако при чис-

ленной реализации модели возникают существенные трудности, связанные с определением компромиссных потенциалов φ_{Ri} и коэффициентов массопереноса K_{mi}.

В связи с этим при проведении расчетов значения равновесных компромиссных потенциалов φ_{Ri} выбирались нами из известного справочника по электрохимии под ред. А.М. Сухотина и затем уточнялись методом, описанным в работе [3]. Такой подход не вызывает существенных затруднений при выполнении расчетов, так как процедура уточнения значений φ_{Ri} не приводит к величинам, чрезмерно отличающимся от величин, приведенных в литературных источниках.

Существенные отличия в результатах расчетов, как между собой, так и от результатов экспериментов, наблюдаются при использовании уравнений поляризационных характеристик (6) при незначительных (в пределах 10 %) изменениях величин K_{mi}.

Точный расчет значений коэффициентов массопередачи затруднителен, так как в формулу для определения этих величин

$$K_{mi}(x,t) = \frac{a_i\left(\rho m_V\right)^{b_i}}{\left(\rho\varepsilon_0 - M(x,t)\right)^{b_i}} \tag{8}$$

входят a_i, b_i – константы, отражающие свойства электрода, электролита и гидродинамические условия процесса, которые могут меняться в достаточно широких пределах: $10^{-3} \le a \le 1{,}9\cdot10^{-2}$, $0{,}33 \le b \le 0{,}71$. В формуле (8) ρ – плотность металлического осадка, $M(x,t)$ – количество осажденного металла в слое единичного сечения в точке x в момент времени t.

Естественно предположить, что при достаточных значениях скорости протока электролита, близких к реально используемым на практике ($0{,}1 \le |v| \le 1$), диффузионная составляющая переноса вещества к углеграфитовым нитям электрода из УВМ будет менее значительна, чем конвективная составляющая. Это позволяет применить подход к определению вида поляризационной зависимости с учетом гидродинамики процесса, согласно которому перенос i-го электроактивного вещества в элементарном объеме, отождествляемом с точкой (x) гомогенного пространства (рис. 1), описывается уравнением [4]

$$\Delta c_i = Pe_i(v\cdot\mathrm{div})C_i, \tag{9}$$

где Δ – оператор Лапласа; Pe_i – число Пекле для i-го электроактивного компонента.

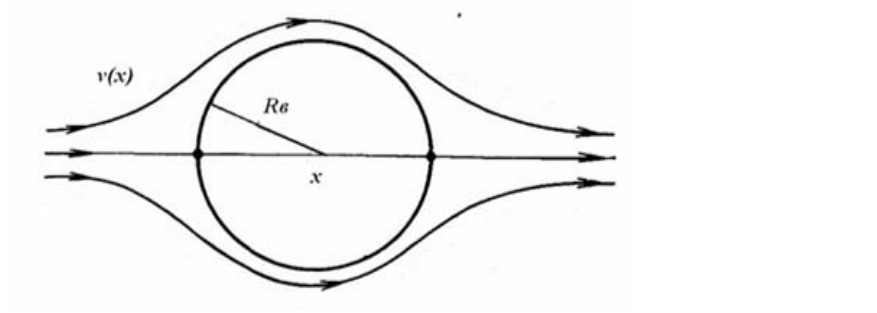


Рис. 1. Схема элементарного объема ПТЭ, в котором происходит обтекание электролитом цилиндрической нити УВМ радиуса $R_в$

В первом приближении уравнение (9) имеет вид:

$$\partial^2 C_i / \partial w^2 + Pe_i\, \partial C_i / \partial w = 0\,, \tag{10}$$

где w – линейная координата в выбранном элементарном объеме; $C_i(w) = \left(C_{ix} - C_i(w)\right)/C_{ix}$; $Pe_i = r_в v / D_i$; C_{ix} – концентрация i-го компонента в точке ПТЭ, которая отожде-

ствляется с выбранным элементарным объемом порового пространства – точкой x на электроде толщиной L, $0 \le x \le L$; $r_в$ – радиус волокна; D_i – коэффициент диффузии.

Уравнения (10) дополняются условием изменения концентрации C_i на поверхности нити УВМ, то есть при w =0

$$\partial C_i / \partial w = -k_{iS} f_{iS}\left(C_i\right). \tag{11}$$

Коэффициент k_{iS} соответствует константе скорости i-й поверхностной электрохимической реакции, а $k_{iS} f_{iS}\left(C_i\right)$ – безразмерные функции, которые соответствуют скорости i-й поверхностной электрохимической реакции, в безразмерном виде задаются формулами:

$$k_{iS} = \frac{r_в j_{i0}\left(e^{M_{i1}} - e^{M_{i2}}\right)}{z_i F D_i C_{ix}};\ M_{i1} = \frac{\alpha_i z_i F\left(E(x) - E_{ip}(x)\right)}{RT};\ M_{i2} = \frac{\left(1-\alpha_i\right) z_i F\left(E(x) - E_{ip}(x)\right)}{RT};$$

$$F\left(C(w)\right) = j_{i0}\left(\frac{C_i(w)}{C_{ix}} e^{M_{i1}} - e^{M_{i2}}\right);\ F\left(C_{ix}\right) = j_{i0}\left(e^{M_{i1}} - e^{M_{i2}}\right);\ f_{iS}\left(C\right) = \frac{F\left(C_i(w)\right)}{F\left(C_{ix}\right)}.$$

Решение уравнения (10) при условии (11) имеет вид:

$$C_i = A_i e^{-Pe_i w} \tag{12}$$

при A_i, равном

$$A_i = \frac{\dfrac{r_в}{z_i F D_i C_{ix}}\left(e^{M_{i1}} - e^{M_{i2}}\right)}{Pe_i + e^{M_{i1}} \dfrac{r_в}{z_i F D_i C_{ix}}}. \tag{13}$$

Подставив все найденные величины в известное выражение для поляризационной кривой $j_i(x) = \dfrac{j_{i0}\left(e^{M_{i1}} - e^{M_{i2}}\right)}{1 + j_{i0} e^{M_{i1}} j_{i,пр}}$, получим уравнение

$$j_i(x) = \frac{j_{i0}\left(e^{M_{i1}} - e^{M_{i2}}\right)}{1 + j_{i0} e^{M_{i1}} z_i F C_i(x) v(x)}. \tag{14}$$

Уравнение (14) можно записать в другом виде, если ввести в рассмотрение величину $j_{i,пр} = \dfrac{z_i F D_i C_{ix}}{r_в}$, которая в первом приближении отражает величину предельного диффузионного тока:

$$j_i(x) = \frac{Pe_i j_0\left(e^{M_{i1}} - e^{M_{i2}}\right)}{Pe_i + j_{i0} e^{M_{i1}} j_{i,пр}(x)}. \tag{15}$$

Таким образом, уравнение (14) содержит легко определяемые динамические параметры: коэффициент диффузии, толщину диффузионного слоя и др., которые описаны в [5] в явном виде и использовались при проведении численных расчетов.

На рис. 2–6 приведены графики распределения основных электрохимических функций по толщине ПТЭ для различных значений управляющих параметров: габаритной плотности тока J (А/см^2) и входной линейной скорости протока электролита u(см/с), полученных на основе численных расчетов.

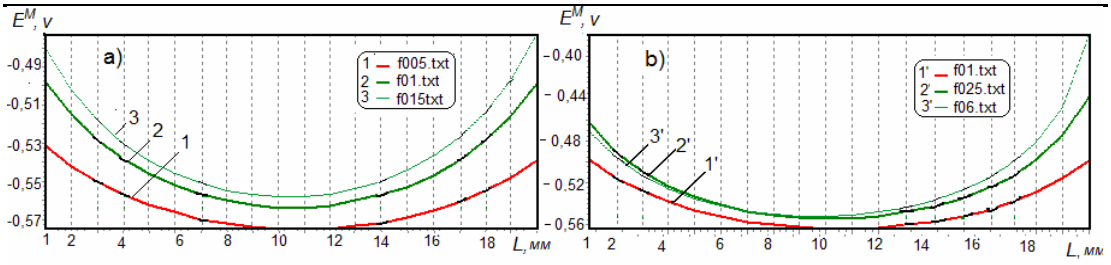


Рис. 2. Распределение потенциала по толщине ПТЭ при различных плотностях габаритного тока и скорости протока электролита (см/с):
а – 0,5; б – 1

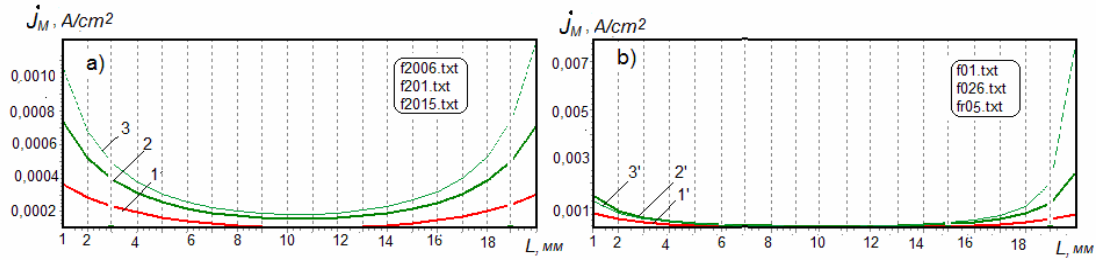


Рис. 3. Распределение плотности тока реакции Fe(III)→ Fe(II) на ПТЭ при различных плотностях габаритного тока и скорости протока электролита (см/с):
а – 0,5; б – 1

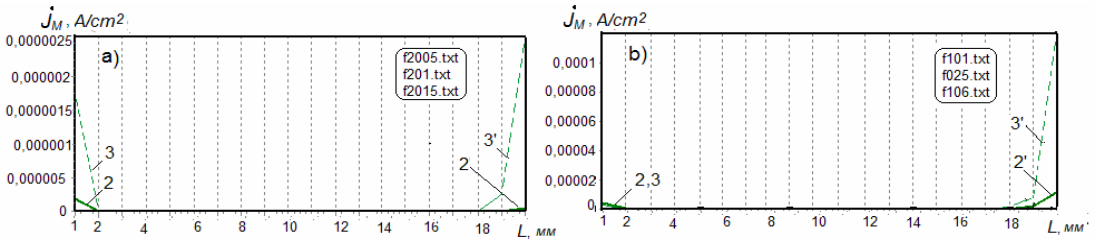


Рис. 4. Распределение плотности тока реакции Fe(II)→ Fe на ПТЭ при различных плотностях габаритного тока и скорости протока электролита (см/с):
а – 0,5; б – 1

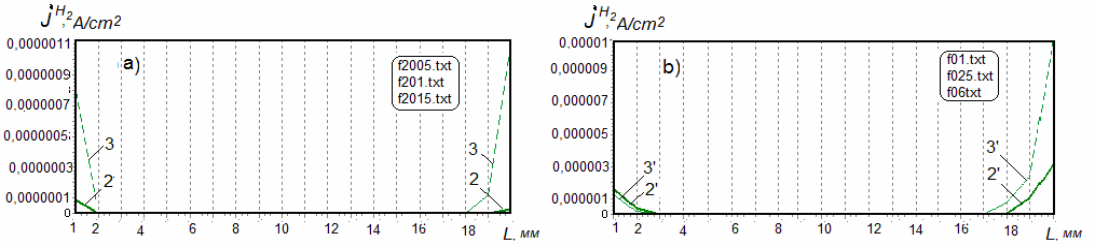


Рис. 5. Распределение плотности тока реакции $2H^+ \rightarrow H_2$ на ПТЭ при различных плотностях габаритного тока и скорости протока электролита (см/с):
а – 0,5; б – 1

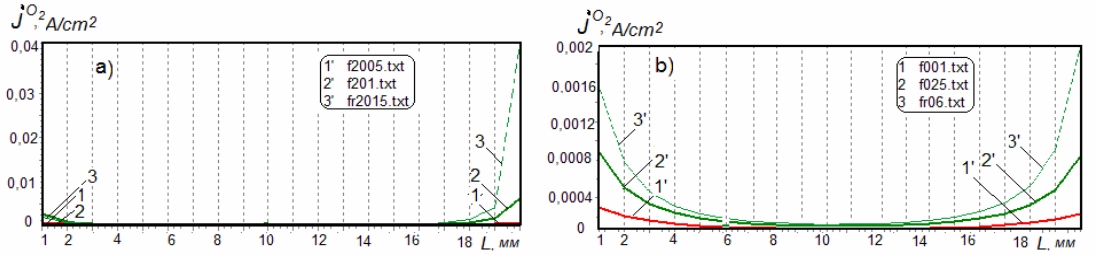


Рис. 6. Распределение плотности тока реакции восстановления молекулярного кислорода на ПТЭ при различных плотностях габаритного тока и скорости протока электролита (см/с):
а – 0,5; б – 1

Анализ полученных результатов, представленных на рис. 4–6, свидетельствует о том, что с ростом скорости протока электролита все приведенные выше электрохимические реакции сдвигаются в сторону фронтальной (ближайшей к противоэлектроду) стороне ПТЭ. Наиболее ярко выражено это явление при больших плотностях габаритного тока и малозначимо при малых плотностях.

Для всех использованных значений плотностей габаритного тока увеличение скорости протока приводит к росту поляризации ПТЭ по всей его толщине, при этом при больших скоростях протока электролита происходит сближение распределений потенциала для различных плотностей габаритного тока. Распределение процесса Fe(III)→Fe(II) по толщине электрода (см. рис. 5) более равномерно при больших скоростях протока электролита и средних значениях габаритной плотности тока.

При больших значениях плотности габаритного тока и скорости протока раствора процессы Fe(II)→ Fe и $2H^+ \rightarrow H_2$ локализуются на фронтальной стороне электрода, при меньшей скорости протока оба процесса протекают как на фронтальной, так и на тыльной стороне ПТЭ. Отметим, что при плотности тока, меньшей 0,1 А/см^2, процессы восстановления двухвалентного железа до металла и ионов водорода не реализуются.

Парциальная плотность тока реакции восстановления кислорода практически симметрично распределяется по толщине ПТЭ при скорости протока электролита, равной или меньшей 0,5 см/с, и почти целиком смещается во фронтальную область ПТЭ при скорости протока электролита, большей или равной 1 см/с.

В целом, распределение электрохимических функций – потенциала и парциальных плотностей тока – по толщине электрода не противоречит результатам теоретических исследований процессов в трехмерных проточных электродах [1], что косвенно подтверждает работоспособность математической модели.

Вывод. Рассмотренная математическая модель и выполненные с ее помощью исследования позволяют изучать катодные реакции, связанные с регенерацией электролитов железнения в результате реакции Fe(III)→ Fe(II) и сопровождающиеся протеканием на проточном трехмерном электроде параллельных реакций осаждения металлического железа, восстановления ионов водорода и молекулярного кислорода.

Список литературы

1. Варенцов, В.К. Окислительно-восстановительные процессы на проточных трехмерных электродах. Математическое моделирование. Теория. Эксперимент / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2020. – 172 с.

2. Варенцов, В.К. Углеродные волокнистые электроды: свойства, модификация, процессы и электролизеры. Математическое моделирование и оптимизация / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2021. – 176 с.

3. Кузина, В.В. Математические модели в задачах вольтамперометрического анализа / В.В. Кузина, А.П. Замятин, А.Н. Кошев // Экологические системы и приборы – 2006. – № 8. – С.37-41.

4. Варенцов, В.К. Процессы совместного электроосаждения золота и серебра из сернокислых растворов на проточном электроде / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, И.Ф. Сухов // Теоретические основы химической технологии. – 2018. – Т. 52, № 4. – С. 391–402.

5. Кошев, А.Н. Математическое моделирование и теория распределения поляризации в электрохимических реакторах с проточными объемно-пористыми катодами / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов, М.А. Чиркина, В.Г. Камбург // Математическое моделирование. – 2011. – Т. 23, №8. – С. 110–126.

References

1. Varentsov, V.K. Redox processes on flowing three-dimensional electrodes. Mathematical modeling. Theory. Experiment / V.K. Varentsov, A.N. Koshev, V.I. Varentsova, V.V. Kuzina. – Penza: PGUAS, 2020. – 172 p.

2. Varentsov, V.K. Carbon fiber electrodes: properties, modification, processes and electrolyzers. Mathematical modeling and optimization / V.K. Varentsov, A.N. Koshev, V.I. Varentsova, V.V. Kuzina. – Penza: PGUAS, 2021. – 176 p.

3. Kuzina, V.V. Mathematical models in problems of voltammetric analysis / V.V. Kuzina, A.P. Zamyatin, A.N. Koshev // Ecological systems and devices. – 2006. – No. 8. – P.37–41.

4. Varentsov, V.K. Processes of joint electrodeposition of gold and silver from sulfuric acid solutions on a flowing electrode / V.K. Varentsov, A.N. Koshev, I.F. Sukhov // Theoretical foundations of chemical technology. – 2018. – Vol. 52, No. 4. – P. 391–402.

5. Koshev, A.N. Mathematical modeling and the theory of polarization distribution in the electrochemical reactors with flow-through three-dimensional cathodes. / A.N. Koshev, V.K. Varentsov, M.A. Chirkina, V.G. Kamburg // Mathematical Modeling. – 2011. – Vol. 23, No. 8. – P. 110–126.

УДК 628.34 DOI 10.54734/20722958_2022_3_161

Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения РАН
Россия, 630128, Новосибирск, Кутателадзе, 18, тел.: (383) 332-40-02

Варенцов Валерий Константинович, доктор технических наук, профессор
E-mail: vvk@ngs.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

Кошев Александр Николаевич, доктор химических наук, профессор, действительный член Нью-Йоркской академии наук, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы»
E-mail: koshev@pguas.ru

Кузина Валентина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-вычислительные системы»
E-mail: kuzina@pguas.ru

Institute of Solid and Mechanochemistry of the Siberian Branch of RAS
Russia, 630128, Novosibirsk, 18, Kutateladze St. tel.: (383) 332-40-02.

Varentsov Valery Konstantinovich, doctor of technical Sciences, Professor
E-mail: vvk@ngs.ru

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

Koshev Aleksander Nikolaevich, Doctor of Chemistry Science, Professor, the full member of the New York Akademy of Sciences, Professor of the department «Information and computing systems»
E-mail: koshev@pguas.ru

Kuzina Valentina Vladimirovna, Candidate of Sciences, Associate professor of the department «Information and computing systems»
E-mail: kuzina@pguas.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОДАХ ПРИ РЕГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ЖЕЛЕЗНЕНИЯ

В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.В. Кузина

Представлено описание процессов стабилизации железосодержащих электролитов с низкими концентрациями электроактивных компонентов. Предложен метод безреагентной электрохимической технологии стабилизации состава таких электролитов, основанный на применении проточных трехмерных электродов (ПТЭ), в частности углеграфитовых волокнистых материалов (УВМ), позволяющих интенсифицировать процессы восстановления. Приведены результаты расчетов и экспериментальных исследований процесса электровосстановления железа, выполнен анализ результатов численного моделирования.

Ключевые слова: трехмерные проточные электроды, электровосстановление ионов железа, электроактивные компоненты, электролиз, численные расчеты параметров электролиза

DETERMINATION OF THE MAIN PARAMETERS OF ELECTROCHEMICAL PROCESSES IN FLOWING THREE-DIMENSIONAL ELECTRODES DURING THE REGENERATION OF IRON ELECTROLYTES

V.K. Varentsov, A.N. Koshev, V.V. Kuzina

The description of processes of stabilization of iron-containing electrolytes with low concentrations of electroactive components is presented. The method is proposed for a reagentless electrochemical technology for stabilizing the composition of such electrolytes, based on the use of three-dimensional flowing electrodes (FTE), in particular, carbon-graphite fibrous materials (CFM), which make it possible to intensify reduction processes. The results of calculations and experimental

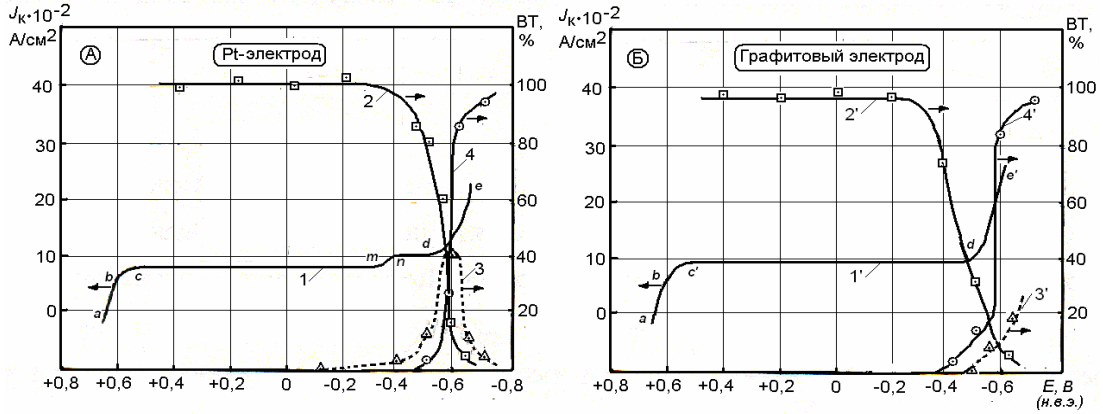
studies of the process of electroreduction of iron are presented, and the results of numerical simulation are analyzed.

Keywords: flowing three-dimensional electrodes, electroreduction of iron ions, electroactive components, electrolysis, numerical calculations of electrolysis parameters

При электрохимическом восстановлении ионов железа из различных электролитов протекает довольно быстрое окисление ионов Fe(II) до Fe(III), и возникает связанная с этим сложность получения качественных однородных покрытий. До настоящего времени проблема стабилизации условий электроосаждения железа и его сплавов и регенерации «окисленных» электролитов не утратила своей актуальности. Особенности катодных процессов в этих электролитах обусловлены образованием и накоплением избыточного количества OH^--ионов в прикатодной области, что приводит к локальному смещению pH в щелочную область относительно кислотности в объеме электролита. Ясно, что при наличии в электролите железнения ионов Fe(II) и Fe(III) и имеющейся разнице в значениях pH их гидратообразования ($Fe(II)_{гидр.}$ = 6,5...9,7; $Fe(III)_{гидр.}$ = 1,5...4,1) в первую очередь будут образовываться гидроксиды железа (Ш). Определенную роль в редокс-процессах играют другие факторы, связанные с анодными процессами окисления кислорода воздуха в поверхностных слоях электролита с последующей диффузией продуктов окисления в объем раствора. В этом случае в первую очередь будут образовываться гидроксиды железа (Ш), что обусловливает повышенную вероятность захвата (включения) образующихся коллоидных частиц электрохимически осаждаемых покрытий и ухудшение их физико-механических свойств [1].

Для стабилизации работы железосодержащих электролитов предложены методы, включающие введение различных стабилизирующих добавок органической или неорганической природы, мембранного разделения анодного и катодного пространств, и др. Обычно применяемый электрохимический процесс «проработки» окисленных электролитов железнения энергоемок и длителен во времени. Одним из факторов, способствующих восстановлению таких электролитов, является выделяющийся на катоде водород. Нами предложена безреагентная электрохимическая технология стабилизации состава железосодержащих электролитов с низкими концентрациями электроактивных компонентов, основанная на применении проточных трехмерных электродов (ПТЭ), в частности углеграфитовых волокнистых материалов (УВМ), позволяющих интенсифицировать эти процессы [2].

Поляризационные исследования совместно с данными выхода по току показали (см. рисунок), что выход по току реакции $Fe(III) \xrightarrow{+e} Fe(II)$ при использовании платинового электрода при потенциалах +0,6 до (–0,2)…(–0,3) В близок к 100%, а при дальнейшей катодной поляризации начинает снижаться. Одновременно начинается выделение водорода (при E0 В), количество которого возрастает. Затраты количества электричества при этом обусловливаются этими двумя конкурирующими процессами вплоть до потенциала начала выделения металла [3].



Изменение потенциала (1, 1’) реакций на платиновом (А) и графитовом (Б) электродах и выхода по току (ВТ):
$Fe(III) + e \rightarrow Fe(II)$, (крив. 2, 2’); $2H^+ + 2e \rightarrow H_2$ (крив.3, 3’); $Fe(II) - 2e \rightarrow Fe^o$ (крив. 4, 4’)

Вместе с тем на этом электроде отмечено некоторое количественное возрастание выхода по току реакции $Fe(III) \xrightarrow{+e} Fe(II)$ свыше 100%. Возможной причиной этого являются каталитические свойства платиновой поверхности, способствующие образованию атомарного водорода, который является восстановителем по отношению к ионам Fe(III). Однако доля этой реакции по сравнению с чисто электрохимической реакцией $Fe(III) \xrightarrow{+e} Fe(II)$ мала и, согласно нашей оценке, находится в пределах 5…7%.

Зависимость выхода по току реакции $Fe(III) \xrightarrow{+e} Fe(II)$ от потенциала на графитовом электроде снижается более резко. По-видимому, это связано с тем, что на поверхности графита не наблюдается эффекта, приводящего к восстановлению железа за счет водорода, и выход по току процесса $Fe(III) \xrightarrow{+e} Fe(II)$ в области потенциалов до начала выделения металлического железа близок, или находится несколько ниже, 100%.

С началом выделения металлического железа при потенциалах (–0,43)…(–0,45) В выход по току процесса восстановления ионов Fe(III) резко падает, оставаясь в пределах лишь нескольких процентов, так как превалирует основная реакция восстановления ионов Fe(II) до металла. Кривая выхода по току водорода на Pt-электроде проходит через максимум и также снижается до значений 5…10% по мере смещения потенциалов в электроотрицательную область.

Таким образом, последовательность протекания реакций, происходящих при катодной обработке железосодержащего электролита в рассматриваемой нами области потенциалов можно представить следующим образом. При E+0,64 В начинается процесс перехода $Fe(III) \xrightarrow{+e} Fe(II)$, который от потенциала +0,6 В идет с выходом по току, близким к 100%. Отрицательнее потенциала E_0 В на платиновой поверхности начинается выделение водорода, которое становится все более интенсивным вплоть до начала осаждения металлического железа. На графитовом же электроде, в отличие от платинового, выделение водорода начинается значительно позже (при потенциале более отрицательном, чем –0,4 В). Наличие широкой области потенциалов, которая составляет около 1 В и в которой целевая реакция $Fe(III) \xrightarrow{+e} Fe(II)$ протекает с высоким выходом по току, близким к 100%, свидетельствует о возможности эффективного использования УВЭ для проведения этого процесса в электролитах железнения [1,3].

На работу объемно-пористых электродов одновременно оказывает влияние множество взаимосвязанных факторов: кинетические параметры процесса, гидродинамические условия, характеристики применяемых УВМ и другие факторы, что усложняет изучение закономерностей электрохимических процессов. Одним из эффективных методов исследования закономерностей работы ПТЭ является метод математического моделирования [3], позволяющий описать процессы, которые происходят в объеме таких электродов. Кроме того, с помощью этого метода появляется возможность предсказать изменение основных технологических параметров, влияющих на изучаемый процесс, и оптимизировать условия электролиза.

Электрохимические процессы, происходящие в проточных трехмерных электродах из углеграфитовых волокнистых материалов при регенерации электролитов железнения, – электровосстановление ионов трехвалентного железа до двухвалентного и двухвалентного железа до металла, – как правило, сопровождаются побочными электрохимическими реакциями с участием ионов водорода и молекулярного кислорода. Такую электрохимическую систему необходимо рассматривать как поликомпонентную, жидкая фаза которой содержит четыре компонента, которые могут участвовать в электродных реакциях: Fe^{+3}, Fe^{+2}, H^+, O_2 [2, 4].

Для проведения численных расчетов необходимы значения ряда физических и кинетических параметров, характеризующих исследуемую систему, в которой могут протекать следующие реакции: $Fe(III) \xrightarrow{+e} Fe(II)$; $Fe(II) \xrightarrow{+2e} Fe^0$; $2H^+ \xrightarrow{+2e} H_2$; $O_2 \xrightarrow{2e+2H^+} H_2O_2 \xrightarrow{2e+2H^+} 2H_2O$.

Расчеты производились применительно к электролиту, содержащему ионы Fe(II) в количестве 2,5 моль/л, при этом концентрация ионов Fe(III) варьировалась в пределах

от $1{,}8\cdot10^{-3}$ до $1{,}8\cdot10^{-1}$ моль/л. Измеренное значение электропроводимости раствора составило $\chi_ж = 0{,}14$ См/см. В качестве электрода были выбраны соответствующие ПТЭ из УВМ марки ВИНН-250, для которого взяты известные параметры S_v , χ и $\in$ и учитывалось их изменение при сжатии образцов материала в 2 раза. Они составляли: электропроводность материала $\chi_г = 0{,}1$ См/см, удельная реакционная поверхность $S_v = 280$ см^2/см^3, радиус нити волокна $r = 0{,}45\cdot10^{-3}$ см, пористость материала $\varepsilon = 0{,}9$, плотность волокна $\rho = 1{,}5$, толщина электрода $L = 0{,}5$ см. Такие параметры, как j, u, варьировались в заданных пределах для получения соответствующих зависимостей.

Начальные значения электрохимических параметров процессов были взяты из справочной литературы, а затем уточнялись с помощью методов, описанных в работах [5, 6]. Значения основных параметров и констант, использованных при проведении численных расчетов, приведены в таблице.

Кинетические параметры для численных расчетов электрохимических процессов электролиза железосодержащего электролита

Компоненты/ константы	Концентр. C, г/см^3	Стационарный потенциал, E, В	Ток обмена, J_0, А/см^2	Коэфф. переноса, K_m	Коэффициент диффузии, D, см/с
$Fe^{(III)}\rightarrow Fe^{(II)}$	$1\cdot10^{-4}$	0,65	$2\cdot10^{-2}$	0,6	$5\cdot10^{-6}$
$Fe^{(II)}\rightarrow Fe^{(0)}$	$1{,}4\cdot10^{-1}$	–0,5 – (–0,6)	$6\cdot10^{-6}$	0,43	$6\cdot10^{-6}$
Кислород	$2\cdot10^{-5}$	0,4 – 0,5	$1\cdot10^{-10}$	0,5	$3\cdot10^{-6}$
Водород	–	–0,1 – (–0,2)	$1\cdot10^{-6}$	0,5	–

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что с ростом скорости протока электролита все приведенные выше электрохимические реакции сдвигаются в сторону фронтальной (ближайшей к противоэлектроду) стороне ПТЭ. Наиболее ярко выражено это явление при больших плотностях габаритного тока и малозначимо при малых плотностях.

Для всех использованных значений плотностей габаритного тока увеличение скорости протока приводит к росту поляризации ПТЭ по всей его толщине, при этом при больших скоростях протока электролита происходит сближение распределений потенциала для различных плотностей габаритного тока. Распределение процесса Fe(III)→ Fe(II) по толщине электрода более равномерно при больших скоростях протока электролита и средних значениях габаритной плотности тока.

При больших значениях плотности габаритного тока и скорости протока раствора процессы Fe(II) → Fe и $2H^+ \rightarrow H_2$ локализуются на фронтальной стороне электрода, при меньшей скорости протока оба процесса протекают как на фронтальной, так и на тыльной стороне ПТЭ. Отметим, что при плотности тока, меньшей 0,1 А/см^2, процессы восстановления двухвалентного железа до металла и ионов водорода не реализуются.

Парциальная плотность тока реакции восстановления кислорода практически симметрично распределяется по толщине ПТЭ при скорости протока электролита, равной или меньшей 0,5 см/с, и почти целиком смещается во фронтальную область ПТЭ при скорости протока электролита, большей или равной 1 см/с.

В заключение отметим, что изложенные в статье результаты подтверждают основные положения теории электродных процессов в проточных трехмерных электродах, а предложенные методы математического моделирования могут использоваться для изучения закономерностей функционирования ПТЭ при протекании многостадийных реакций с учетом восстановления ионов водорода и молекулярного кислорода.

Список литературы

1. Варенцов, В.К. Использование углеродных волокнистых материалов для восстановления окисленных электролитов железнения / В.К. Варенцов, О.В. Ковалева // Электронная обработка материалов. – 1988. – №3. – С. 55–58.

2. Ковалева, О.В. Изучение восстановления быстроокисляющихся электролитов железнения на углеродных волокнистых электродах / О.В. Ковалева, В.К. Варенцов // Изв. АН МССР. – Сер. физ.-техн. и матем.наук. – 1987. – №3. – С. 33–37.

3. Кошев, А.Н. Математическое моделирование процессов в проточном трехмерном электроде с учетом реакций, предшествующих восстановлению ионов металлов до металлической фазы / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов // Электрохимия. – 2015. – № 2. – С. 137–144.

4. Ковалева, О.В. Изучение кинетических закономерностей восстановления ионов Fe(III) до Fe(II) в концентрированных электролитах / О.В. Ковалева // Revista ştiinţifică a Universităţii de Stat din Moldova «Studia Universitatis», Seria «Ştiinţe ale Naturii». – 2013. – No. 6(26). – P. 195–203.

5. Кузина, В.В. Математические модели в задачах вольтамперометрического анализа / В.В. Кузина, А.П. Замятин, А.Н. Кошев // Экологические системы и приборы. – М.: Научтехлитиздат, 2006. – № 8. – С.37–41.

6. Гвоздева, И.Г. Математическое и численное моделирование электрохимических процессов в проточном трехмерном электроде / И.Г. Гвоздева, А.Н. Кошев, В.К. Варенцов, В.В. Кузина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2021. – Т. 10, № 4 (56). – С. 16–20.

References

1. Varentsov, V.K. The use of carbon fiber materials for the recovery of oxidized iron electrolytes / V.K. Varentsov, O.V. Kovaleva // Electronic processing of materials. – 1988. – No. 3. – P. 55–58.

2. Covaliova, O.V. The study of the reduction of rapidly oxidizing iron plating electrolytes on the carbonic fibrous electrodes. / O.V. Covaliova, V.K. Varentsov // Proceedings of Academy of Sciences MSSR, Physico-Technical and Mathematical Series. – 1987. – No. 3. – P. 33–37.

3. Koshev, A.N. Mathematical modeling of processes in a flowing three-dimensional electrode taking into account the reactions preceding the reduction of metal ions to a metallic phase / A.N. Koshev, V.K. Varentsov // Electrochemistry, 2015. – No. 2. – P. 137–144.

4. Kovaleva, O.V. Study of the kinetic regularities of the reduction of Fe(III) ions to Fe(II) in concentrated electrolytes / O.V. Kovaleva // Revista ştiinţifică a Universităţii de Stat din Moldova «Studia Universitatis», Seria «Ştiinţe ale Naturii». – 2013. – No. 6(26). – P. 195–203.

5. Kuzina, V.V. Mathematical models in problems of volammetric analysis / V.V. Kuzina, A.P. Zamyatin, A.N. Koshev // Ecological systems and devices. – M.: Nauchtehlitizdat, 2006. –No. 8. – P. 37–41.

6. Gvozdeva, I.G. Mathematical and numerical modeling of electrochemical processes in a three-dimensional flow electrode / I.G. Gvozdeva, A.N. Koshev, V.K. Varentsov, V.V. Kuzina // XXI century: results of the past and problems of the present plus. – 2021. – V. 10, No. 4 (56). – P. 16–20.

УДК 697.341 DOI 10.54734/20722958_2022_3_166

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

Леонтьев Виктор Александрович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»
E-mail: tgv@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

Leontiev Victor Aleksandrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Heat, Gas Supply and Ventilation»
E-mail: tgv@pguas.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БАЛАНСОВОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ПОТРЕБЛЕННОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

В.А. Леонтьев

На основе исследования объемов выработки, передачи и распределения отпущенной потребителям тепловой энергии на нужды отопления и горячего водоснабжения в отопительный и неотопительный периоды года проведена оценка расчетов потребленной тепловой энергии с использованием существующего балансового метода расчета потребленной тепловой энергии. Фактические объемы потребления тепловой энергии определяются с учетом только фактической температуры наружного воздуха, общий договорный объем тепловой энергии при распределении не учитывается. Для повышения точности вычисления объемов тепловой энергии балансовым методом рекомендуется использовать коэффициент потребления тепловой энергии.

Ключевые слова: теплоэнергетика, производство и распределение тепловой энергии, тепловые сети, потребители без узла учета тепловой энергии, балансовый метод, оценка эффективности

IMPROVEMENT OF THE BALANCE METHOD OF CONSUMED THERMAL ENERGY CALCULATION

V.A. Leontiev

Based on the study of generation volumes, transmission and distribution of the released thermal energy to consumers for the needs of heating and hot water supply in the heating and non-heating periods of the year, an assessment of calculations of consumed thermal energy was carried out using the existing balance method of calculating the consumed thermal energy. The actual volumes of thermal energy consumption are determined taking into account the actual outdoor temperature only, the total contractual volume of thermal energy is not taken into account during distribution. To increase the accuracy of calculating the volumes of thermal energy by the balance method, it is recommended to use the coefficient of thermal energy consumption.

Keywords: heat power engineering, production and distribution of thermal energy, heating networks, consumers without a heat metering unit, balance method, efficiency assessment

Проведение ряда исследований крупных систем теплоснабжения, к которым подключено более 1000 потребителей, выявило наличие трех типов потребителей тепловой энергии. Первый тип – потребители тепловой энергии, у которых установлен узел учета тепловой энергии, второй тип – потребители, у которых отсутствует узел учета тепловой энергии, и третий тип – потребители, у которых узел учета тепловой энергии установлен не на границе эксплуатационной ответственности. Особенности устройства узлов учета тепловой энергии у последних двух категорий потребителей связаны с техническими возможностями тепловых энергоустановок, присоединенных

к тепловым сетям. Кроме того, проведенные исследования выявили расход тепловой энергии на компенсацию тепловых потерь через изоляцию трубопроводов, а также расход тепловой энергии на собственные нужды источника тепла.

Таким образом, для достоверного расчета потребленной тепловой энергии каждым абонентом системы теплоснабжения целесообразно использовать балансовый метод [1]. Известно, что данный метод часто создает конфликтные ситуации между теплоснабжающей организацией и потребителем, причиной которых является несовершенство методики расчета тепловой энергии. Однако при наличии в числе потребителей тепловой энергии жилого фонда без узлов учета тепловой энергии использовать методику расчета по нагрузке неправомерно [2, 4].

Исследуемая система теплоснабжения представляет собой следующую технологическую цепочку: источник тепловой энергии – ТЭЦ, далее по двум тепловыводам – тепловой магистрали № 1 и тепловой магистрали № 2 – тепловая энергия передается потребителям. Магистраль № 1 двухтрубная с диаметром головного участка 800 мм. Магистраль № 2 трехтрубная, один подающий трубопровод с диаметром головного участка 700 мм и два обратных трубопровода диаметром 500 мм. Система теплоснабжения закрытая, теплоносителем является перегретая вода с параметрами 150^0C/70^0C. Коммерческие узлы учета тепловой энергии установлены на тепловыводах ТЭЦ и на трубопроводах подпитки теплосети. Теплопотребляющие установки потребителей подключены непосредственно к тепломагистралям. Потребителями тепловой энергии исследуемой системы теплоснабжения являются 40 юридических лиц, 36 из которых оборудованы узлами учета тепловой энергии, и 6 объектов, использующихся для собственных нужд ТЭЦ. Наиболее крупным потребителем (более 95 % тепловой энергии) является муниципальное предприятие жилищно-коммунального хозяйства, в эксплуатации предприятия находятся многоквартирные жилые дома, для которых приобретается тепловая энергия для нужд отопления и приготовления горячей воды. Узлы коммерческого учета тепловой энергии в жилых домах и точках подключения муниципального предприятия ЖКХ к тепловым сетям отсутствуют. Юридические лица используют тепловую энергию для отопления, т.е. только в отопительный период, также для отопления тепловая энергия используется объектами собственных нужд источника тепла. Муниципальное предприятие ЖКХ, как отмечалось выше, потребляет тепловую энергию круглогодично.

Ниже приводятся результаты расчетов потребления тепловой энергии абонентами ТЭЦ в отопительном периоде с ноября 2020-го по март 2021 года с использованием традиционной методики балансового метода [4]. Расчеты выполнялись для предприятия ЖКХ, так как это предприятие потребляет наибольшее количество тепловой энергии в круглогодичном режиме.

Исходными данными для расчетов послужили: тепловая нагрузка на отопление и горячее водоснабжение, указанные в договоре на теплоснабжение, фактическая температура наружного воздуха и фактическое время работы тепловых энергоустановок в расчетном месяце. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Объем потребления тепловой энергии, определенный балансовым методом

Договорные нагрузки		Фактическая среднесуточная температура наружного воздуха, ^{0}C	Время работы систем отопления и вентиляции, ч	Объем полученной потребителем тепловой энергии, Гкал
Отопление, Гкал/ч	ГВС, Гкал/ч			
1	2	3	4	5
Ноябрь 2019 г.				
153,48	40,88	-3,2	720	78830,25
Декабрь 2019 г.				
153,48	40,88	-8	744	92967,29

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
Январь 2020 г.				
153,48	40,88	-11,5	744	101299,36
Февраль 2020 г.				
153,48	40,88	-7,9	672	83747,3
Март 2020 г.				
153,48	40,88	-1,01	744	76470,88
Апрель 2020 г.				
153,48	40,88	6,8	522	49745,52
Всего:				**483060,6**

Использованный выше балансовый метод определения объема полученной потребителями тепловой энергии не учитывает общий договорный объем поставок тепловой энергии потребителям, не имеющим узлов учета тепловой энергии за расчетный месяц.

Для повышения объективности расчетов объемов полученной потребителями тепловой энергии введем в методику расчета балансовым методом коэффициент распределения тепловой энергии. Данный коэффициент является удельной величиной, которая показывает объем тепловой энергии договорного объема поставки тепловой энергии, приходящийся на соответствующего потребителя, и вычисляется по формуле

$$k = \frac{Q_{\text{дог. потр б/уут}}}{SQ_{\text{потр б/уут}}},$$

где $Q_{\text{дог. потр б/уут}}$ – договорный объем поставок тепловой энергии потребителю, не имеющему узла учета тепловой энергии за расчетный месяц, Гкал; $\Sigma Q_{\text{дог. потр б/уут}}$ – общий договорный объем поставок тепловой энергии потребителям, не имеющим узлов учета тепловой энергии за расчетный месяц, Гкал.

Объем потребленной тепловой энергии, Гкал, для каждого потребителя, не имеющего узла учета тепловой энергии, определяется путем умножения коэффициента распределения тепловой энергии k на договорный объем поставок тепловой энергии для соответствующего потребителя. Тогда объем потребленной тепловой энергии потребителями, не оборудованными узлами учета тепловой энергии, будет определяться исходя из разности между объемом тепловой энергии, отпущенной с источника теплоты, и объемом, установленным по приборам учета, которые имеются у потребителей. При этом используется коэффициент распределения тепловой энергии потребителям, у которых отсутствуют приборы учета, пропорционально договорному объему поставки тепловой энергии, указанному в договоре на поставку тепловой энергии.

На основе приведенного выше порядка расчета определен объем поставленной тепловой энергии на границе балансовой принадлежности сетей теплоснабжающей организации и муниципального предприятия ЖКХ за период времени и с исходными данными, использованными при расчетах стандартным балансовым методом.

Объемы поставленной тепловой энергии с учетом коэффициента распределения тепловой энергии приведены в табл. 2.

Таблица 2

Объем потребления тепловой энергии, определенный балансовым методом с учетом коэффициента распределения тепловой энергии

Объем тепловой энергии, отпущенной источником тепловой энергии, Гкал	Потери через теплоизоляцию теплопроводов магистралей с учетом фактических температур, Гкал	Фактическая среднесуточная температура наружного воздуха, ^{0}С	Объем потребленной тепловой энергии потребителями, имеющими узел учета тепловой энергии, Гкал	Объем тепловой энергии, потребленный объектами хозяйственных нужд ТЭЦ, Гкал	Коэффициент потребления тепловой энергии	Объем полученной потребителем тепловой энергии, Гкал
Ноябрь 2019 г.						
64332	6125	-3,2	1168,06	86	0,997	56764,41
Декабрь 2019 г.						
80558	7388	-8	1766,76	112	0,996	71033,29
Январь 2020 г.						
86612	7858	-11,5	2222,86	128	0,997	76165,61
Февраль 2020 г.						
73204	6670	-7,9	2263,27	100	0,997	63955,85
Март 2020 г.						
61203	6002	-1,01	1618,35	80	0,997	53329,16
Апрель 2020 г.						
41023	4270	6,8	859,36	34	0,998	35771,0
Всего:						**357019,32**

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Использование традиционного балансового метода расчета приводит к завышению полученных объемов тепловой энергии на 26 %.
2. Для повышения объективности расчета объемов тепловой энергии, поставленной потребителям, не имеющим узлов учета тепловой энергии, предлагается применять коэффициент потребления тепловой энергии. Использование данного коэффициента также не ущемляет права теплоснабжающей организации, так как учитывает фактические объемы тепловой энергии, отпущенной с коллекторов источника тепла, и договорную нагрузку всех потребителей системы теплоснабжения, не имеющих узлов учета тепловой энергии.
3. Предлагаемый подход позволяет усовершенствовать балансовый метод учета применительно к потребителям тепловой энергии, у которых отсутствуют узлы учета тепловой энергии.
4. Применение усовершенствованного метода учета возможно только в тех системах теплоснабжения, в которых источник тепла оборудован узлом учета тепловой энергии.

Список литературы

1. Рубан, Т.П. Оценка методов расчета потребленной тепловой энергии и повышение энергетической эффективности в сфере ЖКХ / Т.П. Рубан, Т.И. Поликарпова // Проблемы современной экономики. – 2012. – №7. – С.318.
2. Федеральный закон «О теплоснабжении» от 27.07.2010 № 190-ФЗ в действующей редакции.

3. Постановление Правительства РФ от 08.08.2012 №808 (ред. от 14.02.2020) «Об организации теплоснабжения в Российской Федерации и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации».

4. Правила коммерческого учета тепловой энергии, теплоносителя (с изменениями от 13 февраля 2019г.), утверждены Постановлением Правительства РФ от 18 ноября 2013г. №1034.

5. СП 124.13330.2012. Тепловые сети.

6. Диксон, Дж. Проектирование систем: изобретательство, анализ, принятие решений / Дж. Диксон; пер. с англ. В.Г.Коваленко. – М.: Мир, 2009. – 440 с.

References

1. Ruban, T.P. Evaluation of methods for calculating the consumed thermal energy and improving energy efficiency in the housing and communal services sector / T.P. Ruban, T.I. Polikarpova // Problems of modern economics. – 2012. – No.7. – P.318.

2. Federal Law On Heat Supply dated 27.07.2010 No. 190-FZ in the current version.

3. Decree of the Government of the Russian Federation No. 808 dated 08.08.2012 (ed. Dated 02/14/2020) On the Organization of Heat Supply in the Russian Federation and on Amendments to Certain Acts of the Government of the Russian Federation.

4. Rules of commercial accounting of thermal energy, heat carrier (as amended on February 13, 2019), approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated November 18, 2013 No. 1034.

5. SP 124.13330.2012. Heating networks.

6. Dixon, J. System design: invention, analysis, decision-making / J. Dixon; trans. with engl. V.G.Kovalenko – M.: Mir, 2009. – 440 p.

УДК 656.11 001.25(1-21) DOI 10.54734/20722958_2022_3_171

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

Домке Эдуард Райнгольдович,
кандидат технических наук, профессор кафедры «Организация и безопасность движения»

Жесткова Светлана Анатольевна,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация и безопасность движения»

Нелюбин Евгений Александрович,
магистрант

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

Domke Edward Raingoldovich,
Candidate of Sciences, Professor of the Department «Organization and Traffic Safety»

Zhestkova Svetlana Anatolievna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Organization and Traffic Safety»

Nelubin Evgeniy Aleksandrovich,
Undergraduate

РОЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВТОДОРОЖНОЙ АВАРИЙНОСТИ В РЕШЕНИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ РЕГИОНА

Э.Р. Домке, С.А. Жесткова, Е.А. Нелюбин

Приведены результаты анализа и прогнозирования автодорожной аварийности на примере Пензенского региона на основании статистических данных за 2011-2021 гг. Выявлены причины основных видов автодорожной аварийности и динамика их изменения.

Ключевые слова: строительство, градостроительство, планирование, безопасность движения, автодорожная аварийность, реализация

ROLE OF FORECASTING ROAD ACCIDENTS IN SOLVING CONSTRUCTION PROBLEMS IN THE PENZA REGION

E.R. Domke, S.A. Zhestkov, E.A. Nelubin

The article presents the analysis and forecasting of road accidents on the example of the Penza region, using statistical data for 2011-2021. The causes of the main types of road accidents and the dynamics of their changes are revealed.

Keywords: construction, urban planning, planning, traffic safety, road accidents, implementation

В условиях постоянного возрастания интенсивности дорожного движения высокий уровень аварийности на дорогах остается актуальной проблемой. На примере Пензенского региона с использованием статистических данных автодорожной аварийности за 2011–2021 гг. нами проведено исследование по выявлению причин основных видов автодорожных аварий и определена их дальнейшая динамика.

Опираясь на выявленные закономерности, с достаточной точностью сделан прогноз изменений основных показателей автодорожной аварийности в Пензенском регионе до 2035 года.

Основные показателя автодорожной аварийности в регионе с 2011 по 2021 гг. представлены в табл. 1.

Значительная часть ДТП происходит со столкновением ТС, наездом на пешеходов и опрокидыванием ТС.

В подавляющем большинстве случаев (64,3 %) причиной ДТП является несоблюдение водителями ПДД, а в 30,7 % – неудовлетворительные дорожные условия.

Таблица 1

Основные показателя автодорожной аварийности в регионе в период с 2011 по 2021 гг.

Год	Показатели аварийности		
	ДТП, шт.	ранено, чел.	погибло, чел.
2011	1824	2392	305
2012	2254	2941	296
2013	2431	3114	278
2014	2269	3034	255
2015	2097	2789	233
2016	1910	2670	237
2017	1934	2640	221
2018	1768	2490	196
2019	1568	2525	204
2020	1333	1829	161
2021	1601	2155	160

Зачастую одной из основных причин высокого уровня аварийности на дорогах считается бурный рост автомобилизации населения. На самом деле главная причина – несоответствие транспортно-эксплуатационных характеристик дорог и УДС населенных пунктов постоянно возрастающей интенсивности движения по ним ТС [1, 2].

В частности, в Пензенском регионе уровень автомобилизации населения (число автомобилей на тысячу жителей региона) повысился с 239 в 2011 году до 334 в 2021 году (рис. 1).

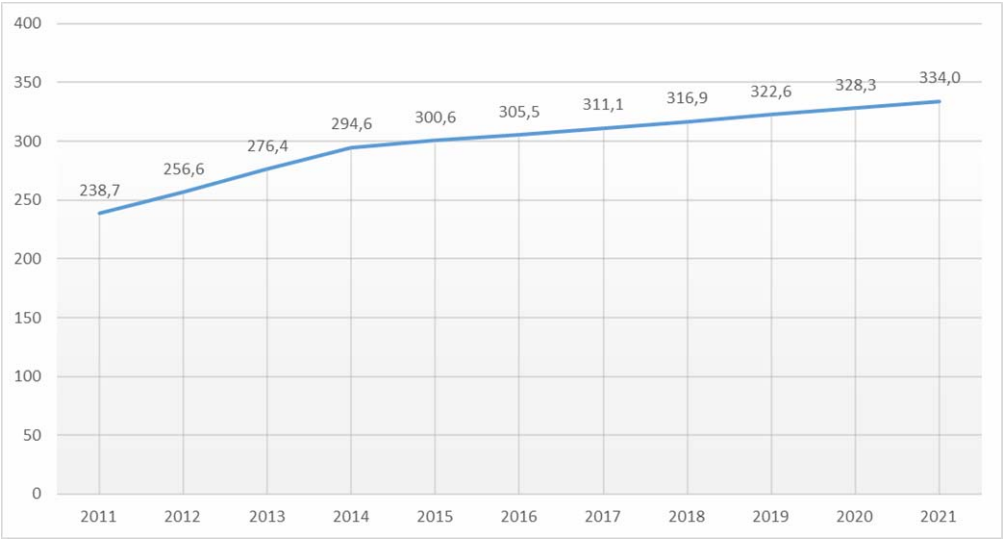


Рис. 1. Уровень автомобилизации в Пензенском регионе в период 2011–2021 гг.

В то же время смертность в результате ДТП была выше уровня автомобилизации населения (рис. 2) лишь до 2013 года, а затем по мере роста автомобилизации постепенно уменьшается. За проанализированный период смертность в результате ДТП снизилась на 47,54 % при увеличении уровня автомобилизации населения на 39,75 %. Ожидаемый порог насыщения населения региона автомобилями должен наступить к 2040 году.

Величины относительных показателей БДД в регионе с 2011 по 2021 гг. снизились:

– транспортный риск (количество погибших в ДТП в расчете на 10 тыс. ТС) на 28,5 %;

– социальный риск (количество погибших в ДТП в расчете на 100 тыс. населения региона) на 19,3 %.

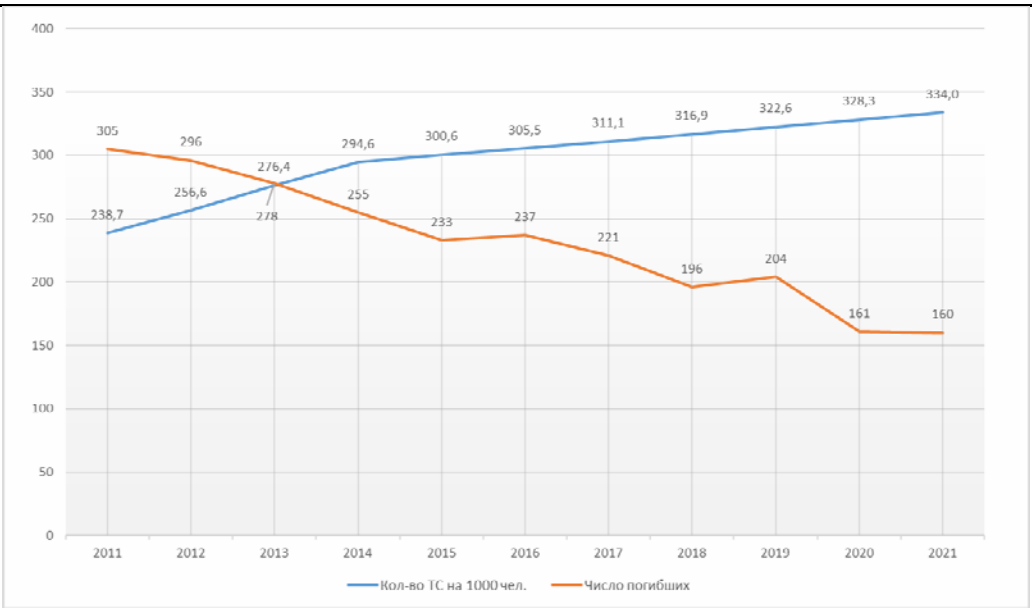


Рис. 2. Влияние уровня автомобилизации на смертность в ДТП в Пензенском регионе

Количество легковых автомобилей в регионе составляет 84,2 % от общего парка автомобилей.

Количество ДТП на сети автомобильных дорог общего пользования напрямую зависит от плотности автомобильных дорог, состояния дорожной сети, грузооборота и пассажирооборота на ней. На конец 2021 года в области зафиксировано 21472 грузовых и 365856 легковых автомобилей [3, 4].

Сведения о грузообороте и пассажирообороте представлены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические данные о работе транспорта региона

Год	Население, чел.	Количество ТС на 1000 чел.	Пассажирооборот, тыс.пасс. · км	Грузооборот, тыс. т · км
2011	1384006	239	1109	1706
2012	1376538	257	1387	1389
2013	1368637	276	1685	1391
2014	1360587	295	1806	1448
2015	1355618	301	1778	1554
2016	1348703	306	2377	1469
2017	1341526	311	2535	1554
2018	1331655	317	2639	1621
2019	1318103	323	2409	1495
2020	1305563	328	2172	1098
2021	1290898	334	786	1049

Приведенные в табл. 2 данные свидетельствуют, что в регионе наблюдается:

– постоянное медленное снижение численности населения при устойчивом и стабильном росте уровня автомобилизации;

– скачкообразное изменение грузооборота, а начиная с 2018 г. – его устойчивое снижение;

– резкое уменьшение пассажиропотока в последние два года.

Зависимость количества ДТП от указанных факторов выражается соотношением

$$N_{\text{дтп}} = 0,0343 P^{0.1896} \cdot G^{0.4090} \cdot Q^{0.2935}, \quad (1)$$

где $N_{\text{дтп}}$ – количество ДТП; P – плотность дорожной сети региона (км/1000 кв.км); G – грузооборот (тыс.т · км); Q – пассажиропоток (тыс.пасс. · км).

Из (1) видно, что количество ДТП в первую очередь зависит от грузооборота (коэффициент весомости 0,409), менее значимыми являются пассажиропоток (коэффициент весомости 0,2935) и плотность дорожной сети (коэффициент весомости 0,1896). Коэффициент множественной регрессии достаточно высокий и составляет 0,76 [5, 6].

Прогноз основных параметров автодорожной аварийности с 2021 до 2035 год определяется как

$$Y = aX + b, \tag{2}$$

где Y – общее количество ДТП / число раненых в ДТП / число погибших в ДТП; a, b – переменные коэффициенты;

$$a = Y_{\text{ср}} - bX_{\text{ср}}; \tag{3}$$

$$b = \frac{\sum (X - X_{\text{ср}})(Y - Y_{\text{ср}})}{\sum (X - X_{\text{ср}})^2}. \tag{4}$$

К уравнению (2) применяются так называемые коэффициенты погрешности, рассчитанные для каждого уравнения на основании факторов, напрямую влияющих на дорожно-транспортное происшествие. Так, для первого случая (общего показателя ДТП) был рассчитан коэффициент $k_{\text{ДТП}}$, равный 0,91–0,96, для второго (число раненых в ДТП) $k_{\text{ран}}$ = 0,98–1,08, для третьего (число погибших в ДТП) $k_{\text{погиб}}$= 1,019–1,9, с шагом 0,1. Выполнив вычисления, получили следующие данные (табл. 3).

Таблица 3

Результаты прогнозирования основных показателей автодорожной аварийности в Пензенском регионе

Год	Количество ДТП	Число раненых	Число погибших
2021	1601	2155	160
2022	1573,4	2141,5	153,0
2023	1539,2	2120,2	137,7
2024	1503,8	2093,7	124,5
2025	1471,9	2063,9	111,3
2026	1435,0	2031,7	98,1
2027	1398,3	1997,8	100,1
2028	1359,7	1963,2	88,3
2029	1322,7	2083,9	76,2
2030	1315,7	2034,8	66,0
2031	1285,4	2002,0	58,4
2032	1255,1	1969,9	50,6
2033	1224,9	1938,3	38,7
2034	1194,8	1907,1	24,5
2035	1164,6	1876,2	27,5

График прогноза автодорожной аварийности в регионе с 2021 по 2035 г. приведен на рис. 3.

Выводы

1. При сохранении выявленных закономерностей изменения основных показателей автодорожной аварийности в регионе с 2021 по 2035 год:

- снизится количество ДТП на 27,2 % (с 1601 в 2011 г. до 1184 в 2035 г.);
- число раненых в ДТП снизится на 12,9 % (с 2155 чел. в 2021 г. до 1876 чел. в 2035 г.);
- число погибших в ДТП снизится на 83,1 % (с 160 чел. в 2021 г. до 27 чел. в 2035 г.).

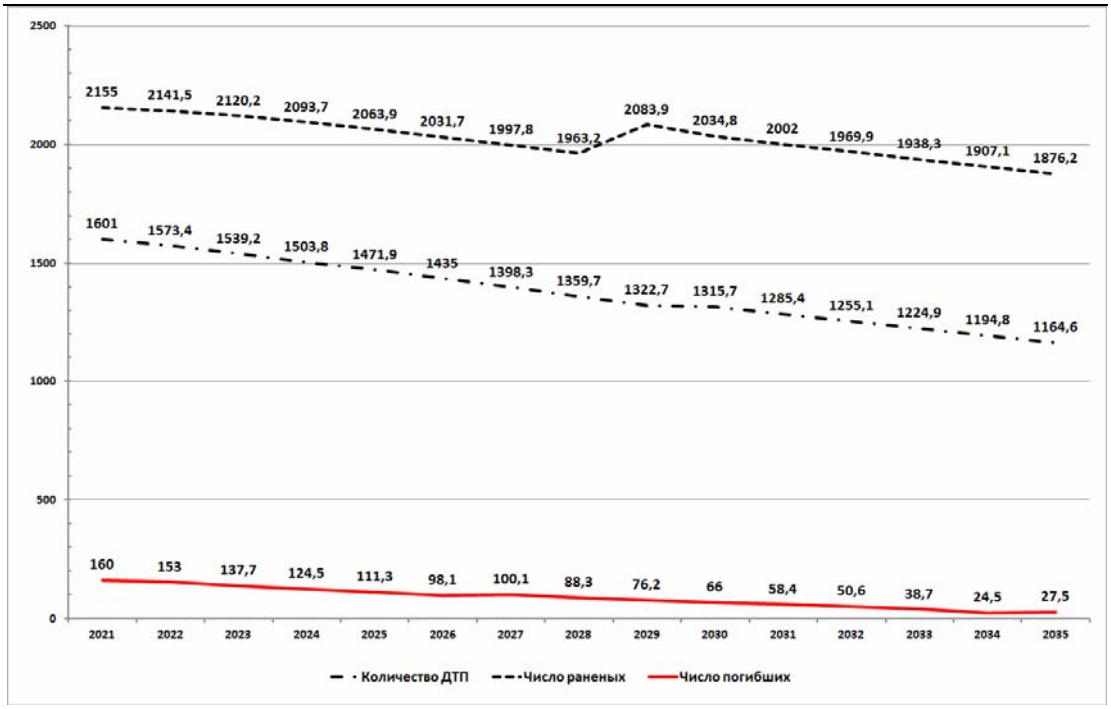


Рис. 3. Прогноз показателей автодорожной аварийности до 2035 года в Пензенском регионе

2. Предлагаемый метод прогнозирования позволит всем структурам, причастным к обеспечению БДД, оценить достаточность реализуемых мероприятий по повышению БДД.

3. Приведенные в п. 1 данные о снижении автодорожной аварийности в Пензенском регионе к 2035 г. обусловлены не только активизацией деятельности надзорных, правоохранительных и исполнительных структур, но и падением объемов грузовых и пассажирских перевозок, снижением эффективности эксплуатации отдельных видов ТС, повышением количества средств фото- и видеофиксации нарушений ПДД и т.д.

4. Прогнозирование автодорожной аварийности позволит актуализировать логистические задачи строительной отрасли региона.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 8 января 2018 года № 1-р «Об утверждении Стратегии безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018 – 2024 годы». – URL: https://ювао.мск.мвд.рф/document/12515517.

2. Постановление Правительства Российской Федерации «О порядке государственного учета показателей состояния безопасности дорожного движения» от 30 апреля 1997 г. №508. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_ doc_LAW_127459/.

3. Банушкина, Н.А. Особенности разработки экспертных систем в зависимости от класса объектов / Н.А. Банушкина // Известия Алт. гос. ун-та. – 2011. – 70 с.

4. Корчагин, В.А. Метод комплексной оценки уровня безопасности дорожного движения на дорожной сети / В.А. Корчагин, А.К. Погодаев, В.Э. Клявин, В.А. Суворов // Вестник МАДИ. – 2016. – №2 (45). – С. 88–94.

5. Капский, Д.В. Совершенствование метода прогнозирования аварийности по конфликтным ситуациям / Д.В. Капский, А.И. Рябчинский // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2016. – № 2 (45). – С. 94–103.

6. Корчагин, В.А. Повышение безопасности движения автомобилей на основе анализа аварийности и моделирования ДТП / В.А. Корчагин, С.А. Ляпин, В.Э. Клявин, В.В. Ситников // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 6–2. – С. 251–256.

7. Постановление Правительства Пензенской области от 19.08.2021 № 516-пП «О внесении изменений в государственную программу Пензенской области «Развитие территорий, социальной и инженерной инфраструктуры, обеспечение транспортных услуг в Пензенской области», утвержденную постановлением Правительства Пензенской области от 26.09.2013 № 724-пП (с последующими изменениями).

References

1. Decree of the Government of the Russian Federation No. 1-r dated January 8, 2018 «On Approval of the Road Safety Strategy in the Russian Federation for 2018 – 2024». – URL: https://ювао .Moscow.Ministry of Internal Affairs.rf/document/12515517.

2. Resolution of the Government of the Russian Federation «On the procedure for state accounting of road safety indicators» dated April 30, 1997 No. 508. – URL: http://www.consultant.ru/ document/cons_ doc_LAW_127459/.

3. Banushkina, N.A. Features of the development of expert systems depending on the class of objects / N.A. Banushkina // Izvestia Altai State University. – 2011. – 70 p.

4. Korchagin, V.A. Method of complex assessment of the level of road safety on the road network / V.A. Korchagin, A.K. Pogodaev, V.E. Klyavin, V.A. Suvorov // Bulletin of MADI. – 2016. – №2 (45). – P. 88–94.

5. Kapsky, D.V. Improving the method of predicting accidents in conflict situations / D.V. Kapsky, A.I. Ryabchinsky // Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI). – 2016. – No. 2 (45). – P. 94–103.

6. Korchagin, V.A. Improving vehicle traffic safety based on accident analysis and accident modeling / V.A. Korchagin, S.A. Lyapin, V.E. Klyavin, V.V. Sitnikov // Fundamental Research. – 2015. – № 6–2. – P. 251–256.

7. Resolution of the Government of the Penza Region dated 08/19/2021 No. 516-pP «On Amendments to the State Program of the Penza Region «Development of Territories, Social and Engineering Infrastructure, Provision of Transport Services in the Penza Region», approved by the Resolution of the Government of the Penza Region dated 09/26/2013 No. 724-pP (with subsequent amendments).

УДК 628.143 DOI 10.54734/20722958_2022_3_177

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

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие "Рубин"»
Россия, 440000, Пенза, Байдукова, 2,
тел.: +7-8412-20-48-08

Князев Владимир Александрович,
кандидат технических наук,
инженер 1-й категории

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

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

Joint Stock Company Research And Production Enterprise Rubin
Russia, 440000, Penza, 2, Baidukova,
tel: + 7-8412-20-48-08

Knyazev Vladimir Aleksandrovich,
Candidate of Sciences,
1st Category Engineer

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,
тел.: (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

НОВАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСТЕНОЧНОГО СЛОЯ ЛАМИНАРНОГО И ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ В НАПОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДАХ

С.Ю. Андреев, В.А. Князев, К.В. Лебединский

Приведены результаты теоретических исследований гидродинамических процессов, происходящих в пристеночном и переходном подслоях пристеночного слоя ламинарного и турбулентного потоков жидкости в технологических трубопроводах. Показано, что закономерности процессов течения жидкости как при ламинарном, так и при турбулентном режимах определяются гидродинамическими характеристиками вязкого пристеночного подслоя и переходного подслоя, совместно образующих пристеночный слой, непосредственно прилегающий к стенке трубы и граничащий с ядром потока жидкости. Получены математические зависимости, описывающие гидравлические характеристики пристеночного слоя. Использование разработанной методики расчета позволит оптимизировать процессы проектирования и эксплуатации напорных технологических трубопроводов.

Ключевые слова: пристеночный подслой, переходный подслой, пристеночный слой, ядро потока, число Никурадзе, диссипация энергии

NEW METHOD FOR CALCULATING HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE WALL LAYER OF LAMINAR AND TURBULENT FLUID FLOWS IN PRESSURE TECHNOLOGICAL PIPELINES

S.Yu. Andreev, V.A. Knyazev, K.V. Lebedinskiy

The results of theoretical studies of hydrodynamic processes occurring in the wall and transition sublayers of the wall layer of laminar and turbulent fluid flows in process pipelines are presented. It is shown that the regularities of fluid flow processes, both in laminar and turbulent modes, are determined by the hydrodynamic characteristics of a viscous wall sublayer and a transitional sublayer jointly forming a wall layer directly adjacent to the pipe wall and bordering the core of the fluid flow. Mathematical dependences describing the hydraulic characteristics of the wall layer are obtained. The use of the developed calculation methodology will optimize the design and operation of pressure technological pipelines.

Keywords: wall sublayer, transition sublayer, wall layer, flow core, Nikuradze number, energy dissipation

Одной из наиболее важных инженерных задач в практике расчета напорных технологических трубопроводов является задача, связанная с установлением закономерностей течения вязких жидкостей, описывающих распределение осредненных величин местных скоростей по радиусу поперечного сечения и потерь напора по длине трубопровода.

В настоящее время в качестве фундаментального соотношения гидродинамики используется логарифмический закон Кармана – Прандтля [1]

$$\frac{\overline{U}_y}{V_*} = \frac{1}{\varkappa}\ln\frac{V_* y}{\nu} + 5,5\,, \qquad (1)$$

где $\overline{U_y}$ – величина осредненной продольной местной скорости потока жидкости на расстоянии y, м, от стенки трубы, м/с; V_* – динамическая скорость (скорость касательного напряжения силы вязкого трения), м/с; ν – кинематический коэффициент вязкости, м^2/с; $\varkappa = 0,4$ – постоянная Кармана.

Выведенная на основе полуэмпирической теории турбулентного движения жидкости формула (1) не является универсальной. Она позволяет получить корректные результаты только при расчете гидравлически гладких труб и не описывает наиболее важной переходной области между гидравлически гладким и вполне шероховатым трением. Величина коэффициента 5,5 в формуле (1) при описании движения жидкости в переходной турбулентной области течения перестает быть константой и изменяет свое значение в зависимости от величины числа Рейнольдса [2].

Природа касательного напряжения силы вязкого трения, возникающего в турбулентном потоке жидкости, более сложна, чем природа ламинарного потока. В турбулентном потоке жидкости, в отличие от ламинарного потока, наблюдается интенсивное перемещение элементарных объемов жидкости в поперечном направлении.

Элементарные объемы жидкости перемещаются из пристеночной области турбулентного потока в его приосевую область и обладают меньшими продольными скоростями, чем перемещающиеся в обратном направлении объемы жидкости, что вызывает торможение жидкости в приосевой области.

В турбулентном потоке жидкости к касательному напряжению силы вязкого трения $\tau_в$, Па, добавляется касательное напряжение, обусловленное турбулентным перемешиванием $\tau_т$, Па, и величина касательного напряжения τ_y на расстоянии y, м, от стенки трубы может быть определена по формуле

$$\tau_y = \tau_в + \tau_т = \rho\nu\frac{d\overline{U}}{dy} - \rho\overline{U_x^{'}U_y^{'}}\,, \text{ Па}, \qquad (2)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3; $\frac{d\bar{U}}{dy} = G_y$ – градиент скорости потока жидкости на расстоянии y, м, от стенки трубы, с$^{-1}$; $U_x^{'}$ и $U_y^{'}$ – пульсационные компоненты местных скоростей продольного и поперечного движений жидкости, м/с.

Горизонтальная черта над символами $U_x^{'}$ и $U_y^{'}$ в уравнении 2 означает операцию усреднения.

Уравнение (2) было предложено О. Рейнольдсом в 1883 г.

Французский ученый Жозеф Буссинекс в статье, изданной в 1897 году, предложил величину касательного напряжения, вызванного турбулентным перемешиванием, определять по аналогии с законом вязкого трения Ньютона и ввел понятие кинематического коэффициента турбулентной вязкости (коэффициента турбулентного перемешивания) $\nu_т$, имеющего ту же размерность, что и кинематический коэффициент вязкости жидкости ν, м^2/с, но в отличие от него величина кинематического коэффициента турбулентной вязкости $\nu_т$ зависит от числа Рейнольдса Re, определяющего степень интенсивности турбулентного перемешивания, и расстояния от стенки русла потока y, м.

В этом случае уравнение (2) может быть записано в виде

$$\tau_y = \tau_в + \tau_т = \rho\nu\frac{d\bar{U}}{dy} + \rho\nu_т\frac{d\bar{U}}{dy} = \rho\frac{d\bar{U}}{dy}\left(\nu + \nu_т\right), \text{ Па.} \quad (3)$$

В работе [3] был рассмотрен вопрос о целесообразности введения в обиход термина «буссинексова вязкость» в честь Ж. Буссинекса и дальнейшего употребления его вместо термина «турбулентная вязкость».

В 1925 году известный немецкий ученый Л. Прандтль предложил полуэмпирическую теорию турбулентности, получившую в настоящее время широкое признание [1].

Прандтль выдвинул предположение о том, что турбулентный поток можно разделить на две различающиеся по своим свойствам области.

В пристеночной области турбулентного потока жидкости градиенты скорости G_y имеют существенную величину, и вязкостные напряжения силы трения значительно превышают напряжения, обусловленные турбулентным перемешиванием. На этом основании он предложил выделять в пристеночной области потока тонкий слой, называемый «ламинарным пограничным слоем», в котором движение жидкости формируется исключительно под действием силы вязкого трения.

В основной части турбулентного потока жидкости, названной им «ядром потока», силы вязкого трения имеют меньшую величину, чем напряжения, обусловленные турбулентным перемешиванием, которые и определяют структуру потока.

Исходя из этих соображений, Прандтль ввел понятие пути перемешивания в турбулентном потоке жидкости l, м, аналогичное понятию пути свободного пробега молекул газа в процессе их теплового движения, и принял два основных допущения, на которых базируется его теория:

1) величина касательного напряжения в рассматриваемой точке турбулентного потока жидкости имеет постоянное значение по его поперечному сечению, равное касательному напряжению сил вязкого трения:

$$\tau_y = \tau_* = Rig\rho, \text{ Па,} \quad (4)$$

где R – гидравлический радиус поперечного сечения потока, м; i – гидравлический уклон; $g = 9{,}8$ м/с^2 – ускорение свободного падения;

2) величина пути перемешивания в турбулентном потоке жидкости пропорциональна расстоянию от стенки русла потока y:

$$l = \varkappa y, \text{ м.} \quad (5)$$

В этом случае уравнение (2) может быть записано в виде

$$\tau_y = \tau_т = \rho l^2 \left(\overline{\frac{dU}{dy}} \right)^2 = \rho \varkappa^2 y^2 \left(\overline{\frac{dU}{dy}} \right)^2 = \tau_*, \text{ Па}, \tag{6}$$

откуда

$$V_*^2 = \frac{\tau_*}{\rho} = \varkappa^2 y^2 \left(\overline{\frac{dU}{dy}} \right)^2, \text{ м/с}, \tag{7}$$

где $V_* = \sqrt{\frac{\tau_*}{\rho}}$ – величина динамической скорости потока жидкости в пристеночном подслое.

Из (7) имеем

$$\overline{\frac{dU}{dy}} = \frac{V_*}{\varkappa y}, \text{ с}^{-1}. \tag{8}$$

Интегрируя (8), можно получить следующую формулу:

$$\frac{\overline{U_y}}{V_*} = \frac{1}{\varkappa} \ln y + C. \tag{9}$$

Пристеночный слой, имеющий толщину δ, включает в себя пристеночный подслой δ_* и переходный подслой δ_{**}.

$$\delta = \delta_* + \delta_{**}, \text{ м}. \tag{10}$$

Символы * и ** обозначают здесь и далее, что данная характеристика относится к рассматриваемым пристеночному и переходному подслоям жидкости.

В работе [4] отмечалось, что режим течения жидкости в пристеночном подслое определяется величиной локального числа Рейнольдса

$$\mathrm{Re}_\delta = \frac{U_y y}{\nu}, \tag{11}$$

где U_y – величина местной скорости потока жидкости на расстоянии y от стенки русла потока.

На границе пристеночного подслоя на расстоянии δ_* от стенки трубы величина локального критерия Рейнольдса имеет значение

$$\mathrm{Re}_\delta = \frac{V_* \delta_*}{\nu} = 1. \tag{12}$$

В пределах пристеночного подслоя, имеющего толщину δ_*, величины сил вязкого трения превышают значения сил инерции, вследствие чего величины градиента скорости и касательного напряжения силы вязкого трения имеют постоянное значение ($G_* = \text{const}; \tau_* = \text{const}$), а величина местной скорости изменяется от значения $U_y = 0$ у стенки русла до значения $U_y = V_*$ при $y = \delta_*$ по линейному закону [4].

$$U_y = G_* y. \tag{13}$$

При $y = \delta_*$ величина местной скорости потока жидкости на границе пристеночного подслоя имеет значение

$$U_{\delta_*} = G_* \delta_* = V_*, \text{ м/с}, \tag{14}$$

откуда

$$\frac{dU}{dy} = G_* = \frac{V_*}{\delta_*}, \text{ с}^{-1}. \tag{15}$$

Наряду с ламинарным и турбулентным движениями жидкости Л. Прандтль выделял и режим движения жидкости при Re<1, наблюдаемый в тонком пристеночном подслое, названный им «ползущим течением», при котором турбулентное перемешивание полностью отсутствует, а величина касательного напряжения определяется по формуле И. Ньютона [1]

$$\tau_* = \mu \frac{dU}{dy} = \rho \nu \frac{U_y}{y} = \rho V_*^2, \text{ Па}, \tag{16}$$

откуда

$$\frac{U_y}{V_*} = \frac{V_* y}{\nu}. \tag{17}$$

В соответствии с представлениями Л. Прандтля в непосредственной близости от стенки русла потока образуется тонкий пристеночный пограничный слой, в котором определяющую роль играют силы вязкого трения, граничащий с ядром потока и имеющий на границе перехода «пристеночный слой – ядро потока» величину местной скорости U_δ, отличную от значения динамической скорости V_*.

На границе пристеночного пограничного слоя формула (17) запишется в виде

$$\frac{\overline{U_\delta}}{V_*} = \frac{V_* \delta}{\nu} = N. \tag{18}$$

Число Никурадзе N по своей структуре аналогично критерию Рейнольдса Re, в связи с чем Л. Прандтлем было высказано предположение о том, что в условиях перехода от течения жидкости в пристеночном пограничном слое к течению жидкости в ядре потока число N должно иметь некоторое постоянное значение, и формула (18) может быть записана в виде

$$\delta = N \frac{\nu}{V_*}, \text{ м}. \tag{19}$$

Формула (9) для границы пристеночного слоя, находящегося на расстоянии δ от стенки трубы, в этом случае запишется в виде

$$\frac{\overline{U_\delta}}{V_*} = \frac{1}{\varkappa} \ln \delta_* + C, \tag{20}$$

откуда

$$C = \frac{\overline{U_\delta}}{V_*} - \frac{1}{\varkappa} \ln \delta \tag{21}$$

и

$$\frac{\overline{U_y}}{V_*} = \frac{1}{\varkappa} \ln y + N - \frac{1}{\varkappa} \ln \delta. \tag{22}$$

Подставляя (19) в (22), получим

$$\frac{\overline{U_y}}{V_*} = \frac{1}{\varkappa}\ln y - N - \frac{1}{\varkappa}\ln N\frac{\nu}{V_*} = \frac{1}{\varkappa}\ln\frac{V_* y}{\nu} + N - \frac{1}{\varkappa}\ln N = \frac{1}{\varkappa}\ln\frac{V_* y}{\nu} + M, \qquad (23)$$

где

$$M = N - \frac{1}{\varkappa}\ln N. \qquad (24)$$

Величины $\varkappa$ и M были определены опытным путем И. Никурадзе ($\varkappa = 0,4; M = 5,5$), и формула для расчета гидравлически гладких труб была записана в виде

$$\frac{\overline{U_y}}{V_*} = \frac{1}{0,4}\ln\frac{V_* y}{\nu} + 5,5. \qquad (25)$$

В соответствии с формулой (24) при величине $M = 5,5$ критерий Никурадзе имеет значение

$$N = \frac{\overline{U_\delta}}{V_*} = 11,64. \qquad (26)$$

Интегрирование формулы (25) позволяет установить связь между величинами максимальной скорости на оси турбулентного потока жидкости в трубе круглого сечения $U_{\max}$ и средней скорости V.

$$D = \frac{\overline{U}_{\max} - V}{V_*} = \frac{3}{2\varkappa} = 3,75 = \text{const}. \qquad (27)$$

В соответствии с формулой (27) при постоянной величине коэффициента $\varkappa = 0,4$ относительный дефицит средней скорости от максимальной в турбулентном потоке жидкости также имеет постоянное значение $D = 3,75$.

Имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные, полученные в ходе исследований структуры турбулентного потока жидкости вблизи стенки трубы, показывают, что гипотеза Л. Прандтля о том, что турбулентные пульсации потока в пристеночном (ламинарном по терминологии Л. Прандтля) слое отсутствуют, некорректна. В реальности наблюдаются значительные пульсации толщины этого пристеночного слоя δ, при этом величина критерия Никурадзе N изменяется во времени от 2,3 до 18, а осредненное за достаточно большой промежуток времени его значение сохраняет постоянную величину [2].

В ламинарном потоке жидкости в отличие от турбулентного потока наблюдается слоистое упорядоченное движения жидкости (от латинского слова *lamina* – слой, пластина), при котором отдельные слои жидкости скользят друг относительно друга, не смешиваясь между собой. Поперечного перемещения элементарных объемов потока жидкости при этом не происходит, и выражение (3) сводится к закону Ньютона

$$\tau_y = \rho\nu\ \frac{dU}{dy} = \rho\nu G_y, \text{Па}. \qquad (28)$$

Интегрирование дифференциального уравнения (28) позволяет получить закон Г. Стокса, описывающий изменение величины местной скорости ламинарного потока жидкости U_r по текущему радиусу поперечного сечения трубы r:

$$U_r = 2\text{V}\left[1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right] = 2\text{V}\left[1 - \left(\frac{r_0 - y}{r_0}\right)^2\right], \text{ м/с}, \qquad (29)$$

где r_0 – радиус трубы, м; $r = r_0 - y$ – текущий радиус, м.

Дифференцирование уравнения Стокса (29) позволяет получить формулу, описывающую распределение величины градиента скорости ламинарного потока жидкости G_r по текущему радиусу поперечного сечения потока:

$$G_r = -\frac{dU}{dr} = \frac{4Vr}{r_0^2} = \frac{4V}{r_0}\frac{r}{r_0} = \frac{2V}{R}\frac{r}{r_0} = G_*\frac{r}{r_0}\ ,\ \text{с}^{-1}, \tag{30}$$

где $R = \frac{r_0}{2}$ – величина гидравлического радиуса трубы круглого сечения, м; G_* – величина градиента скорости в пристеночном подслое ламинарного потока жидкости, с$^{-1}$.

$$G_* = \frac{2V}{R}\ ,\ \text{с}^{-1}. \tag{31}$$

Формула (31) показывает, что величина градиента скорости в пристеночном подслое является кинематической характеристикой и не зависит от вязкостных свойств потока жидкости, вследствие чего ее можно использовать при описании как ламинарного, так и турбулентного потоков жидкости.

Для пристеночного подслоя в связи с тем, что величины касательного напряжения силы вязкого трения и градиента скорости в нем имеют постоянные значения ($\tau_* = \text{const}; G_* = \text{const}$), формула (28) может быть записана в виде

$$\tau_* = \rho\nu\ \ G_* = \ \rho V_*^2, \text{Па}\ , \tag{32}$$

откуда с учетом толщины пристеночного подслоя δ_* следует, что

$$G_* = \frac{V_*^2}{\nu} = \frac{V_*}{\delta_*} = \frac{2V}{R}\ ,\ \text{с}^{-1}. \tag{33}$$

Величина динамической скорости V_* может быть определена по формуле

$$V_* = V\sqrt{\frac{\lambda}{8}}\ ,\ \text{м/с}, \tag{34}$$

где λ – коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси).

Из формул (33) и (34) может быть определена величина толщины пристеночного подслоя:

$$\delta_* = R\frac{V_*}{2V} = R\frac{V}{2V}\sqrt{\frac{\lambda}{8}} = R\sqrt{\frac{\lambda}{32}}\ ,\ \text{м}. \tag{35}$$

Вычисленные по формуле (29) величины местных скоростей ламинарного потока жидкости на границе пристеночного подслоя U_{δ_*} на расстоянии δ_* от стенки трубы имеют меньшее значение, чем величины динамической скорости, рассчитанные по формуле (34).

В пристеночном подслое величины касательного напряжения силы продольного внутреннего трения τ_* и градиента скорости G_* имеют постоянное значение, а величина местной скорости U_y меняется по линейному закону, что приводит к отклонению закона Стокса, в соответствии с которым величины местных скоростей ламинарного потока образуют параболоид вращения второй степени.

Закон Стокса корректно описывает изменение величины местной скорости ламинарного потока жидкости начиная с границы пристеночного слоя, имеющего толщину

$$\delta = \delta_* + \delta_{**} = 2\delta_*\ ,\ \text{м}. \tag{36}$$

В соответствии с законом Стокса величина местной скорости на границе пристеночного слоя имеет значение

$$U_\delta = 2V\left[1-\left(\frac{r_0-\delta}{r_0}\right)^2\right] = 2V - 2V\left(\frac{r_0-\delta}{r_0}\right)^2, \text{ м/с}. \quad (37)$$

Величина градиента скорости на границе пристеночного слоя в соответствии с формулой (30) имеет значение

$$G_\delta = G_* \frac{r_0-\delta}{r_0}, \text{ с}^{-1}. \quad (38)$$

Величина градиента скорости по оси потока равна нулю, а среднедействующее значение градиента скорости в ядре ламинарного потока жидкости имеет величину

$$G_r = \frac{G_\delta + 0}{2} = \frac{1}{2}G_\delta = \frac{1}{2}G_* \frac{r_0-\delta}{r_0}, \text{ с}^{-1}. \quad (39)$$

Величина местной скорости потока жидкости на границе пристеночного слоя также может быть вычислена по формуле

$$U_\delta = 2V - G_r\left(r_0-\delta\right) = 2V - \frac{1}{2}G_* \frac{r_0-\delta}{r_0}\left(r_0-\delta\right) = G_* R - \frac{G_*}{2}\cdot\frac{(r_0-\delta)^2}{r_0}, \text{ м/с}. \quad (40)$$

Из (37) и (40) имеем

$$2V\left(\frac{r_0-\delta}{r_0}\right)^2 = \frac{1}{2}G_* \frac{r_0-\delta}{r_0}\left(r_0-\delta\right), \text{ м/с}, \quad (41)$$

откуда

$$G_* = \frac{4V}{r_0} = \frac{2V}{R}. \quad (42)$$

Содержащаяся в потоке жидкости энергия за счет действия сил трения рассеивается в окружающую среду и превращается в теплоту. Явление рассеивания энергии в окружающую среду называется диссипацией энергии. Отношение величины потери энергии ΔA, Дж, при равномерном прямолинейном движении элементарного объема жидкости ΔW, м^3, к массе этого объема $\Delta m = \rho\Delta W$, кг, принято называть удельной массовой диссипацией энергии ε_m, м^2/с^2.

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta A}{\Delta m} = V_*^2, \ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}; \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}. \quad (43)$$

Величину удельной энергии, рассеиваемой в элементарном объеме жидкости ΔW, м^3, за элементарное время Δt, с, принято называть удельной секундной диссипацией энергии ε_t, м^2/с^3.

В работе [4] величину удельной секундной диссипации энергии на границе пристеночного слоя ($y = \delta$) рекомендуется определять по формуле

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta A}{\Delta m \Delta t} = \frac{V_*^3}{\varkappa\delta}, \ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{с}}; \frac{\text{м}^2}{\text{с}^3}. \quad (44)$$

Коэффициент $\varkappa$ в ламинарном потоке жидкости при условии $\delta_* = \delta_{**} = \frac{1}{2}\delta$ имеет величину 0,5.

Величина градиента скорости в пристеночном подслое потока жидкости G_* может быть определена как отношение удельной секундной диссипации энергии ε_t к удельной массовой диссипации энергии ε_m:

$$G_* = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_m} = \frac{V_*^3}{\varkappa\delta}\frac{1}{V_*^2} = \frac{V_*}{\varkappa\delta}, \text{ с}^{-1}. \quad (45)$$

Подставляя в формулу (12) формулы (34) и (35), можно определить величину коэффициента гидравлического трения в ламинарном потоке жидкости:

$$\mathrm{Re} = \frac{V_*\delta_*}{\nu} = \frac{V\sqrt{\frac{\lambda}{8}}\cdot R\sqrt{\frac{\lambda}{32}}}{\nu} = \frac{\lambda}{16}\frac{VR}{\nu} = \frac{\lambda}{64}\frac{Vd}{\nu} = 1, \quad (46)$$

откуда

$$\lambda = 64\frac{\nu}{Vd} = \frac{64}{\mathrm{Re}}. \quad (47)$$

Формула (18) с учетом формул (34), (35) и (47) может быть представлена также в виде

$$N = \frac{V_*\delta}{\nu} = \frac{V_*\delta_*}{\nu}\frac{\delta}{\delta_*} = \frac{V\sqrt{\frac{\lambda}{8}}\cdot R\sqrt{\frac{\lambda}{32}}}{\nu}\frac{\delta}{\delta_*} = \frac{\lambda}{16}\frac{VR}{\nu}\frac{\delta}{\delta_*} = \frac{\lambda}{64}\frac{Vd}{\nu}\frac{\delta}{\delta_*} = \frac{\lambda\mathrm{Re}}{64}\frac{\delta}{\delta_*} = \frac{\delta}{\delta_*}. \quad (48)$$

Результаты вычислений характеристик ламинарного потока жидкости в трубе диаметром d=0,05 м представлены в таблице. Это значения:

– коэффициентов гидравлического трения λ, вычисленные по формуле (47);

– динамической скорости V_*, вычисленные по формуле (34);

– местной скорости потока жидкости на границе пристеночного подслоя, вычисленные по формуле

$$U_{\delta*} = 2V\left[1 - \left(\frac{r_0 - \delta_*}{r_0}\right)^2\right], \text{ м/с}; \quad (49)$$

– толщины пристеночного подслоя δ_*, вычисленные по формуле (35);

– градиента скорости в пристеночном подслое G_*, вычисленные по формуле (33);

– градиента скорости на границе пристеночного подслоя G_δ, вычисленные по формуле

$$G_\delta = G_*\frac{r_0 - \delta}{r_0}, \text{ с}^{-1}; \quad (50)$$

– градиента скорости в переходном подслое G_{**} при $\delta_* = \delta_{**}$, вычисленное по формуле

$$G_{**} = \frac{U_\delta - V_*}{\delta_{**}} = \frac{U_\delta - V_*}{\delta_*}, \text{ с}^{-1}; \quad (51)$$

– местной скорости потока жидкости на границе пристеночного слоя U_δ, вычислеые по формулам (37) и (40);

– числа Никурадзе N, вычисленные по формуле

$$N = \frac{\overline{U_\delta}}{V_*}. \qquad (52)$$

При $\delta_* = \delta_{**}$ число Никурадзе, вычисленное по формуле $N = \frac{V_*\delta}{\nu} = \frac{\delta}{\delta_*}$, имеет значение N=2.

Результаты вычислений характеристик ламинарного потока жидкости в трубе диаметром d = 0,05 м

Наименование характеристики ламинарного потока жидкости	Величина характеристики ламинарного потока жидкости					
1	2	3	4	5	6	7
Критерий Рейнольдса $\mathrm{Re} = \frac{Vd}{\nu}$	300	600	900	1200	1500	1800
Средняя скорость потока $V = \frac{\mathrm{Re}\nu}{d}$, м/с	0,00606	0,01212	0,01818	0,02424	0,03030	0,03636
Коэффициент гидравлического трения $\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}$	0,2133	0,10667	0,07111	0,05333	0,4267	0,03556
Динамическая скорость $V_* = V\sqrt{\frac{\lambda}{8}}$, м/с	0,0009896	0,001399	0,001714	0,001979	0,002213	0,002424
Толщина пристеночного подслоя $\delta_* = R\sqrt{\frac{\lambda}{32}}$, м	0,001021	0,0007217	0,0005893	0,0005103	0,0004564	0,0004167
Местная скорость на границе пристеночного подслоя $U_{\delta*} = 2V\left[1-\left(\frac{r_0-\delta_*}{r_0}\right)^2\right]$, м/с	0,0009694	0,001379	0,001694	0,001959	0,002192	0,002404
Градиент скорости в пристеночном подслое $G_* = \frac{2V}{R} = \frac{V_*}{\delta_*} = \frac{V_*}{\varkappa\delta}$, с$^{-1}$	0,97	1,94	2,91	3,88	4,85	5,82
Градиент скорости на границе пристеночного слоя $G_\delta = G_*\frac{r_0-\delta}{r_0}$, с$^{-1}$	0,89	1,83	2,77	3,72	4,67	5,62

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7
Среднедействующее значение градиента скорости в переходном подслое $G_{**} = \frac{U_\delta - V_*}{\delta_{**}} = \frac{U_\delta - V_*}{\delta_*}$, с$^{-1}$	0,89	1,83	2,77	3,72	4,67	5,62
Местная скорость на границе пристеночного слоя $U_\delta = 2V\left[1-\left(\frac{r_0-2\delta_*}{r_0}\right)^2\right] = 2V - \frac{G_*}{2}\frac{r_0-2\delta_*}{r_0}\left(r_0-2\delta_*\right)$, м/с	0,001898	0,002718	0,003347	0,003877	0,004345	0,004767
Число Никурадзе $N = \frac{\overline{U_\delta}}{V_*}$	1,9180	1,9428	1,9527	1,9591	1,9634	1,9666

Приведенные в таблице данные показывают, что при ламинарном режиме течения жидкости величина градиента скорости на границе пристеночного слоя G_δ равна среднедействующему значению градиента скорости в переходном подслое G_{**}.

Результаты, полученные в ходе аналитических исследований, позволили сделать вывод о том, что закономерности процессов течения как ламинарного, так и турбулентного потоков жидкости в напорных технологических трубопроводах определяются гидродинамическими характеристиками вязкого пристеночного подслоя и переходного подслоя, совместно образующих пристеночный слой, непосредственно прилегающий к стенке трубы и граничащий с ядром потока жидкости.

Список литературы

1. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика: пер. со 2-го нем. изд./ Л. Прандтль. – Ижевск: Изд-во Н.И.Ц. «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.

2. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика /Д. В. Штеренлихт. – М.: Колос, 2008. – 656 с.

3. Высоцкий, Л.И. Продольно-однородные осредненные турбулентные потоки / Л.И. Высоцкий, И.С. Высоцкий. – СПб.: Лань, 2019. – 672 с.

4. Ландау, Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2006. – 736 с.

References

1. Prandtl, L. Hydroaeromechanics: trans. from the second German edition / L. Prandtl. – Izhevsk: N.I.Ts Publishing House «Regular and chaotic dynamics». – 2000. – 576 p.

2. Shterenlicht, D.V. Hydraulics / D.V. Shterenlicht. – M.: Kolos, 2008. – 656 p.

3. Vysotsky, L.I. Longitudinally homogeneous averaged turbulent flows / L.I. Vysotsky, I.S. Vysotsky. – St. Petersburg: Lan, 2019. – 672 p.

4. Landau, L.D. Hydrodynamics / L.D. Landau, E. M. Lifshits. – M.: Fizmatlit, 2006. – 736 p.

УДК 628.143 DOI 10.54734/20722958_2022_3_188

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

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие "Рубин"»
Россия, 440000, Пенза, Байдукова, 2,
тел.: +7-8412-20-48-08

Князев Владимир Александрович,
кандидат технических наук,
инженер 1-й категории

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

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

Joint Stock Company Research And Production Enterprise Rubin
Russia, 440000, Penza, 2, Baidukova,
tel: + 7-8412-20-48-08

Knyazev Vladimir Aleksandrovich,
Candidate of Sciences,
1st Category Engineer

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,
тел.: (8412) 56-35-11;
факс: (8421) 56-51-22

Lebedinskiy Konstantin Valerevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Transport Machines»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАБОТЫ НАПОРНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРУБОПРОВОДА В РЕЖИМЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИ ГЛАДКОГО ТРЕНИЯ

С.Ю. Андреев, В.А. Князев, К.В. Лебединский

Приведены результаты теоретических исследований процесса перекачивания жидкости по напорному технологическому трубопроводу, работающему в режиме гидравлически гладкого трения. Показано, что при турбулентном режиме течения жидкости в гидравлически гладкой трубе диаметром d=0,05 м при числах Рейнольдса Re=7500–20000 в переходном подслое, граничащем с пристеночным подслоем, наблюдается контрградиентное течение жидкости, при котором величины среднедействующих значений градиентов скорости в переходном подслое $G_{**} = 307–923\ \text{с}^{-1}$ существенно превышают величины градиентов скорости в пристеночном подслое $G_{**} = 6–14\ \text{с}^{-1}$. Получены уравнения для определения характеристик пристеночного слоя трубопровода, работающего в режиме гидравлически гладкого трения. Использование полученных уравнений позволит оптимизировать процессы проектирования и эксплуатации напорных технологических трубопроводов.

Ключевые слова: градиент скорости, критерий Рейнольдса, число Никурадзе, коэффициент трения, переходный режим, турбулентное перемешивание, динамическая скорость

MATHEMATICAL MODELING OF THE OPERATION PROCESS OF A PRESSURE TECHNOLOGICAL PIPELINE IN THE MODE OF HYDRAULICALLY SMOOTH FRICTION

S.Yu. Andreev, V.A. Knyazev, K.V. Lebedinskiy

The results of theoretical studies of the process of pumping liquid through a pressure technological pipeline operating in the mode of hydraulically smooth friction are presented. It is shown that in the turbulent regime of fluid flow in a hydraulically smooth pipe with a diameter of d=0.05m at Reynolds numbers Re=7500–20000, a countergradient fluid flow is observed in the transition sublayer bordering the wall sublayer, in which the values of the average effective values of the velocity gradients in the transition sublayer $G_{**} = 307–923\ \text{s}^{-1}$ significantly exceed the values of the velocity gradients in the wall sublayer sublayer $G_{**} = 6–14\ \text{s}^{-1}$. The equations for determining the characteristics of the wall layer of the pipeline operating in the mode of hydraulically smooth friction are obtained. The use of the obtained equations will optimize the processes of design and operation of pressure technological pipelines.

Keywords: velocity gradient, Reynolds criterion, Nikuradze number, coefficient of friction, transient mode, turbulent mixing, dynamic velocity

В настоящее время при расчете напорных трубопроводов, работающих в режиме гидравлически гладкого трения, широко применяются положения полуэмпирической теории Л. Прандтля [1].

Из известных опытных данных следует, что при турбулентном движении жидкости основное увеличение значения осредненной местной скорости происходит в узкой области, расположенной у самой стенки трубы; в связи с этим в своей работе Л. Прандтль писал, что «при наблюдении турбулентных течений на первый взгляд кажется, что конечная скорость течения имеет место на самой стенке». Им было выдвинуто предположение о том, что весь турбулентный поток жидкости в трубе можно разделить по сечению на две зоны: ламинарный подслой, имеющий толщину δ_*, м, в котором преобладают силы вязкого трения и наблюдается «ползущее течение» при величине числа Рейнольдса $\text{Re}_{\delta*}$ меньше единицы, и турбулентное ядро потока, между которыми предполагается существование переходной зоны – переходного подслоя, имеющего толщину δ_{**}, м.

Пристеночный подслой и переходный подслой совместно образуют пристеночный слой, граничащий с ядром турбулентного потока и имеющий толщину

$$\delta = \delta_* + \delta_{**}, \text{ м.} \tag{1}$$

Величину градиента скорости на расстоянии y, м, от стенки трубы было предложено определять по формуле

$$G_y = \frac{dU}{dy} = \frac{V_*}{\varkappa y}, \text{ с}^{-1}, \tag{2}$$

где V_* – величина динамической скорости, м/с; $\varkappa$=0,4 – постоянная Кармана.

Величина динамической скорости определяется по формуле

$$V_* = \sqrt{\frac{d}{4} ig} = \sqrt{Rig} = V\sqrt{\frac{\lambda}{8}}, \text{ м/с,} \tag{3}$$

где d и R – соответственно диаметр и гидравлический радиус поперечного сечения трубы, м; i – гидравлический уклон; $g = 9{,}8$ м/с^2 – ускорение свободного падения; V – средняя скорость потока жидкости в трубе, м/с; λ – коэффициент гидравлического трения.

Основываясь на допущении о существовании в турбулентном потоке жидкости двух зон – ламинарного пристеночного слоя и турбулентного ядра потока, – Л. Прандтль предположил, что переход от ламинарного к турбулентному режиму движения жидкости на границе пристеночного слоя на расстоянии δ, м, от стенки трубы должен характеризоваться переходным безразмерным комплексом, имеющим постоянную величину и структуру, аналогичную числу Рейнольдса

$$N = \frac{\bar{U}_\delta}{V_*} = \frac{V_*\delta}{\nu} = \text{const}, \qquad (4)$$

где $\bar{U}_\delta$ – величина осредненного значения местной скорости движения жидкости на границе пристеночного слоя, м; ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м^2/с.

Отсюда

$$\delta = N\frac{\nu}{V_*}, \text{ м.} \qquad (5)$$

Интегрирование дифференциального уравнения (2) позволило получить формулу

$$N = \frac{\bar{U}_\delta}{V_*} = \frac{V_*\delta}{\nu} = \frac{1}{\varkappa}\ln\frac{V_*\delta}{\nu} + C, \qquad (6)$$

где $C = N - \frac{1}{\varkappa}\ln N$ – постоянная интегрирования.

Величины $\varkappa = 0,4$, $C = 5,5$ и $N = 11,64$ были определены опытным путем И. Никурадзе и формула (6) была записана в виде

$$N = \frac{\bar{U}_\delta}{V_*} = \frac{V_*\delta}{\nu} = \frac{1}{0,4}\ln\frac{V_*\delta}{\nu} + 5,5 = 11,64. \qquad (7)$$

В работе [2] было рассмотрено предположение о том, что непосредственно к стенке трубы прилегает тонкая прослойка потока жидкости (вязкий подслой, пристеночный подслой), в котором величина местной скорости жидкости U_y с увеличением расстояния y, м, возрастает по линейному закону от нуля на самой стенке трубы до значения величины динамической скорости $U_{\delta_*} = V_*$ на границе этого подслоя, на расстоянии δ_* от стенки трубы, при этом величина числа Рейнольдса равна единице:

$$\text{Re}_{\delta_*} = \frac{V_*\delta_*}{\nu} = 1. \qquad (8)$$

Современные исследования структуры потока жидкости вблизи стенки трубы показали, что представления Л. Прандтля о ламинарном режиме течения в пристеночном слое оказались неверными, и здесь наблюдаются интенсивные турбулентные возмущения [3].

Наличие пульсационных составляющих местной скорости потока в пристеночном и переходном подслоях позволяет использовать для определения величины полных касательных напряжений формулу Ж. Бусинекса:

$$\tau_* = \rho G_*\left(\nu + \nu_{т*}\right) = \rho G_*\nu_*, \text{ Па;} \qquad (9)$$

$$\tau_{**} = \rho G_*\left(\nu + \nu_{т**}\right) = \rho G_*\nu_{**}, \text{ Па,} \qquad (10)$$

где τ_* и τ_{**} – соответственно величины полных касательных напряжений в пристеночном и переходном подслоях, Па; G_* – величина градиента скорости в пристеночном подслое, $с^{-1}$; $\nu_{т*}$ и $\nu_{т**}$ – соответственно величины кинематических коэффициентов турбулентной вязкости (буссинексовой вязкости) в пристеночном и переходном подслоях, $м^2/с$; ν, ν_*, ν_{**} – соответственно величина коэффициента кинематической вязкости жидкости и полные величины коэффициентов кинематической вязкости в переходном и пристеночном подслоях, $м^2/с$.

Символы * и ** обозначают здесь и далее, что данная характеристика принадлежит соответственно пристеночному подслою и переходному подслою.

В работе [2] было предложено рассматривать величину безразмерного коэффициента кинематической вязкости, определяемую как отношение кинематического коэффициента турбулентной вязкости $\nu_т$ к коэффициенту кинематической вязкости жидкости ν в качестве функции критерия Рейнольдса Re:

$$\frac{\nu_т}{\nu} = f\left(\mathrm{Re}\right). \tag{11}$$

По аналогии с (11) можно ввести понятия безразмерного (относительного) коэффициента кинематической вязкости: пристеночного подслоя $\overline{\nu}_*$, переходного подслоя $\overline{\nu}_{**}$ и пристеночного слоя $\overline{\nu}_\delta$.

$$\overline{\nu}_* = \frac{\nu + \nu_{т*}}{\nu} = \frac{\nu_*}{\nu}; \tag{12}$$

$$\overline{\nu}_{**} = \frac{\nu + \nu_{т**}}{\nu} = \frac{\nu_{**}}{\nu}; \tag{13}$$

$$\overline{\nu}_\delta = \frac{\nu + \nu_{т**}}{\nu + \nu_{т*}} = \frac{\nu_{**}}{\nu_*}. \tag{14}$$

В работе [4] была приведена формула для определения величины толщины пристеночного подслоя:

$$\delta_* = R\sqrt{\frac{\lambda}{32}}, \text{ м.} \tag{15}$$

Поскольку представления Л. Прандтля о том, что в пристеночном слое наблюдается ламинарный режим течения жидкости, оказались неверными, а современные исследования структуры потока жидкости вблизи стенки трубы выявили присутствие в нем интенсивных турбулентных возмущений, то можно предположить, что в формуле (8) вместо величины кинематического коэффициента вязкости жидкости ν необходимо использовать полную величину коэффициента кинематической вязкости $\nu_* = \nu + \nu_{т**} = \nu \cdot \overline{\nu}_*$.

В этом случае с учетом формул (3) и (15) формула (8) может быть записана в виде

$$\mathrm{Re}_{\delta_*} = \frac{V_*\delta_*}{\nu_*} = \frac{V\sqrt{\frac{\lambda}{8}} \cdot R\sqrt{\frac{\lambda}{32}}}{\nu\overline{\nu}_*} = \frac{\lambda}{16}\frac{VR}{\nu}\frac{1}{\nu_*} = \frac{\lambda}{64}\frac{Vd}{\nu} = \frac{\lambda}{64}\frac{Re}{\overline{\nu}_*} = 1, \tag{16}$$

откуда

$$\overline{\nu}_* = \lambda\frac{\mathrm{Re}}{64} = \frac{V_*\delta_*}{\nu}, \text{ м.} \tag{17}$$

Максимальное значение величины полного касательного напряжения τ_* наблюдаются в пристеночном подслое.

В переходном подслое, имеющем толщину δ_{**}, в отличии от вязкого пристеночного подслоя, имеющего толщину δ_*, величина сил инерции превышает значение сил вязкого трения (величина числа Рейнольдса больше единицы $\mathrm{Re}_{\delta_*} > 1$), что обуславливает протекание процессов освобождения накопленной в вязком подслое упругой потенциальной энергии, в результате чего здесь зарождаются элементарные турбулентные вихри и происходит скачкообразное уменьшение касательного напряжения с величины τ_* до значения τ_{**}.

Среднедействующее значение градиента скорости в переходном подслое в результате скачкообразного снижения величины касательного напряжения увеличивается до значения [4]

$$G_{**} = \frac{3G_*}{\overline{\nu}_\delta}\frac{r_0}{r_{0-\delta}},\ \text{с}^{-1}. \tag{18}$$

Величина градиента осредненной местной скорости на границе пристеночного слоя, имеющего толщину $\delta = \delta_* + \delta_{**}$, становится равной [4]

$$G_\delta = G_*\overline{\nu}_\delta\frac{r_0 - \delta}{r_0},\ \text{с}^{-1}. \tag{19}$$

В соответствии с существующими в настоящее время представлениями в случае турбулентного продольно-однородного течения (в частности в трубе круглого сечения) величина градиента осредненной местной скорости G_y должна монотонно убывать с увеличением расстоянии от стенки трубы y [5], в связи с чем можно записать

$$G_y = \frac{dU}{dy} = G_*\overline{\nu}_\delta\frac{r_0 - y}{r_0} = G_*\overline{\nu}_\delta\frac{r}{r_0},\ \text{с}^{-1}. \tag{20}$$

Экспериментальные данные, полученные в результате многолетних исследований, были зафиксированы профессором Л.И. Высоцким как открытие (диплом на открытие №376), основой которого стало доказательство теоремы о существовании вблизи гладкой стенки в продольно однородных турбулентных потоках жидкости тончайшего слоя с контрградиентным течением, где среднедействующее значение градиента скорости существенно превышает его величину у стенки трубы [5]. Таким слоем является переходный подслой, в котором среднедействующее значение градиента скорости G_{**} существенно превышает величину градиента скорости в пристеночном подслое G_*, определяемую как

$$G_* = \frac{2V}{R} = \frac{V_*}{\delta_*} = \frac{V_*^2}{\nu_*} = \frac{V_*^2}{\overline{\nu}_*\nu},\ \text{с}^{-1}. \tag{21}$$

Величина скачкообразного снижения касательного напряжения в переходном подслое с учетом формул (9) и (10) может быть определена как

$$\begin{aligned}\Delta\tau_{**} = \tau_* - \tau_{**} = \rho\nu_* G_* - \rho\nu_{**}G_* = \rho G_*\left(\nu_* - \nu_{**}\right) = \rho\frac{V_*^2}{\nu_*}\left(\nu_* - \nu_{**}\right) = \\ = \rho V_*^2\left(1 - \frac{\nu_{**}}{\nu_*}\right) = \rho V_*^2\left(1 - \overline{\nu}_\delta\right),\ \text{Па}.\end{aligned} \tag{22}$$

В работе [4] была получена квадратичная функция распределения величины местных осредненных скоростей турбулентного потока жидкости по текущему радиусу его поперечного сечения *r*.

$$\overline{U_r} = 2V\left[\beta - (2\beta - 1)\frac{r^2}{r_0^2}\right], \text{ м/с}, \tag{23}$$

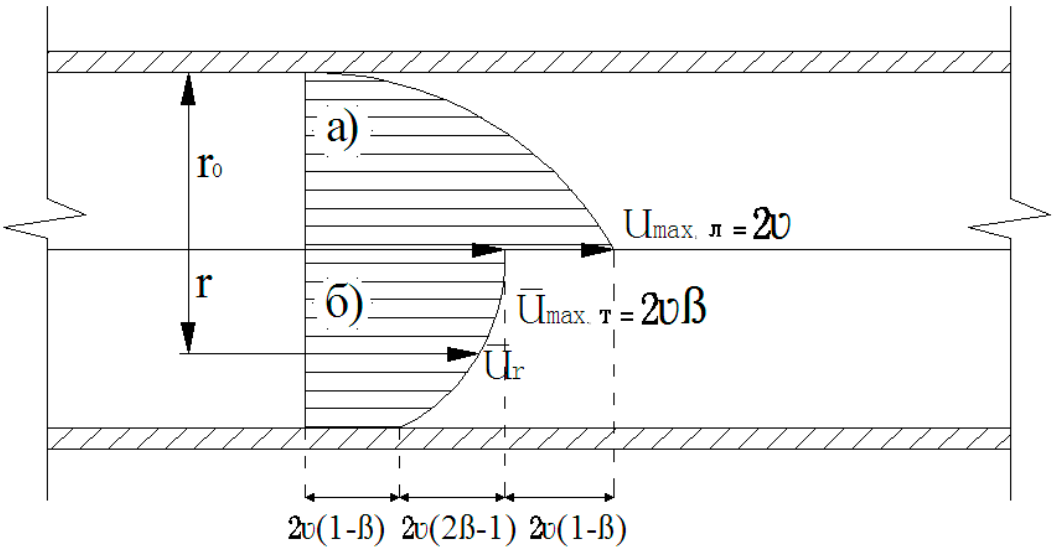
где β – коэффициент, величина которого определяется как отношение максимальной осредненной скорости на оси турбулентного потока жидкости $\bar{U}_{\text{max.т}}$ к величине максимальной местной скорости на оси ламинарного потока жидкости $U_{\text{max.л}}$;

$$\beta = \frac{\bar{U}_{\text{max.т}}}{U_{\text{max.л}}} = \frac{\bar{U}_{\text{max.т}}}{2V}. \tag{24}$$

Из условия постоянства величины относительного дефицита средней скорости $D = \frac{\bar{U}_{\max} - V}{V_*} = \frac{2}{3\varkappa} = 3,75$ значение коэффициента β может быть определено как

$$\beta = \frac{\bar{U}_{\text{max.т}}}{2V} = \frac{V + 3,75V_*}{2V} = \frac{V + 3,75V\sqrt{\frac{\lambda}{8}}}{2V} = \frac{1}{2}\left(1 + 3,75\sqrt{\frac{\lambda}{8}}\right). \tag{25}$$

На рисунке представлены профили распределения местных скоростей U_r, м/с, ламинарного потока жидкости и осредненных местных скоростей турбулентного потока жидкостей $\bar{U}_r$, м/с, по текущему радиусу трубы круглого сечения при одном и том же расходе Q, м^3/с (средней скорости потока *V*, м/с), но при разных значениях коэффициентов кинематической вязкости пропускаемых жидкостей $\nu_л$ и $\nu_т$, м^2/с, (чисел Рейнольдса $Re_л$ и $Re_т$).



Профили распределения величин местной скорости ламинарного потока жидкости U_r и осредненной местной скорости $\bar{U}_r$ турбулентного потока жидкости по текущему радиусу трубы круглого сечения

Из рисунка видно, что в соответствии с профилями распределения местных скоростей максимальная местная скорость на оси ламинарного потока имеет величину

$U_{\max.л} = 2V$, а максимальная осредненная скорость на оси турбулентного потока имеет величину $\bar{U}_{\max.т} = 2V\beta$, при этом площади заштрихованных фигур *а* и *б* равны друг другу, поскольку расход жидкости имеет постоянное значение.

Величина местной скорости ламинарного потока у стенки трубы равна нулю ($U_0 = 0$). В соответствии с формулой (23) в турбулентном потоке жидкости у стенки трубы величина осредненной местной скорости не равна нулю и имеет значение скорости «псевдопроскальзывания»:

$$\bar{U}_0 = 2V\left[\beta - \left(2\beta - 1\right)\right] = 2V\left(1 - \beta\right), \text{ м/с.} \tag{26}$$

В реальности у стенки трубы скорость турбулентного потока жидкости имеет нулевое значение, а формула (23) корректно описывает распределение величины местных осредненных скоростей $\bar{U}_r$, только начиная с границы пристеночного слоя, расположенного на расстоянии $y = \delta$ от стенки трубы.

В пристеночном подслое величины местной скорости потока жидкости изменяются по линейному закону от нуля до значения $U_{\delta_*} = V_*$ на расстоянии δ_* от стенки трубы.

В переходном подслое величина осредненной местной скорости турбулентного потока жидкости скачкообразно возрастает и достигает значения на границе пристеночного слоя

$$\bar{U}_\delta = G_*\delta_* + \frac{3G_*}{\bar{\nu}_\delta}\frac{r_0}{r_0 - \delta}\delta_{**} = V_* + \frac{3G_*}{\bar{\nu}_\delta}\frac{r_0}{r_0 - \delta}\delta_{**}, \text{ м/с.} \tag{27}$$

Величина осредненной местной скорости турбулентного потока жидкости на границе пристеночного слоя также может быть определена как

$$\begin{aligned}\bar{U}_\delta &= 2V\beta - \frac{G_*}{2}\bar{\nu}_\delta\frac{r_0 - \delta}{r_0}\left(r_0 - \delta\right) = G_*R\beta - \frac{G_*}{2}\bar{\nu}_\delta\frac{r_0 - \delta}{r_0}\left(r_0 - \delta\right) = \\ &= V_*\left[\left(1 + \bar{\nu}_\delta\right)\frac{R}{2\delta_*} - \bar{\nu}_\delta\frac{\left(r_0 - \delta\right)^2}{2\delta_* r_0}\right], \text{ м/с.}\end{aligned} \tag{28}$$

Из (27) и (28) имеем

$$V_* + \frac{3G_*}{\bar{\nu}_\delta}\cdot\frac{r_0}{r_0 - \delta}\delta_{**} = 2V\beta - \frac{G_*}{2}\bar{\nu}_\delta\frac{r_0 - \delta}{r_0}\left(r_0 - \delta_* - \delta_{**}\right), \text{ м/с,} \tag{29}$$

откуда

$$2V\beta - V_* = \frac{3G_*}{\bar{\nu}_\delta}\frac{r_0}{r_0 - \delta}\delta_{**} + \frac{G_*}{2}\bar{\nu}_\delta\left(r_0 - \delta\right) - \frac{G_*}{2}\bar{\nu}_\delta\left(r_0 - \delta\right)\frac{\delta_*}{r_0} - \frac{G_*}{2}\bar{\nu}_\delta\left(r_0 - \delta\right)\frac{\delta_{**}}{r_0}, \text{ м/с} \tag{30}$$

и

$$\begin{aligned}\delta_{**} &= \frac{2V\beta - \frac{G_*}{2}\bar{\nu}_\delta\left(r_0 - \delta\right)\left(1 - \frac{\delta_*}{r_0}\right) - V_*}{G_*\left(\frac{3}{\bar{\nu}_\delta}\cdot\frac{r_0 - \delta}{r_0} - \frac{\bar{\nu}_\delta}{2}\cdot\frac{r_0 - \delta}{r_0}\right)} = \frac{2V\beta - \frac{2V}{R}\cdot\frac{\bar{\nu}_\delta}{2}\left(r_0 - \delta\right)\left(1 - \frac{\delta_*}{r_0}\right) - V}{\frac{2V}{R}\left(\frac{3}{\bar{\nu}_\delta}\cdot\frac{r_0 - \delta}{r_0} - \frac{\bar{\nu}_\delta}{2}\cdot\frac{r_0 - \delta}{r_0}\right)} = \\ &= R\cdot\frac{\beta - \frac{\bar{\nu}_\delta}{2}\cdot\frac{\left(r_0 - \delta\right)}{R}\left(1 - \frac{\delta_*}{r_0}\right) - \frac{V}{2V}}{\frac{3}{\bar{\nu}_\delta}\cdot\frac{r_0 - \delta}{r_0} - \frac{\bar{\nu}_\delta}{2}\cdot\frac{r_0 - \delta}{r_0}}.\end{aligned} \tag{31}$$

В первом приближении принимается $\delta = 2\delta_*$, тогда с учетом $\frac{V_*}{2V} = \frac{\delta_*}{R}$

$$\delta_{**} = R\frac{\beta - \frac{\overline{\nu}_\delta}{2}\cdot\frac{r_0 - 2\delta_*}{R}\left(1 - \frac{\delta_*}{r_0}\right) - \frac{\delta_*}{R}}{\frac{3}{\overline{\nu}_\delta}\cdot\frac{r_0}{r_0 - 2\delta_*} - \frac{\overline{\nu}_\delta}{2}\cdot\frac{r_0 - 2\delta_*}{r_0}}. \quad (32)$$

Величина градиента скорости в пристеночном подслое турбулентного потока жидкости с учетом эффекта скачка касательных напряжений в переходном подслое $\Delta\tau_{**}$ может быть определена как

$$G_* = \frac{V_*}{\varkappa\delta}\left(1 - \overline{\nu}_\delta\right), \text{ с}^{-1}. \quad (33)$$

Величина параметра Кармана для турбулентного потока жидкости может быть вычислена как

$$\varkappa = \frac{V_*}{G_*\delta}\left(1 - \overline{\nu}_\delta\right) = \frac{\delta_*}{V_*}\cdot\frac{V_*}{\delta}\left(1 - \overline{\nu}_\delta\right) = \frac{\delta_*}{\delta}\left(1 - \overline{\nu}_\delta\right) = \frac{\delta_*}{\delta_* + \delta_{**}}\left(1 - \overline{\nu}_\delta\right). \quad (34)$$

Взаимосвязь между величинами параметра Кармана $\varkappa$ и коэффициента гидравлического трения λ в гидравлически гладких трубах может быть аппроксимирована зависимостью

$$\varkappa = 0,3239\lambda^{-0,06514}. \quad (35)$$

Поскольку в турбулентном потоке жидкости начиная с границы пристеночного подслоя на расстоянии δ от стенки трубы величина градиента G_y монотонно убывает с уменьшением величины текущего радиуса поперечного сечения потока r, то функция распределения величины местных осредненных скоростей ($\overline{U}_r = f(r)$) может быть получена путем интегрирования дифференциального уравнения (20):

$$U_r = \int -\overline{\nu}_\delta G_* \frac{r}{r_0}dr = \frac{2V}{R}\cdot\frac{\overline{\nu}_\delta}{r_0}\int r dr = -\frac{4V}{r_0^2}\overline{\nu}_\delta\frac{r^2}{2} + C = -\frac{2V}{r_0^2}\overline{\nu}_\delta r^2 + C, \text{ м/с}. \quad (36)$$

Постоянная интегрирования C может быть определена из условия равенства величины осредненной местной скорости $\overline{U}_r$ на оси турбулентного потока (при $r = 0$) максимальной скорости $\overline{U}_{\text{max.т}}$:

$$C = \overline{U}_{\text{max.т}} = 2V\beta, \text{ м/с}, \quad (37)$$

откуда

$$\overline{U_r} = 2V\beta - 2V\overline{\nu}_\delta\frac{r_0^2}{r^2} = 2V\left(\beta - \overline{\nu}_\delta\frac{r^2}{r_0^2}\right), \text{ м/с}. \quad (38)$$

Из формул (23) и (38) следует, что

$$\overline{\nu}_\delta = 2\beta - 1 = 3,75\sqrt{\frac{\lambda}{8}}. \quad (39)$$

Величина критерия Никурадзе для турбулентного потока жидкости может быть определена как

$$N=\frac{\bar{U}_\delta}{V_*}=\frac{1}{V_*}\left(V_*+\frac{3G_*}{\bar{\bar{\nu}}_\delta}\cdot\frac{r_0}{r_0-\delta}\delta_{**}\right)=\frac{1}{V_*}\left(V_*+\frac{3}{\bar{\bar{\nu}}_\delta}\cdot\frac{V_*}{\delta_*}\cdot\frac{r_0}{r_0-\delta}\delta_{**}\right)=1+\frac{3}{\bar{\bar{\nu}}_\delta}\cdot\frac{r_0}{r_0-\delta}\cdot\frac{\delta_{**}}{\delta_*}. \quad (40)$$

Критерий Никурадзе, рассчитанный с учетом полной величины кинематического коэффициента вязкости пристеночного подслоя $\nu_*=\nu+\nu_{т*}=\bar{\nu}_*\nu$, м^2/с, имеет значение

$$N_*=\frac{V_*\delta}{\nu_*}=\frac{V_*\delta}{\bar{\nu}_*\nu}=\frac{V_*\delta_*}{\nu}\frac{1}{\bar{\nu}_*}\frac{\delta}{\delta_*}=\frac{V\sqrt{\frac{\lambda}{8}}R\sqrt{\frac{\lambda}{32}}}{\nu}\frac{1}{\bar{\nu}_*\nu}\frac{\delta}{\delta_*}= \quad (41)$$

$$=\frac{\lambda}{64}\frac{Vd}{\nu}\frac{1}{\bar{\nu}_*}\frac{\delta}{\delta_*}=\frac{64}{\mathrm{Re}}\bar{\nu}_*\frac{\mathrm{Re}}{64}\frac{1}{\bar{\nu}_*}\frac{\delta}{\delta_*}=\frac{\delta}{\delta_*}.$$

Результаты вычислений характеристик турбулентного потока жидкости для гидравлически гладкой трубы диаметром d=0,05 м представлены в таблице.

Результаты вычислений характеристик турбулентного потока жидкости для гидравлически гладкой трубы диаметром d=0,05 м

Наименование характеристики турбулентного потока жидкости гидравлически гладкой трубы	Величина характеристики турбулентного потока жидкости					
1	2	3	4	5	6	7
Критерий Рейнольдса $\mathrm{Re}=\frac{Vd}{\nu}$	7500	10000	12500	15000	17500	20000
Средняя скорость потока $V=\frac{\mathrm{Re}\nu}{d}$, м/с	0,1515	0,2020	0,2525	0,3030	0,3535	0,4040
Коэффициент гидравлического трения $\lambda=\frac{0,316}{\mathrm{Re}^{0,25}}$	0,0339564	0,0316000	0,0298854	0,0285538	0,0274744	0,0265723
Динамическая скорость $V_*=V\sqrt{\frac{\lambda}{8}}$, м/с	0,009870	0,01270	0,01543	0,01810	0,02072	0,02328
Толщина пристеночного подслоя $\delta_*=R\sqrt{\frac{\lambda}{32}}$, м	0,0004072	0,0003928	0,0003820	0,0003734	0,0003663	0,0003602
Коэффициент β $\beta=\frac{1}{2}\left(1+3,75\sqrt{\frac{\lambda}{8}}\right)$	0,6222	0,6178	0,6146	0,6120	0,6099	0,6081
Относительный коэффициент вязкости в пристеночном слое $\bar{\nu}_\delta=\frac{\bar{\nu}_{**}}{\nu_*}=2\beta-1=3,75\sqrt{\frac{\lambda}{8}}$	0,2443	0,2357	0,2292	0,2240	0,2198	0,2161
Относительный коэффициент вязкости в пристеночном подслое $\bar{\nu}_*=\frac{\nu_*}{\nu}=\frac{\mathrm{Re}}{64}\lambda=\frac{\delta_*V_*}{\nu}=\frac{V_*^2}{G_*\nu}$	3,9793	4,9375	5,8370	6,8923	7,5125	8,3038
Градиент скорости в пристеночном подслое $G_*=\frac{2V}{R}=\frac{V_*}{\delta_*}=\frac{V_*^2}{\nu\bar{\nu}_*}=\frac{V_*}{\nu\delta}\left(1-\bar{\nu}_\delta\right)$, с$^{-1}$	24,24	32,32	40,40	48,48	56,56	64,64

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7
Градиент скорости на границе пристеночного слоя $G_\delta = G_* \bar{\nu}_\delta \frac{r_0 - \delta}{r_0}$, с$^{-1}$	5,74	7,39	8,99	10,55	12,08	13,58
Среднедействующее значение градиента скорости в переходном подслое $G_{**} = 3\frac{G_*}{\bar{\nu}_\delta} \cdot \frac{r_0}{r_0 - \delta}$, с$^{-1}$	307,03	423,91	544,54	668,25	794,15	922,77
Толщина переходного подслоя $\delta_{**} = R\frac{\beta - \frac{\bar{\nu}_\delta}{2} \cdot \frac{r_0 - 2\delta_*}{R}\left(1 - \frac{\delta_*}{r_0}\right) - \frac{\delta_*}{R}}{\frac{3}{\bar{\nu}_\delta} \cdot \frac{r_0}{r_0 - 2\delta_*} - \frac{\bar{\nu}_\delta}{2} \cdot \frac{r_0 - 2\delta_*}{r_0}}$, м	0,0003550	0,0003470	0,0003410	0,0003359	0,0003318	0,0003281
Толщина пристеночного слоя $\delta = \delta_* + \delta_{**}$, м	0,0007622	0,0007398	0,0007230	0,0007093	0,0006981	0,0006883
Толщина пристеночного слоя, вычисленная по формуле Прандтля, при $N = 11,64$ $\delta_N = N\frac{\nu}{V_*}\delta_*$, м	0,001911	0,0009257	0,0007619	0,0006495	0,0005674	0,0005050
Параметр Кармана, вычисленный по формуле $\varkappa = \frac{\delta_*}{\delta}\left(1 - \bar{\nu}_\delta\right)$	0,4037	0,4057	0,4073	0,4085	0,4094	0,4102
Параметр Кармана, вычисленный по формуле $\varkappa = 0,3239\lambda^{-0,06514}$	0,4037	0,4056	0,4071	0,4083	0,4094	0,4102
Число Никурадзе, вычисленное по формуле $N = \frac{\bar{U}_\delta}{V_*} = \frac{2V}{V_*}\left[\beta - \nu_\delta\left(\frac{r_0 - \delta}{r_0}\right)^2\right] = \left(1 + \bar{\nu}_\delta\right)\frac{R}{2\delta_*} - \bar{\nu}_\delta\frac{\left(r_0 - \delta\right)^2}{2\delta_* r_0}$	12,0515	12,5922	13,0412	13,4100	13,7239	14,0128
Число Никурадзе, вычисленное по формуле $N = \frac{\bar{U}_\delta}{V_*} = 1 + \frac{3}{\nu_\delta} \cdot \frac{r_0}{r_0 - \delta} \cdot \frac{\delta_{**}}{\delta_*}$	12,0424	12,5869	13,0321	13,3996	13,7184	14,0033
Число Никурадзе, рассчитанное с учетом полной величины кинематического коэффициента вязкости $N_* = \frac{V_*\delta}{\nu_*} = \frac{V_*\delta}{\nu\bar{\nu}_\delta} = \frac{\delta}{\delta_*}$	1,8718	1,8840	1,8877	1,8996	1,9058	1,9109

Приведенные в таблице данные показывают, что:

– вычисленные по формуле (34) величины коэффициента Кармана при повышении числа Рейнольдса с Re=7500 до Re=20000 в гидравлически гладкой трубе диаметром *d*=0,05 м увеличиваются со значения $\varkappa = 0,4037$ до $\varkappa = 0,4102$;

– величины числа Никурадзе, определяемого как отношение осредненной местной скорости на границе пристеночного слоя к динамической скорости $N=\frac{\overline{U}_\delta}{V_*}$, вычисленные с использованием формулы (38), при повышении числа Рейнольдса с Re=7500 до Re=20000 увеличивают свое значение с N=12,0515 до N=14,0128;

– величины числа Никурадзе, вычисленные с использованием формулы (40), при повышении числа Рейнольдса с Re=7500 до Re=20000 увеличивают свое значение с N=12,0424 до N=14,0033.

Относительная погрешность вычислений числа Никурадзе по формулам (38) и (40) составляет Δ=0,040–0,078 %.

Таким образом, при турбулентном режиме течения жидкости в переходном подслое, граничащем с пристеночным подслоем на расстоянии δ_* от стенки трубы и имеющем границу с ядром потока на расстоянии δ от стенки трубы, в полном соответствии с открытием Высоцкого Л.И. наблюдается контрградиентное течение жидкости, при котором величины среднедействующих градиентов скорости в переходном подслое $G_{**} = 307–923$ с$^{-1}$ существенно превышают величины градиентов скорости в пристеночном подслое $G_* = 6–14$ с$^{-1}$ в гидравлически гладкой трубе диаметром d=0,05 м при числах Рейнольдса Re=7500 до Re=20000.

Список литературы

1. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика (перевод со второго немецкого издания) / Л. Прандтль. – Ижевск: Издательство Н.И.Ц. «Регулярная и хаотическая динамика», 2000 – 576 с.

2. Ландау, Л. Д. Гидродинамика/Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Издательство «Физматлит», 2006. – 736 с.

3. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика / Д.В. Штеренлихт. – М.: Колос, 2008. – 656 с.

4. Андреев, С.Ю. Гидродинамические закономерности распределения величин потока жидкости в поперечном сечении трубчатого гидродинамического устройства / С.Ю. Андреев, М.И. Яхкинд, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №2. – С.178–190.

5. Высоцкий, Л.И. Продольно-однородные осредненные турбулентные потоки / Л.И. Высоцкий, И.С. Высоцкий. – СПб.: Лань, 2019. – 672 с.

References

1. Prandtl, L. Hydroaeromechanics (translated from the second German edition) / L. Prandtl. – Izhevsk: N.I.Ts Publishing House «Regular and chaotic dynamics», 2000. – 576 p.

2. Landau, L.D. Hydrodynamics / L.D. Landau, E.M. Lifshits. – M.: Fizmatlit, 2006. – 736 p.

3. Shterenlicht, D.V. Hydraulics / D.V. Shterenlicht. – M.: Kolos. – 2008. – 656 p.

4. Andreev, S.Yu. Hydrodynamic regularities of the distribution of fluid flow values in the cross section of a tubular hydrodynamic device / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, I.A. Garkina // Regional Architecture and Engineering. – 2018. – No. 2. – P.178–190.

5. Vysotsky, L.I. Longitudinally homogeneous averaged turbulent flows / L.I. Vysotsky, I.S. Vysotsky. – St. Petersburg: Lan, 2019. – 672 p.

УДК 528.4 DOI 10.54734/20722958_2022_3_199

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

Ерёмкин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Акифьев Илья Владимирович,
кандидат экономических наук, доцент кафедры «Землеустройство и геодезия»
E-mail: zig@pguas.ru

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г.Пенза, ул. Красная, д.40,
тел.: (8412) 36-82-09

Пономарева Инна Константиновна,
кандидат экономических наук,
доцент кафедры «Информационное обеспечение управления и производства»
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

Akifev Ilya Vladimirovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Land Management and Geodesy»
E-mail: zig@pguas.ru

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 «Information Support Management and Production»
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГЛОНАСС ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

И.В. Акифьев, А.И. Еремкин, И.К. Пономарева

Представлены результаты исследования приёмников спутниковых навигационных сигналов в различных режимах с целью определения возможности использования ГЛОНАСС в современном строительстве. На основании проведенного анализа сделаны аналитические выкладки, подкреплённые наблюдения за спутниковым оборудованием в различных режимах работы. Отмечено, что геодезические работы в строительстве должны выполняться с высокой геометрической точностью, особенно при возведении многоэтажных и высотных зданий; при выносе проектных координат спутниковыми приемниками следует учитывать возможные ошибки спутниковых измерений, алгоритмы их влияния на конечный результат позиционирования. Выявлено, что на данном этапе развития спутниковых технологий использовать систему ГЛОНАСС для нужд строительства можно только для ограниченного вида работ, где необходимая точность не превышает 6 см, что является низкой точностью.

Актуальность предлагаемых исследований обусловлена ускоренной реализацией Указа Президента РФ от 17 мая 2021 г. № 638 «Об использовании глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС в интересах социально-экономического развития Российской Федерации» в связи с возможным отключением GPS на территории России.

Ключевые слова: геодезические работы в строительстве, спутниковые технологии, ГЛОНАСС, GPS, глобальная навигационная система

ANALYSIS OF GLONASS CAPABILITIES DEVELOPMENT FOR PERFORMING GEODETIC WORKS IN CONSTRUCTION AT THE PRESENT STAGE OF SATELLITE TECHNOLOGY DEVELOPMENT

I.V. Akifev, A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva

This article presents studies of satellite navigation signal receivers in various modes in order to determine the possibility of using GLONASS in modern construction. Based on the analysis of the research carried out by the authors, the article presents analytical calculations supported by the observed characteristics of the equipment in various operating modes. Geodetic works in construction should be carried out with high geometric accuracy, especially when constructing multi-storey and high-rise buildings, when carrying out design coordinates by satellite receivers, possible errors of satellite measurements, algorithms for their elimination or minimization should be taken into account.

The relevance of the proposed research is due to the accelerated implementation of the Decree of the President of the Russian Federation dated May 17, 2021 No. 638 On the use of the global navigation satellite system GLONASS in the interests of socio-economic development of the Russian Federation in connection with the possible disconnection of GPS in Russia.

Keywords: geodetic works in construction, *satellite technologies*, *GLONASS*, *GPS*, *global navigation system*

Отключение западной GPS на территории Российской Федерации, о возможности которого заявил в мае 2022 года глава «Роскосмоса», является новым фундаментальным фактором, влияющим на большинство геодезических работ, в том числе в строительстве. В Российской Федерации создана и функционирует глобальная навигационная система ГЛОНАСС, которая является конкурентоспособным аналогом GPS. К 2010 году ГЛОНАСС охватила всю территорию России, к 2011 году ГЛОНАСС было обеспечено практически глобальное покрытие. Сегодня она охватывает 100 % территории РФ и 70 % мирового пространства. Попробуем разобраться, каким образом можно использовать ГЛОНАСС для нужд строительного комплекса РФ.

В настоящее время в сфере геодезических и топографических работ наблюдаются изменения в технологии выполнения измерений с использованием спутниковых приемников, переход от использования собственной базовой станции на пункте государственной геодезической сети (ГГС) к определению координат от сети референцных станций (станций, закрепленных на пилонах и выполняющих прием, обработку спутниковой информации, передачу вектора корректирующих поправок для определения координат точек спутниковой аппаратуре пользователя). В строительной среде существует мнение о невозможности использования глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в реальной работе в силу многих причин: электромагнитные помехи от строительного оборудования, необходимость всегда держать ровер и базовую станцию на открытой местности и, самое важное, низкая точность измерений. Однако на современном этапе развития спутниковых технологий точность измерений значительно выросла, также оборудование качественно стало иным, более пригодным к активному использованию в процессе строительства. Проанализируем современные возможности спутниковых технологий точного позиционирования в строительстве.

Известно, одним из основных недостатков одиночной базовой станции является то, что по мере увеличения расстояния между базовой станцией и приемником происходит падение точности и надежности данных; это связано с тем, что атмосферные условия на базовой станции и приемнике значительно отличаются, что затрудняет или делает невозможным решение сантиметровой точности. Передача данных от базы на ровер состоит из следующих этапов: установка базовой станции; прием и обработка сигналов от спутников; передача сформированных данных в эфир одним из трех способов: ультракороткими волнами (УКВ), по голосовому каналу Circuit Switched Data (CSD) или по интернету.

Ровер призван принимать те же спутники, что и базовая станция, далее выполняется синхронизация измерений и вывод координат в нужном формате.

Рассмотрим ограничения при работе в режиме кинематики в реальном времени (RTK) от базовой станции:

1) погрешность при установке базовой станции полностью входит в погрешность определения координат;

2) дополнительные затраты, связанные с покупкой базы, ровера и модема;

3) ограниченная дальность работы (до 30–50 км);

4) поиск пунктов ГГС;

5) стабильность базы;

6) проблема с питанием базовой станции;

7) работа от разных пунктов ГГС может приводить к разным результатам.

Для устранения перечисленных выше недостатков предлагается использовать несколько базовых станций, объединенных в единую сеть.

Сетевая технология преодолевает ряд ограничений, свойственных работе одной базовой станции, и позволяет значительно уменьшить систематические погрешности измерений, увеличить расстояния между подвижными приемником и базовой станцией.

Для устранения вышеперечисленных недостатков по всему миру, в том числе и в нашей стране, развиваются сети базовых станций.

Опорные референцные станции в настоящее время используются для мониторинга земной поверхности, для обеспечения геодезического контроля, поддержки геодезических, инженерных, ГИС-данных, для управления дорожной и сельскохозяйственной техникой и в других областях.

Сеть непрерывно работающих станций точного позиционирования по ряду показателей (точности, покрытию, контролю измрений) намного эффективнее традиционных методов создания сетей: триангуляции, трилатерации и других геодезических построений; при этом геометрия сети не так важна, как при построении традиционных сетей, а точность на порядок выше.

Принцип выполнения измерений относительно данных станций показан на рис. 1.

Рис. 1. Принцип выполнения измерений относительно референцных станций

Пользователи устанавливают свои спутниковые приемники в заданном районе работ, загружают данные опорных станций через интернет и вычисляют свое точное местоположение.

Референцные станции могут передавать данные RTK и данные системы дифференциальной коррекции глобальных навигационных спутниковых систем (DGPS) для

непосредственного использования роверами в полевых условиях; такая сеть станций может быть практически любого размера.

На больших строительных площадках и в открытых шахтах работы могут выполняться быстрее, с большей точностью, когда машины (бульдозеры, грейдеры, экскаваторы и т.д.) оснащены системами автоматического наведения и контроля высоты и управляются с точностью до сантиметра с помощью режима RTK относительно опорных станций, обеспечивающих геодезический контроль и техническую поддержку.

Прототипом современной референцной станции являлась станция дифференциальной коррекции (DGPS). Первые станции данного типа были созданы для решения задач морской навигации и обеспечивали точность определения координат порядка 1 метра; станции DGPS закреплялись преимущественно вдоль береговой линии с целью передачи корректирующей информации для определения местоположения судна в пределах морской акватории.

Пример такой станции, расположенной в морском порту г. Новороссийска, представлен на рис. 2.

Рис. 2. Референцная станция в порту г. Новороссийска

Коммерческая эффективность внедрения референцных станций обоснована тем, что данная технология позволяет сократить время на производство измерений, транспортные расходы, затраты на покупку дополнительного спутникового оборудования, затраты, связанные с рекогносцировкой пунктов ГГС, с наймом работника, который устанавливает и охраняет базовую станцию в период выполнения спутниковых измерений.

Использование сети референцных станций позволяет минимизировать ошибки при работе пользователя с приемником, т.к. в данном случае нет необходимости центрировать спутниковый приемник на базовой станции и измерять высоту антенны.

Следует отметить основные преимущества данной технологии:

1) работа всех пользователей в единой системе координат;
2) экономия ресурсов, увеличение производительности;
3) мониторинг смещений;
4) сетевое решение;
5) доступность;
6) покрытие.

Область распространения сети базовых станций на территории страны представлена на рис. 3.

Рис. 3. Область покрытия референцными станциями для территории РФ

Первая сеть референцных базовых станций была создана для территории Москвы и Московской области для решения задач кадастра, землеустройства, строительства с целью постановки объектов недвижимости на кадастровый учет и получила название «Спутниковая система межевания» (далее – ССМЗ) (рис. 4).

Рис. 4. Спутниковая система межевания (ССМЗ)

Созданная сеть имела следующие технические параметры:

1) область покрытия: 45 800 км^2;
2) 22 референцные станции;
3) точность определения координат в режиме реального времени – 2–3 см.

Состояние сети базовых станций по применяемому оборудованию и количеству приемников отражено на рис. 5.

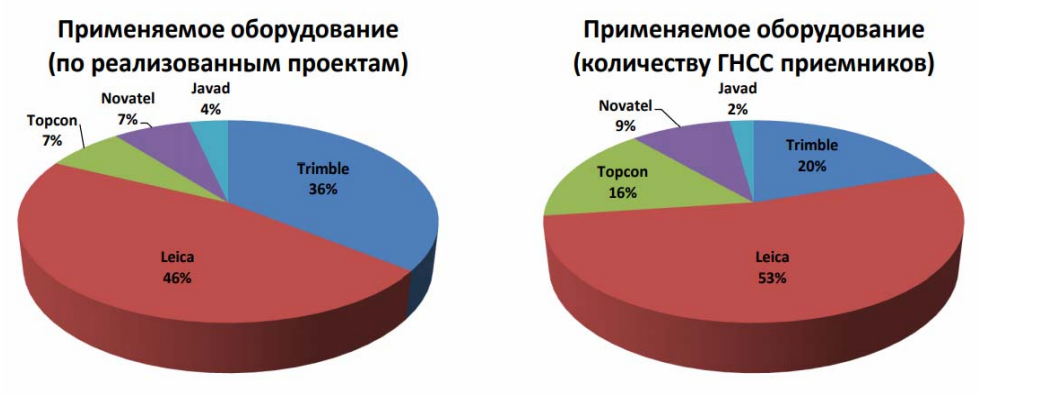


Рис. 5. Состояние сети базовых станций по применяемому оборудованию и количеству приемников

Применяемое оборудование представлено в основном зарубежными фирмами: Leica, Topcon, Javad, т.е. при создании сетей не используются приемники, разработанные российскими компаниями, что является явным пробелом и серьезным упущением.

Исходя из анализа структуры сети базовых станций, представленной на рис. 5, наиболее распространенным оборудованием по реализованным проектам и количеству спутниковых приемников является оборудование фирмы Leica.

Состояние сети референцных станций на территории Северо-Западного федерального округа по субъектам РФ на 2022 год представлено на диаграмме (рис. 6).

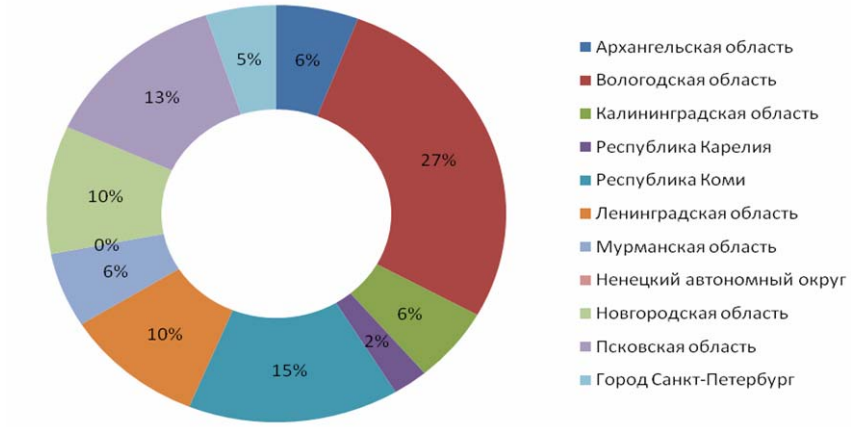


Рис. 6. Структура распределения референцных станций на 2022 год по регионам страны

В настоящее время базовые станции располагают в различных местах по всему миру, и их количество постоянно растет.

Сеть базовых станций обеспечивает единую пространственно-временную геодезическую основу точных и высокоточных ГНСС-измерений, необходимых для широкого спектра прикладных задач, и за данной технологией будущее.

Следует отметить, что в отношении референцных станций специалистами до конца не решен вопрос о том, что конкретно в их работе нуждается в установлении статуса легитимности.

При определении координат с использованием сети базовых станций следует обоснованно подходить к выбору сети референцных станций в районе работ того или иного провайдера; критериями выбора могут выступать: близость базовых станций к объекту работ; услуги провайдера, который предоставляет доступ к определению координат относительно базовых станций; степень автоматизации процессов по управлению сетью базовых станций; стабильность работы системы; широта перечня форматов дифференциальных поправок, предоставляемых сетью.

Цены на услуги наиболее крупных проектов по GPS-измерениям приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тарифы на GNSS-услуги наиболее крупных проектов в России

Сеть/оператор сети	SmartNet	EFT-CORS	RTKNet	Федеральное БТИ
Тестовой период	2 часа	1-3 месяца	2-3 недели	нет
Безлимитный месяц RTK, рос.руб	4800	4800	4000	5400
Безлимитный год RTK, рос. руб.	47436	43000	30000	64000
Доступ к RINEX файлам, рос. руб.	2200	бесплатно	нет	нет
Наличие режима VRS	да	нет	нет	нет

Анализируя приведенные в табл. 1 данные, можно сделать вывод о том, что самые низкие тарифы на услуги у проекта RTKNet, однако и сеть базовых станций по сравнению с другими проектами у него одна из самых малочисленных (представлена 64 базовыми станциями).

Достоинствами проекта EFT-CORS являются тестовой режим до 3 месяцев, средняя цена на услуги по предоставлению поправок к спутниковым измерениям в режиме RTK и бесплатный доступ к RINEX файлам; у проекта SmartNet бесплатный доступ к RINEX файлам только при условии оплаты услуг по подключению к безлимитному тарифу RTK.

Преимущества сетевого решения при работе от сети базовых станций:

1) уменьшение погрешностей, связанных с удалением от конкретной базовой станции;
2) увеличение точности;
3) уменьшение времени инициализации;
4) повышение надежности определения координат;
5) неограниченное количество подключений.

Обобщив выявленные возможности спутниковых технологий в области строительства на современном этапе, можно сделать вывод о существенном увеличении точности GNSS-оборудования. Проведём практический эксперимент с целью исследования точности определения координат контрольных точек, а также стабильности измерений, выполненных в режиме RTK при использовании только системы GPS, только ГЛОНАСС и совместном использовании систем GPS и ГЛОНАСС.

Программа эксперимента представлена в табл. 2.

Таблица 2

Программа эксперимента

Этап проведения работы	Вид работ
1. Подготовительный	1.1. Изучение теоретической базы для проведения предполагаемого исследования
	1.2. Формулирование цели предстоящего исследования
	1.3. Выработка плана выполнения исследовательских работ
	1.4. Выбор приборов и программного обеспечения для спутниковых измерений
2. Измерительный	2.1. Разбивка рабочего полигона для тестирования точности спутниковых измерений в режимах GPS, ГЛОНАСС, GPS+ ГЛОНАСС
	2.2. Измерение координат точек в режиме RTK в режимах GPS, ГЛОНАСС, GPS+ ГЛОНАСС
3. Вычислительный	3.1. Предварительная обработка измерений
	3.2. Вычисление координат точек полигона и оценки точности в режимах GPS, ГЛОНАСС, GPS+ ГЛОНАСС

Для проведения исследования был создан базис в городе Ростов-на-Дону, состоящий из 7 контрольных точек, расположенных на одной линии.

Точки были закреплены металлическими штырями, тахеометром было измерено общее расстояние базиса, а также расстояния между точками 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4 и т.д.

В качестве приемника для спутниковых наблюдений использовался многочастотный приемник TRIUMPH-2 фирмы JAVAD, работающий как с системой GPS, так и ГЛОНАСС (рис. 7).

Рис. 7. Многочастотный приемник TRIUMPH-2 фирмы JAVAD

Измерения приемником были выполнены в режиме статики и в режиме RTK, в разное время суток и с различными интервалами записи.

На первом этапе измерения проводились на небольших расстояниях с последующим увеличением длины базовой линии. Необходимо было выяснить, зависит ли погрешность определения приращений координат от длины базовой линии при использовании сигналов GPS и ГЛОНАСС совместно и по отдельности.

Приращения координат до точек с номерами 1, 2, 3, 4 и 5 определялись относительно точки начала базиса с номером 0, найденной ранее в режиме статики от пунктов ГГС.

На данной точке в качестве базовой станции использовался приемник TRIUMPH-VS и передающая аппаратура для измерения в режиме RTK.

При этом записывалось время инициализации и среднее количество наблюдаемых спутников.

Перед каждым сеансом измерений осуществлялся программный сброс альманаха спутников, поэтому интервал между сеансами измерений составлял не менее 5 минут. На каждой точке было выполнено по шесть измерений.

Значение средней квадратической погрешности (СКП) измерения в плане в каждом сеансе наблюдений рассчитывалось по формуле

$$m_S = \sqrt{m_{\Delta x}^2 + m_{\Delta y}^2} \ ,$$

где $m_{\Delta X}$ – средняя квадратическая погрешность определения приращения координат по оси X; $m_{\Delta Y}$ – средняя квадратическая погрешность приращения координат по оси Y в конкретном сеансе наблюдений.

Значение СКП определения высоты в каждом сеансе наблюдений рассчитывалось по формуле

$$m_h = \left| h_{\text{эт}} - h \right| ,$$

где $h_{\text{эт}}$ – эталонное значение высоты (значение высоты, полученное при калибровке базиса); h – измеренное значение высоты в сеансе наблюдений.

При тестировании аппаратуры величина допустимого абсолютного расхождения между результатами измерений (допуск) вычислялась по формулам

$$M_{S\,\text{доп}} = 2M_s \ \text{– в плане,}$$

$$M_{S\,\text{доп}} = 2M_h \ \text{– по высоте,}$$

где M_s – средняя квадратическая погрешность измерения приращений координат и расстояний; M_h – средняя квадратическая погрешность измерения высот.

Величины M_s и M_h определялись для конкретной длины базовой линии D и значений постоянных величин a и b, задаваемых производителем в документации на конкретный вид аппаратуры, по формуле

$$M = a + b \cdot 10^{-6} \cdot D.$$

Для приемника TRIUMPH-2 производителем заявлены следующие значения постоянных величин при измерении в режиме RTK:

a = 0,010 м, b = 1 (в плане);

a = 0,015 м, b = 1 (по высоте).

Приведем пример расчета допустимых средних квадратических погрешностей измерения приращения координат и высот для длины базовой линии, равной 0,2 км между точками 0 и 1:

$$2M_{S\,\text{доп}} = 2 \cdot \left(0,010 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2\right) = 0,020\,(\text{м});$$

$$2M_{h\,\text{доп}} = 2 \cdot \left(0,015 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2\right) = 0,030\,(\text{м}).$$

Результаты тестовых измерений в режиме RTK при работе только с ГЛОНАСС, только с GPS и с двумя системами (GPS и ГЛОНАСС) представлены в табл. 3–5.

Таблица 3

Результаты тестовых измерений в режиме RTK (только ГЛОНАСС)

Номер точки	Расстояние до точки 0, км	Время инициализации	СКП в плане, см	СКП по высоте, см	Допуск в плане, см	Допуск по высоте, см	Кол-во спутников
1	0,2	80	1,8	0,3	2,0	3,0	6
2	0,5	54	1,1	1,7	2,1	3,1	7
3	1,5	80	1,3	3,1	2,3	3,3	5
4	2,7	33	2,5	2,7	2,5	3,5	5
5	3,6	56	2,3	2,7	2,7	3,7	6
Среднее		**60**	**1,8**	**2,1**	**2,3**	**3,3**	**6**

Таблица 4

Результаты тестовых измерений в режиме RTK (только GPS)

Номер точки	Расстояние до точки 0, км	Время инициализации	СКП в плане, см	СКП по высоте, см	Допуск в плане, см	Допуск по высоте, см	Кол-во спутников
1	0,2	4	0,8	0,6	2,0	3,0	6
2	0,5	71	2,4	3,0	2,1	3,1	9
3	1,5	25	1,1	1,8	2,3	3,3	6
4	2,7	104	0,7	0,5	2,5	3,5	6
5	3,6	27	1,6	2,7	2,7	3,7	7
Среднее		**46**	**1,3**	**1,8**	**2,3**	**3,3**	**7**

Таблица 5

Результаты тестовых измерений в режиме RTK (GPS и ГЛОНАСС)

Номер точки	Расстояние до точки 0, км	Время инициализации	СКП в плане, см	СКП по высоте, см	Допуск в плане, см	Допуск по высоте, см	Кол-во спутников
1	0,2	12	1,1	1,0	2,0	3,0	7+5
2	0,5	6	2,0	3,1	2,1	3,1	8+5
3	1,5	3	1,6	0,7	2,3	3,3	7+7
4	2,7	4	2,4	1,2	2,5	3,5	6+5
5	3,6	4	2,5	3,1	2,7	3,7	8+5
Среднее		**6**	**2,0**	**1,9**	**2,3**	**3,3**	**7+5**

На втором этапе испытаний измерения выполнялись с помощью референцной станции, находящейся на значительном расстоянии от базиса.

Схема выполненения спутниковых измерений от референцной станции представлена на рис. 8.

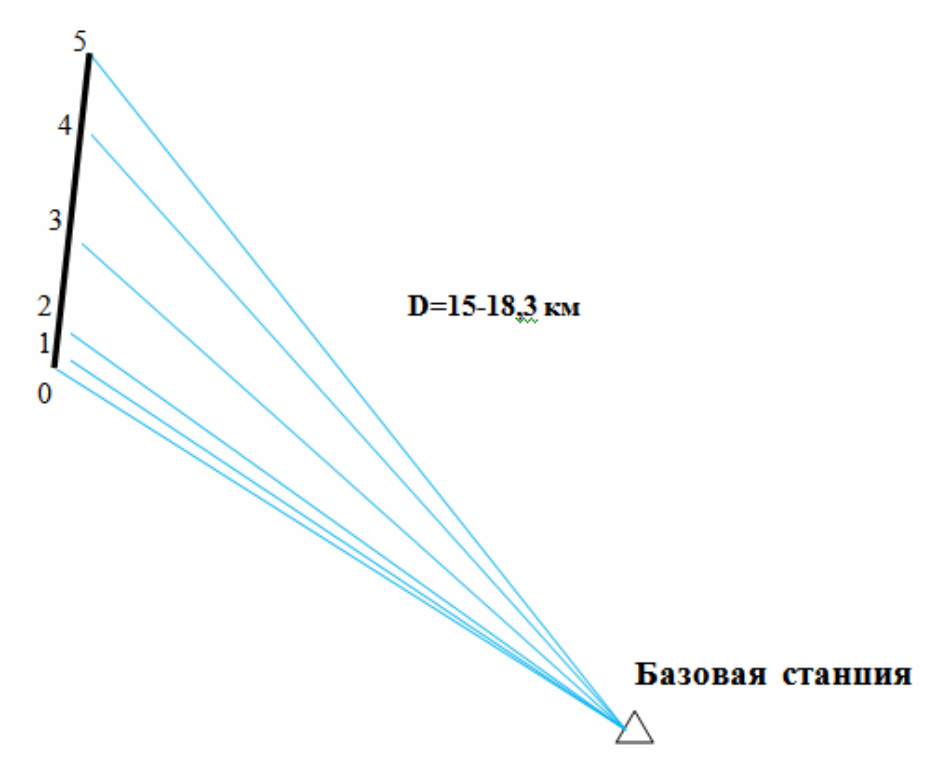


Рис. 8. Схема выполненных спутниковых измерений

В качестве рефренцной (базовой) станции была выбрана станция «Ростов-на-Дону» проекта SmartNet; местоположение референцной станции на карте отображено на рис. 9.

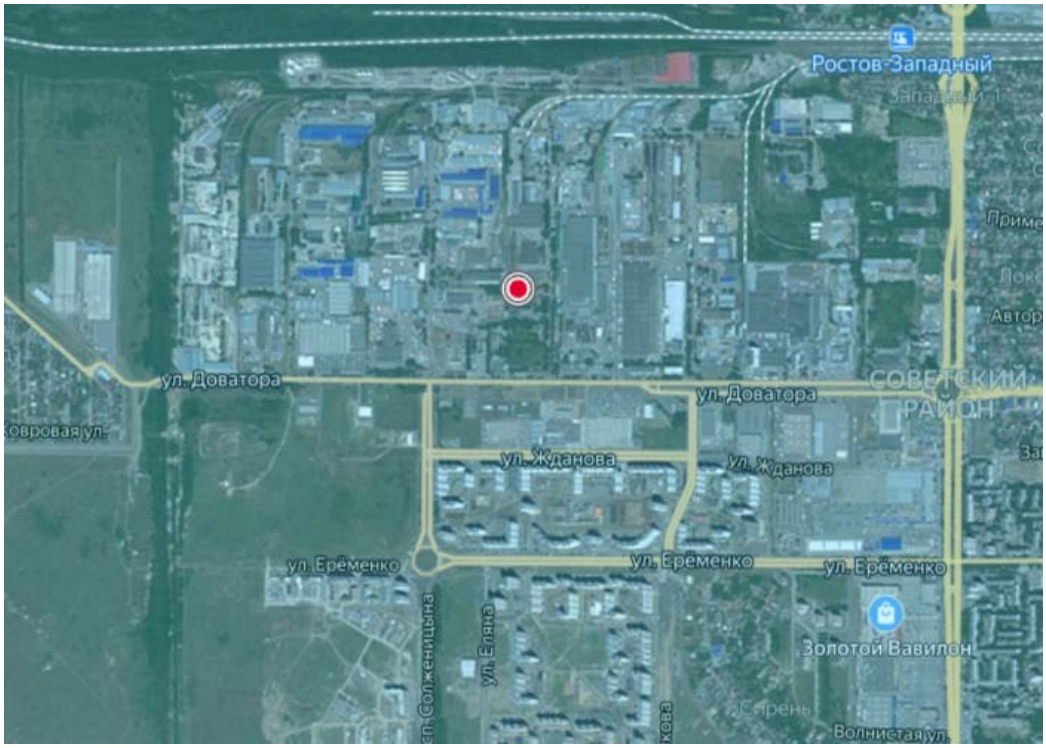


Рис. 9. Местоположение референцной станции на карте (г. Ростов-на-Дону)

Паспорт станции представлен на рис. 10.

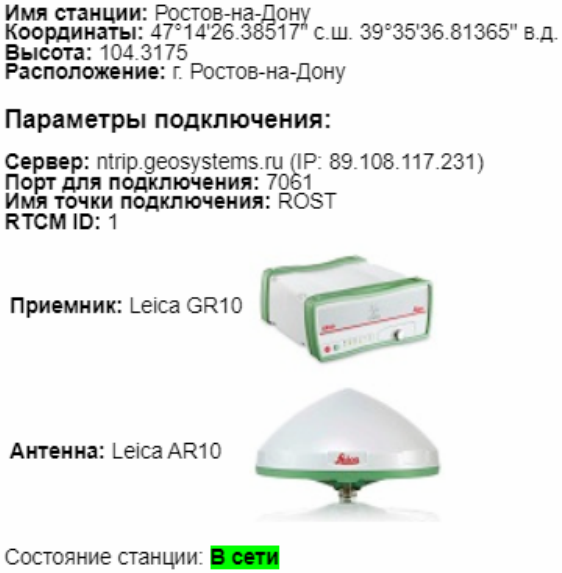


Рис. 10. Паспорт станции

В режиме RTK время было искусственно ограничено количеством приходящих с базовой станции эпох (30 эпох на одно измерение).

Методика проведения работ была аналогична первому этапу, а приемник TRIUMPH-2 последовательно устанавливался на точки базиса с номерами 0, 1, 2, 3, 4 и 5.

Результаты испытаний на втором этапе в режиме RTK при работе только с ГЛОНАСС, только с GPS и с двумя системами (GPS и ГЛОНАСС) представлены в табл. 6–8.

Таблица 6

Результаты тестовых измерений в режиме RTK (только ГЛОНАСС)

Номер точки	Расстояние до точки 0, км	Время инициализации	СКП в плане, см	СКП по высоте, см	Допуск в плане, см	Допуск по высоте, см	Кол-во спутников
0	15	57	2,0	3,2	5,0	6,0	8
1	15,2	70	1,9	3,1	5,0	6,0	7
2	15,5	90	0,3	5,1	5,1	6,1	6
3	16,4	80	3,3	1,3	5,3	6,3	7
4	17,5	55	2,4	1,3	5,5	6,5	5
5	18,3	78	1,7	5,0	5,7	6,7	7
Среднее		**72**	**1,9**	**3,2**	**5,3**	**6,3**	**7**

Таблица 7

Результаты тестовых измерений в режиме RTK (только GPS)

Номер точки	Расстояние до точки 0, км	Время инициализации	СКП в плане, см	СКП по высоте, см	Допуск в плане, см	Допуск по высоте, см	Кол-во спутников
0	15	15	1,5	3,2	5,0	6,0	9
1	15,2	15	2,7	1,7	5,0	6,0	9
2	15,5	9	2,8	2,0	5,1	6,1	9
3	16,4	40	1,2	4,4	5,3	6,3	6
4	17,5	4	3,7	1,3	5,5	6,5	7
5	18,3	77	3,8	4,2	5,7	6,7	7
Среднее		**27**	**2,6**	**2,8**	**5,3**	**6,3**	**8**

Таблица 8

Результаты тестовых измерений в режиме RTK (GPS и ГЛОНАСС)

Номер точки	Расстояние до точки 0, км	Время инициа-лизации	СКП в плане, см	СКП по высоте, см	Допуск в плане, см	Допуск по высоте, см	Кол-во спутников
0	15	9	0,3	3,0	5,0	6,0	8+8
1	15,2	4	1,7	1,3	5,0	6,0	8+6
2	15,5	5	3,7	0,2	5,1	6,1	8+7
3	16,4	4	2,2	0,0	5,3	6,3	6+7
4	17,5	4	1,0	2,4	5,5	6,5	6+5
5	18,3	12	3,1	2,5	5,7	6,7	7+6
Среднее		**6**	**2,0**	**1,6**	**5,3**	**6,3**	**7+6**

На основе полученных данных составлен график инициализации при определении фиксированного решения только для GPS, только для ГЛОНАСС и при совместном использовании двух систем. График инициализации представлен на рис. 11.

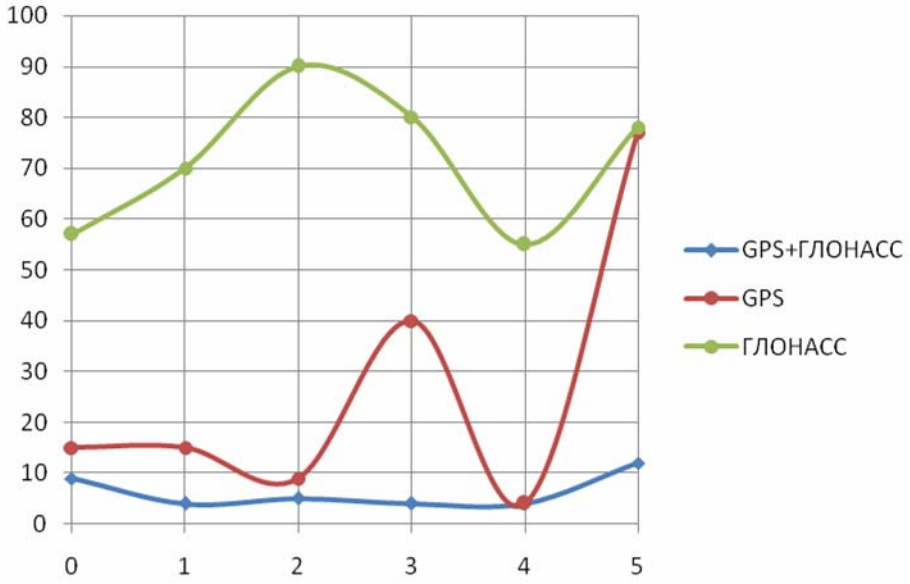


Рис. 11. График инициализации GPS, ГЛОНАСС и GPS+ГЛОНАСС

На основании результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1) ГЛОНАСС по точности не уступает GPS и может использоваться при производстве строительных работ в полном объёме, без каких-либо потерь. По результатам тестовых испытаний видно, что при всех типах измерений – только с ГЛОНАСС, только с GPS и с двумя системами (GPS и ГЛОНАСС) – среднее значение средних квадратических погрешностей в плане и по высоте находится в пределах точности, удовлетворяющей требованиям, установленным производителем для геодезической аппаратуры ГНСС при измерениях в режиме RTK. Значения погрешностей, полученные с использованием как только одной системы ГЛОНАСС, так и с помощью двух систем (ГЛОНАСС и GPS), отличаются друг от друга незначительно, а увеличение длины базовой линии (в пределах 20 км) при работе от референцной станции практически не влияет на конечный результат;

2) использование ГЛОНАСС вместо GPS в строительстве даёт неуязвимость перед западными санкциями в части как отключения ГНСС GPS на территории Российской Федерации, так и получения недостоверных координат точек при спуфинговой атаке. При отсутствии возможности использования ГЛОНАСС в процессе геодезического

сопровождения строительства возможны серьёзные просчёты и, как следствие, большой объём переделок из-за неверных координат, полученных от ГНСС;

3) на данном этапе развития использовать систему ГЛОНАСС для нужд строительства можно только для ограниченного вида работ, где необходимая точность не превышает 6 см, что является низкой точностью.

Фактически использовать спутниковые технологии можно только при производстве земляных работ (устройство котлованов, траншей для коммуникаций и т.д.), а использование ГЛОНАСС, например, каменщиками на данном этапе приведёт к срыву допусков и браку. В то же время использование ГЛОНАСС в режиме статики в работе позволяет практически точно укладываться в строительные допуски. Через несколько лет при условии выведения на орбиты новых спутников большую часть работ (кроме остекления, подключения коммуникаций и т.д.) в строительстве можно будет производить с использование глобальных навигационных систем быстро и точно в режиме RTK.

Список литературы

1. Eremkin, A.I. Analysis of the microclimate of the halls of worship / A.I. Eremkin, I.K Ponomareva // «Journal of Physics: Conference Series». – 2021. – P. 012005.
2. Пономарева, И.К. Бизнес-планирование на предприятии / И.К. Пономарева, И.В. Акифьев, В.Д. Быстрова // Научное обозрение. – 2014. – № 9–2. – С. 663–665.
3. Горобец, В.П. Опыт Российской Федерации по установлению государственной системы координат 2011 года / В.П. Горобец, Г.Н. Ефимов, И.А. Столяров // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 2 (30). – С. 24–37.
4. Постановление Правительства РФ от 28 июля 2000 г. № 568 «Об установлении единых государственных систем координат».
5. Постановление Правительства РФ от 24 ноября 2016 г №1240 «Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы.
6. Приказ Росреестра от 23 марта 2016 г. № П/0134 «Об утверждении геометрических и физических числовых геодезических параметров государственной геодезической системы координат 2011 года».
7. Постановления Правительства РФ от 28 декабря 2012 г. № 1463 «О единых государственных системах координат».
8. Федеральный закон от 30.12.2015 г. № 431-ФЗ «О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
9. ITRF2014. Description. – URL: http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/
10. Приказ от 15 апреля 2002 г. № П/261 об утверждении «Основных положений об опорной межевой сети. – URL: http://www.consultant.ru

References

1. Eremkin, A.I. Analysis of the microclimate of the halls of worship / A.I. Eremkin, I.K Ponomareva // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – P. 012005.
2. Ponomareva, I.K. Business planning at the enterprise / I.K. Ponomareva, I.V. Akifiev, V.D. Bystrova // Scientific Review. – 2014. – No. 9–2. – P. 663–665.
3. Gorobets, V.P. The experience of the Russian Federation in establishing the state coordinate system of 2011 / V.P. Gorobets, G.N. Efimov, I.A. Stolyarov // Bulletin of the SSUGiT. – 2015. – Issue 2 (30). – P. 24–37.
4. Decree of the Government of the Russian Federation No. 568 of July 28, 2000 «On the establishment of unified state coordinate systems».
5. Decree of the Government of the Russian Federation No. 1240 dated November 24, 2016 «On the establishment of State coordinate systems, State Elevation system and State Gravimetric System.

6. Rosreestr Order No. P/0134 dated March 23, 2016 «On approval of geometric and physical numerical geodetic parameters of the State Geodetic coordinate system of 2011».

7. Decree of the Government of the Russian Federation No. 1463 dated December 28, 2012 «On Unified State coordinate systems».

8. Federal Law No. 431-FZ of December 30, 2015 «On Geodesy, Cartography and Spatial Data and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation».

9. ITRF2014. Description. – URL: http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014 /

10. Order No. P/261 of April 15, 2002 on the approval of the «Basic provisions on the reference boundary network». – URL: http://www.consultant.ru

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 721.02:697.7:699.86 DOI 10.54734/20722958_2022_3_213

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

Береговой Александр Маркович,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Городское строительство и архитектура»
E-mail: ambereg@rambler.ru

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

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

Beregovoy Aleksander Markovich,
Doctor of Sciences,
Professor of the department «Urban Construction and Architecture»
E-mail: ambereg@rambler.ru

Beregovoy Vitaliy Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the department «Technology of Building Materials and Wood Processing»
E-mail: vabereg@rambler.ru

ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ЗДАНИЯ

А.М. Береговой, В.А. Береговой

Дан анализ двух подходов к проектированию энергоэффективных зданий: по оценке энергоэффективности зданий путем проведения натурных обследований их тепловой защиты и определения энергетических потребностей здания-аналога, а также путем рассмотрения здания как единой энергетической и экологической системы. По результатам проведенных натурных обследований показаны типичные недостатки проектных решений по тепловой защите и формированию микроклимата помещений. Указаны возможности по снижению энергетических потребностей проектируемого здания. Установлено, что второй подход, по сравнению с первым, позволяет более углубленно и в системном порядке определить и оптимизировать основные факторы воздействия на энергосбережение в здании.

Ключевые слова: энергоэффективное здание, здание–аналог, натурные обследования, тепловая защита здания, микроклимат помещений, воздухообмен, энергосбережение

APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF ARCHITECTURAL AND CONSTRUCTION SOLUTION FOR AN ENERGY–EFFICIENT BUILDING

A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy

The analysis of the following two approaches to the design of energy–efficient buildings is given: assessment of the energy efficiency of buildings by conducting full-scale surveys of their thermal protection, as well as determining the energy needs of an analog building, and by considering the building as a unified energy and ecological system. Based on the results of field surveys, typical shortcomings of design solutions for thermal protection and the formation of the microclimate of

rooms are shown. The possibilities for reducing the energy needs of the projected building are indicated. It is established, that the second approach to the study of energy efficiency of a building as a unified energy and ecological system allows to identify and optimize the main factors affecting energy saving in the building in more depth and in a systematic manner.

Keywords:. energy–efficient building, *analog building*, *field surveys*, *thermal protection of building*, *indoor microclimate*, *air exchange*, *energy saving*

Разработка архитектурно-строительных решений энергоэффективных зданий стала одним из основных направлений развития архитектуры и строительства, которое позволяет рационально использовать ограниченные топливно–энергетические ресурсы путем минимизации тепловой потребности зданий при условии формирования достаточно комфортных условий микроклимата помещений. В мировой и отечественной практике проектирования и строительства существуют различные подходы по повышению энергоэффективности зданий.

В работе приведены результаты выполненных исследований по развитию и углублению двух подходов, используемых в отечественной практике проектирования зданий такого типа:

– оценка энергоэффективности здания путем определения энергетических потребностей зданий-аналогов и проведения натурных обследований тепловой защиты ограждающих конструкций и микроклимата помещений;

– исследование энергетической эффективности здания как единой энергетической и экологической системы (ЕЭЭС).

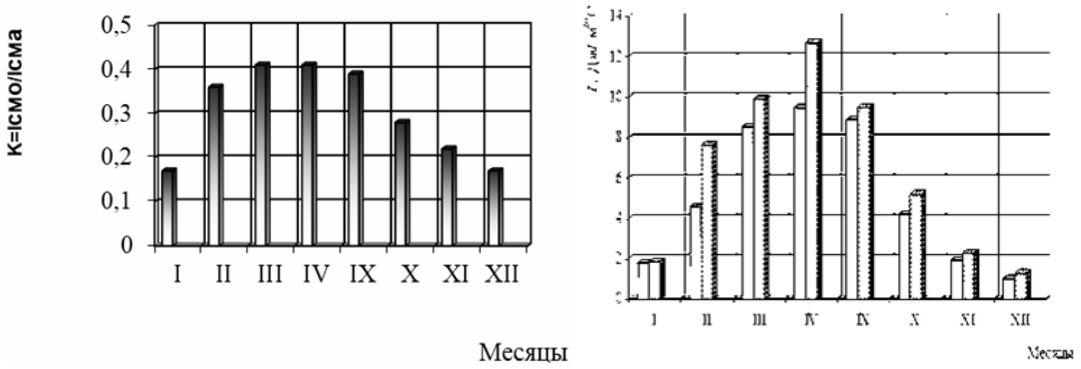
В первом подходе после расчета удельных тепловых затрат по нормам тепловой защиты уточняется энергетическая потребность здания на основе широкого круга исходных данных проектирования и результатов натурных обследований, а также дается оценка экономической эффективности проектного варианта.

В исходные данные проектирования включаются климатические факторы, влияющие на энергопотребление здания, в том числе на его энергоактивность в районе строительства, характеристика системы инженерного оборудования, стоимость тепловой и электрической энергии с учетом ее подорожания, ориентировочная сметная стоимость строительства.

Показатели климатических воздействий принимаются по нормам тепловой защиты, а затем уточняются по другой справочной литературе и результатам наблюдений местных метеостанций.

При проектировании энергоактивного здания анализируются климатические факторы, связанные с возобновляемыми видами энергии. Для таких видов энергии, как тепло солнечной радиации и верхних слоев земли, изучаются интенсивность солнечной радиации с учетом облачности (см. рисунок), скорость и доминирующее направление ветра, расчетные температуры наружного воздуха, глубина промерзания грунтов и др.

А Б



А. Показатель облачности по месяцам отопительного периода для г. Пензы и области;
Б. Среднемесячный приход солнечной радиации в г. Пензе на горизонтальную $I_{смо}$ (заштриховано) и вертикальную поверхности за период отопления; $I_{сма}$= $I_{смо}$, но за пределами земной атмосферы

Анализ показателей светового климата для одного из регионов II климатического пояса показал, что среднемесячный приход солнечной радиации на наружные ограждения зданий в течение отопительного периода отличается большой неравномерностью: за ноябрь – январь из-за большой облачности этот показатель гораздо меньше (в 2,5–6 раз), чем в другие месяцы отопительного периода**.** Это указывает на то, что используемые в проектах энергоэффективных зданий энергоактивные конструкции и устройства для восприятия тепла солнечной радиации будут иметь наибольший коэффициент полезного действия в течение февраля–апреля и октября месяцев**.**

Способы использования тепла солнечной радиации с помощью упрощенной конструкции плоского солнечного коллектора и тепла земляного массива под зданием рассмотрены в [1, 2].

В характеристике инженерного оборудования даются: описание и показатели отопительной системы и нормативной температуры воздуха помещений, естественной или механической вентиляции и кратности воздухообмена, горячего водоснабжения, экстремальные климатические воздействия для расчета мощности инженерного оборудования.

Стоимость тепловой и электрической энергии, руб./кДж и руб/кВт, учитывается по тарифам, определяемым местными энергоснабжающими организациями.

Определение ориентировочной сметной стоимости строительства позволяет дать более объективную экономическую оценку вариантам проектирования, обеспечивающим энергосбережение в здании. Это можно сделать на основании сметно-финансового расчета здания-аналога, имеющего похожее архитектурно-конструктивное и объемно–планировочное решение.

Натурные обследования ограждающих конструкций зданий и микроклимата их помещений, а также просмотр проектной документации дают возможность выявить ошибки в стадии проектирования. Так, например, при проведении обследований жилых зданий г. Пензы было установлено:

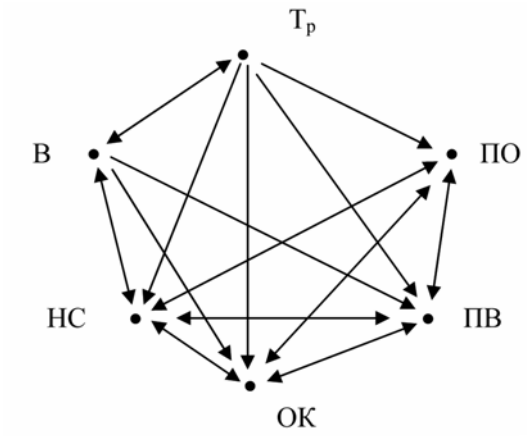
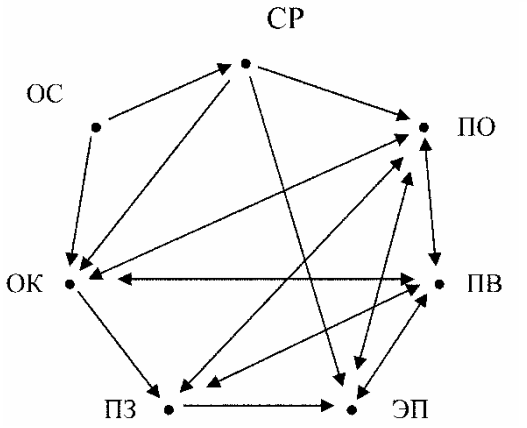
- недостаточная температура внутреннего воздуха помещений при нормальной работе системы отопления и вентиляции указала на невысокий уровень теплозащиты наружных ограждений;
- причинами появления увлажненных участков на внутренней поверхности наружных стен являлись недостаточное сопротивление теплопередаче этих конструкций и неэффективная работа системы естественной вентиляции;
- систематический перерасход электроэнергии был связан с недостаточной площадью и большой затененностью светопроемов обследуемых зданий;
- основные причины недостаточного воздухообмена помещений квартир 10-этажных зданий заключались в нерегулярном притоке воздуха через створки стеклопакетов, а также в установке вентиляторов и отводных кожухов кухонных зонтов в вытяжные отверстия естественной вентиляции.

Второй подход по исследованию энергоэффективности здания позволяет более углубленно и в системном порядке определить и оптимизировать основные факторы воздействия на энергосбережение в здании как в единой энергетической и экологической системе (ЕЭЭС). Преимущество такого подхода выражается в том, что разработка архитектурно–строительного решения не повлечет за собой существенного роста затрат материально–техниче ских ресурсов при строительстве здания.

Работе по определению и оптимизации основных факторов воздействия в ЕЭЭС здания может способствовать составление мультиграфа их теплоэнергетического взаимодействия (см. таблицу).

Исследование показало, что целевую функцию по повышению эффекта энергосбережения с локальными критериями оптимальности можно значительно повысить путем оптимизации одного локального критерия. Было установлено, что оптимизация такого локального критерия, как сопротивление воздухопроницанию наружных ограждений, позволяет повысить величину возникающего в них экономайзерного эффекта при инфильтрации воздуха и обеспечить снижение тепловых потерь через эти конструкции в многоэтажном здании на величину до 18 % [3]. Проводились

исследования влияния этого же критерия на теплопотери помещений при эксфильтрации воздуха [4].

Факторы влияния в ЕЭЭС здания	
	$T_р$ – расчетная температура наружного воздуха В – ветровой напор НС– наружные стены ОК –окна ПО – подсистема отопления ПВ–подсистема естественной вентиляции
	СР – солнечная радиация ОС – осадки ПО – подсистема отопления ПВ–подсистема естественной вентиляции ОК – окна ПЗ–покрытие здания ЭП – экологические параметры воздуха помещений

Выводы

1. Подход к проектированию энергоэффективного здания, заключающийся в проведении натурных обследований его тепловой защиты и определении энергетических потребностей здания-аналога, позволяет выявить типичные недостатки проектного решения по повышению тепловой эффективности и формированию микроклимата помещений, а также наметить способы по снижению энергетических потребностей проектируемого здания.

2. При втором подходе, основанном на более углубленном и системном анализе основных факторов воздействия на энергосбережение в здании, оптимизация одного из локальных критериев может дать существенный энергосберегающий эффект.

Список литературы

1. Береговой, А.М. Архитектурно-строительные основы энергосбережения / А.М. Береговой. В.А. Береговой, А.В. Гречишкин. – Пенза, ПГУАС, 2018. – 136 с.

2. Береговой, А.М. Использование тепла подземных помещений в энергосбережении / А.М. Береговой, М.А. Дерина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №1. – С. 85–89.

3. Береговой, А.М. Эффект энергосбережения в помещении с естественной вентиляцией в условиях инфильтрации воздуха через наружную стену / А.М. Береговой, А.В. Мальцев, М.А. Дерина, А.В. Гречишкин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №3. – С. 140–144.

4. Береговой, А.М. Оценка тепловых потерь при эксфильтрации воздуха через пористую структуру материала ограждения / А.М. Береговой, М.А. Дерина, В.А. Береговой, А.В. Мальцев // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2. – С. 79–83.

References

1. Beregovoy, A.M. Architectural and construction fundamentals of energy saving / A.M. Beregovoy. V.A. Beregovoy, A.V. Grechishkin. – Penza: PGUAS, 2018.– 136 p.

2. Beregovoy, A.M. Use of underground heat in energy saving / A.M. Beregovoy, M.A. Derina // Regional architecture and engineering. – 2016. – No. 1. – P. 85–89.

3. Beregovoy, A.M. The effect of energy saving in room with natural ventilation in terms of air infiltration through exterior wall / A.M. Beregovoy, A. V. Maltsev, M.A. Derina, A.V. Grechishkin // Regional architecture and engineering. – 2013. – №3. – P. 140–144.

4. Beregovoy, A.M. Evaluation of heat losses during exfiltration of air through the porous structure of the material of the enclosure structure /A. M. Beregovoy, M. A. Derina, V. A. Beregovoy, A.V. Maltsev // Regional architecture and engineering. – 2014. – № 2. – P. 79–83.

УДК 711.58 DOI 10.54734/20722958_2022_3_218

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

Акимова Мария Сергеевна,
кандидат экономических наук, доцент кафедры «Кадастр недвижимости и право»
E-mail: mary-kim16@yandex.ru

Карабанова Наталья Юрьевна,
кандидат экономических наук, доцент кафедры «Кадастр недвижимости и право»
E-mail: terramarket58@yandex.ru

Государственный университет по землеустройству
Россия, 105064, Москва, ул. Казакова, 15,
тел.: +7 (499) 261 95 45

Антропов Дмитрий Владимирович,
кандидат экономических наук, доцент кафедры землепользования и кадастров
E-mail: antropovzem@gmail.com

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

Akimova Mariya Sergeevna,
Candidate of Economics, Associate Professor of the department «Real Estate Cadastre and Law»
E-mail: mary-kim16@yandex.ru

Karabanova Natalia Yurievna,
Candidate of Economics, Associate Professor of the Department «Real Estate Cadastre and Law»
E-mail: terramarket58@yandex.ru

State University of Land Management
Russia, 105064, Moscow, 15, Kazakova St.,
tel.: +7 (499) 261 95 45

Antropov Dmitry Vladimirovich,
Candidate of Economics, Associate Professor of the Department of Land Use and Cadastre
E-mail: antropovzem@gmail.com

ТЕХНОЛОГИЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ГРАНИЦ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ ДЛЯ ПЛАНИРОВКИ ТЕРРИТОРИИ

М.С. Акимова, Н.Ю. Карабанова, Д.В. Антропов

Выявлены проблемы, связанные с внесением сведений о границах населенных пунктов в единый государственный реестр недвижимости, препятствующих решению вопросов по предоставлению земельных участков физическим и юридическим лицам, а также территориальному планированию. Уточнена технология установления границ населенных пунктов в территориальном планировании, что способствует вовлечению в хозяйственный оборот земельных участков, повышает инвестиционную привлекательность территорий населенных пунктов.

Ключевые слова: планировка территории, границы населенных пунктов, технология, сельские поселения, землепользование, единый государственный реестр недвижимости

TECHNOLOGY OF SETTING THE BOUNDARIES OF SETTLEMENTS FOR PLANNING OF TERRITORY

M.S. Akimova, N.Y. Karabanova, D.V. Antropov

The problems associated with the entry of information on the boundaries of settlements in the unified State Register of Real Estate, preventing the resolution of issues on the provision of land to individuals and legal entities, as well as territorial planning, have been identified. The technology of setting the boundaries of settlements in territorial planning has been clarified, which contributes to the involvement of land plots in economic turnover, increases the investment attractiveness of territories of settlements.

Keywords: territory planning, boundaries of settlements, technology, rural settlements, land use, unified state register of real estate

В сельской местности нет четких границ между территорией населенного пункта, сельскохозяйственными, лесными и прочими землями. В структуре сельских поселений преобладают приусадебные земельные участки и незастроенные территории, и часто оказывается, что индивидуальная жилая застройка выходит за пределы села и дома возводятся на землях, не предназначенных для жилищного строительства. Чтобы урегулировать подобные проблемы землепользования у органов местной власти появились административно-правовые инструменты в виде территориального планирования и градостроительного зонирования, проектов межевания и планировки, что четко прописано в действующих законах [1–3].

После принятия федерального закона «О стратегическом планировании в Российской Федерации» [4], в качестве поддержки органам местного самоуправления для целей развития сельских территорий направлен ряд государственных стратегических документов, разрабатываемых в рамках целеполагания, планирования, прогнозирования и программирования по территориальному и отраслевому принципам [5–7]. Благодаря чему в сельской местности развивается транспортная, инженерная и социальная инфраструктуры, обустраивается жилищное пространство, поддерживается малый и средний агробизнес, формируются новые точки роста, развивается туризм, привлекаются инвесторы [8].

Эффективность землепользования возрастает. Однако остается много нерешенных проблем, влияющих на использование земель и, как следствие, приводящих к недобору местных налогов (отсутствие желания молодежи жить и работать в деревне, неиспользуемые или неоформленные земли и т.д.).

Важность реализации стратегий социально-экономического развития как основного инструмента в муниципальном управлении в сельской местности подчеркивают Б.С. Жихаревич и Н.А. Лебедева [9]. Стратегирование на муниципальном уровне, однако, является все еще принудительным инструментом, который местные органы власти обязаны применять во исполнение норм законодательства. В результате большинство стратегий составляется формально и не вызывает положительного эффекта действия на управление развитием сельского поселения.

Чаще всего органы местного самоуправления используют более знакомые им инструменты в виде схем территориального планирования, генеральные планы поселений и правила землепользования и застройки. Многие исследователи подчеркивают необходимость выполнения работ по установлению, учету и регистрации границ населенных пунктов как основы для последующего эффективного управления земельными ресурсами [10–13]. Стратегическое управление сельскими населенными пунктами с помощью инструментов территориального планирования в Пензенской области рассматривают О.В. Тараканов [14, 15], А.А. Люкшина, Н.В. Крылова, Н.В. Корягина [16] и др. Выявлена зависимость эффективности землепользования от реализации генеральных планов и установления границ населенных пунктов; обоснована важность грамотного подхода к разработке и реализации стратегических документов в сельской местности.

Инструменты земельного менеджмента представлены в исследовании зарубежных авторов, обобщивших опыт многих регионов мира по управлению земельными ресурсами [17]. В работе показывается большое значение системы учета и регистрации объектов недвижимости как основы при принятии управленческих решений относительно использования земель.

Нами уточняется технология установления границ населенных пунктов в территориальном планировании как основы повышения эффективности землепользования в сельской местности.

Проблемы управления землями населенных пунктов в Шемышейском районе, Пензенской области

В табл. 1 приведена структура района по муниципальным образованиям. Общая площадь населенных пунктов составляет 8104,3 га [18].

Таблица 1

Административно-территориальный состав Шемышейского района

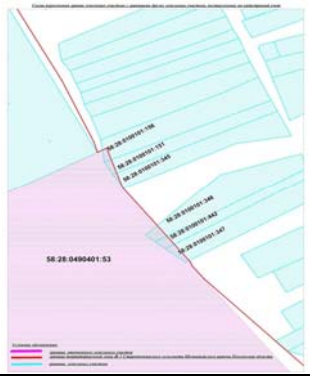
№ п/п	Муниципальные образования, входящие в состав муниципального района	Количество населенных пунктов	Площадь МО, га	Периметр границы МО, км
1	2	3	4	5
1	рабочий поселок Шемышейка	3	16054,209	81,928
2	Армиевский сельсовет	3	19191,523	87,469
3	Воробьёвский сельсовет	3	5033,393	38,230
4	Каргалейский сельсовет	4	8161,082	82,065
5	Каржимантский сельсовет	4	12761,731	65,364
6	Колдаисский сельсовет	3	4780,797	43,054
7	Наскафтымский сельсовет	6	35884,553	145,986
8	Русконоркинский сельсовет	2	7743,225	49,075
9	Синодский сельсовет	2	13046,481	70,493
10	Стародемкинский сельсовет	2	8472,020	56,816
11	Старозахаркинский сельсовет	3	9468,091	57,658
12	Старояксарский сельсовет	2	7092,455	44,108
13	Усть-Узинский сельсовет	2	11506,664	69,532
	Итого:	39	159196,224	891,778

В Шемышейском районе границы установлены только в 5 населенных пунктах (данные ЕГРН), что влечет за собой множество проблем для органов местного самоуправления, а именно препятствует решению вопросов по предоставлению земельных участков физическим и юридическим лицам, а также размещению объектов капитального строительства и т.д.

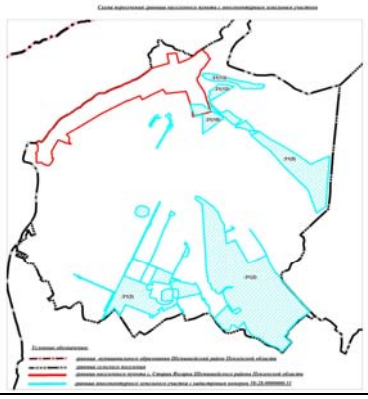
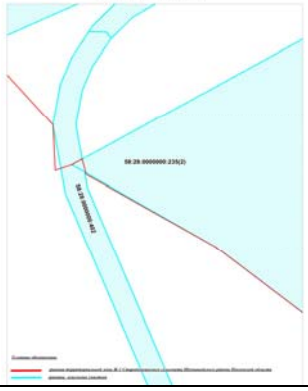
Выделены и классифицированы основные проблемы, которые препятствуют своевременной подготовке документов для внесения сведений о границах населенных пунктов в ЕГРН (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика проблем при установлении границ населенных пунктов в Шемышейском районе, Пензенской области

№	Проблема	Общие сведения	Пример
1	2	3	4
1	*В ЕГРН выявляются реестровые ошибки в виде обнаружения сведений о пересечении границ населенных пунктов с учтенными земельными участками*	Устанавливаемая граница населенного пункта пересекает границы земельных участков, что требует исправления такой ошибки и влечет за собой дополнительные расходы; может стать основанием для отказа для внесения сведений в ЕГРН	Выявлены пересечения при постановке на учет границы территориальной зоны Ж-1 в Стародемкинском сельсовете 

Окончание табл. 2

1	2	3	4
2	*В ЕГРН выявляются реестровые ошибки в виде пересечения границ населенных пунктов с границами многоконтурных земельных участков*	В этом случае установление границ населенного пункта без выполнения дополнительных кадастровых работ невозможно, что влечет за собой дополнительные расходы	Выявлено пересечение границы с.Старая Яксарка с границей многоконтурного земельного участка 
3	*Пересечение границы населенного пункта с земельными участками, занятыми линейными объектами*	Внести в ЕГРН сведения о населенном пункте без пересечения его границами земельных участков, на которых размещены объекты капитального строительства, с нулевым кадастровым номером, не представляется возможным	Выявлены пересечения границы с.Старое Назимкино с границей земельного участка, занятого линейными объектами
4	*Пересечение границы населенного пункта с земельными участками из состава земель лесного фонда и сельскохозяйственного назначения*	По данным ЕГРН, земельный участок относится к лесному фонду, а по факту застроен домами, что приводит к спорам	Выявлено пересечение границ с земельным участком категории земель лесного фонда 

Рекомендации по установлению границ населенных пунктов

Для решения выявленных проблем уточнен алгоритм внесения в ЕГРН сведений о границах населенных пунктов. Законодательством установлены обязательные стадии по определению границ населенных пунктов при подготовке документов территориального планирования (рис. 1, стадии №5, 6, 8-16).

1. Принятие решения о разработке проекта генерального плана или схемы территориального планирования

2. Проведение конкурса на разработку документации

3. Заключение контракта

4. Подготовительные работы (исполнитель)

5. Разработка документов территориального планирования

6. Определение площади и координат характерных точек

7. Проверка пересечения в ЕГРН (орган регистрации прав)

8. Составление приложения к генеральному плану, содержащего сведения о границах населенных пунктов (графическое описание местоположения границ населенных пунктов и перечня координат характерных точек этих границ в системе координат, используемой для ведения ЕГРН)

9. Размещение документации в сети Интернет (в том числе в ФГИС ТП) (заказчик)

10. Наделение границ в ЕГРН статусами "временные"

11. Создание согласительной комиссии (заказчик)

12. Принятие решения о согласовании документов территориального планирования (заказчик)

13. Оповещение о проведении публичных слушаний(заказчик)

14. Проведение публичных слушаний (заказчик)

15. Опубликование протокола о результатах публичных слушаний (заказчик)

16. Утверждение документации (заказчик)

17. Составление XML-документа о границах населенных пунктов (исполнитель)

18. Принятие органом регистрации прав решения (решение о внесении сведений в ЕГРН или о невозможности внесения)

19.Закрепление границ на местности межевыми знаками

Рис. 1. Уточненная технология установления границ населенных пунктов

Для ускорения процесса образования границ и предупреждения препятствующих факторов необходимо включить в алгоритм стадии № 7 и № 10.

После прохождения стадии № 6, в том числе подтверждения заказчиком работ проекта плана границ, предлагается обязать исполнителя передавать этот проект в орган регистрации прав. При условии отсутствия наложений границы следует наделять статусом «временные» на период 3 месяца (стадия №10), что позволит устанавливать временный запрет на государственный кадастровый учет земельных участков, расположенных в зоне риска, до окончания доработки и согласования документации. Введение этой процедуры направлено на предотвращение появления наложений границ населенных пунктов с земельными участками, сведения о которых могут быть внесены в ЕГРН за период согласования и утверждения соответствующих документов.

В спорных ситуациях необходимо в обязательном порядке закрепить границы населенных пунктов на местности межевыми знаками (стадия №19).

В ходе настоящего исследования были проведены экспериментальные работы по установлению границы села Старое Назимкино, Шемышейского района. За основу принят разработанный и утвержденный генеральный план 2017 года Старозахаркинского сельсовета.

План границ (рис. 2) был передан в орган регистрации прав для проверки пересечений с приграничными земельными участками в электронном виде «в формате jpg», перечень координат характерных точек – в формате Excel. Орган регистрации уведомит о наличии пересечения границы населенного пункта с земельным участком с кадастровым номером 58:28:0000000:99 (установленное разрешенное использование по документу – для размещения объектов энергоснабжения, договор аренды земельных участков №62, дата регистрации 11.05.2012 г.). В данном случае проблема наличия пересечения границы населенного пункта с границей земельного участка, предназначенного для размещения протяженного объекта, решена путем оформления публичного сервитута и снятия земельного участка с государственного кадастрового учета.

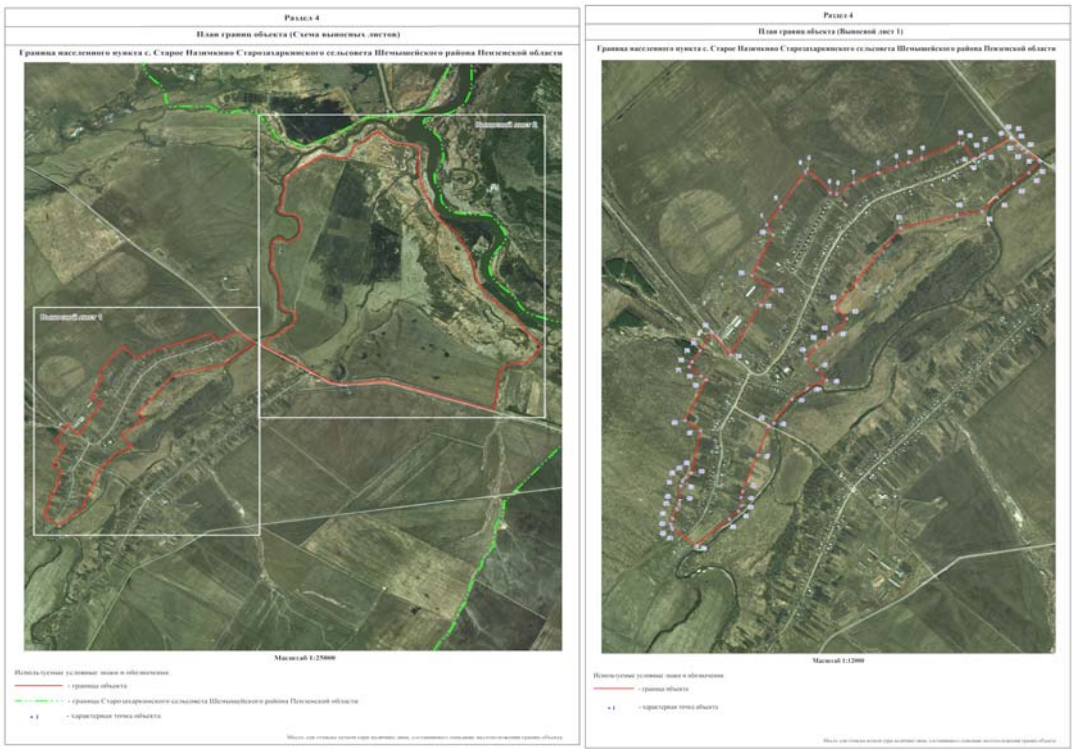


Рис. 2. План границ (схема выносных листов) (начало)

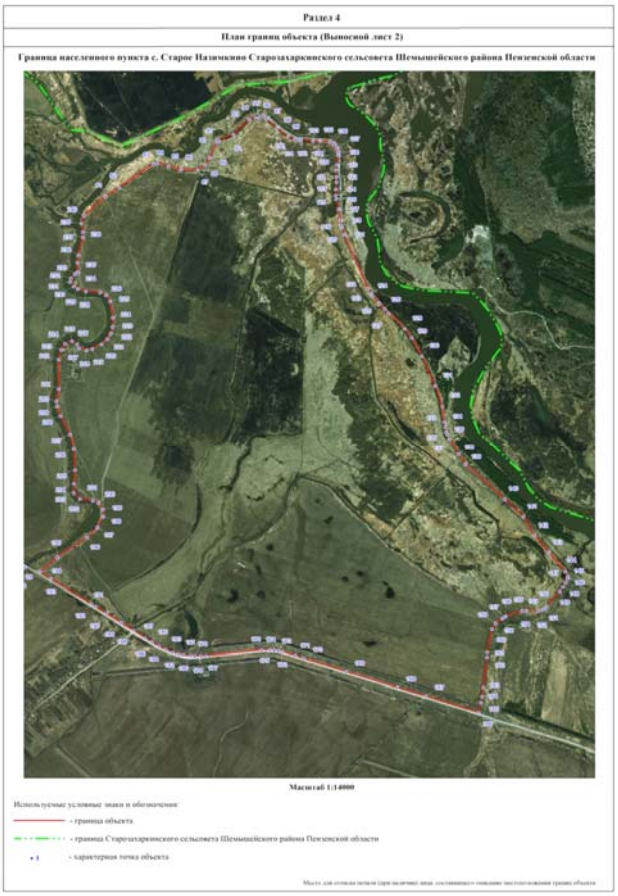


Рис. 2. План границ (схема выносных листов) (окончание)

После оформления публичного сервитута на земельный участок с кадастровым номером 58:28:0000000:99 и снятия с кадастрового учета перешли к этапу 10. Орган регистрации прав наделяет границу с.Старое Назимкино в ЕГРН статусом «временный». Этапы 11-16 выпадают в этом случае.

Выводы

1. В основе планировки территории, направленной на устойчивое развитие сельского поселения в целом и грамотное размещение объектов строительства в частности, лежит проведение работ по установлению границ населенного пункта и внесению сведений в ЕГРН.
2. Проведен анализ основных проблем при установлении границ населенных пунктов в Шемышейском районе, Пензенской области.
3. Дополнена технология установления границ населенных пунктов, обоснованная при работе с границами с.Старое Назимкино, Шемышейского района, Пензенской области.

Список литературы

1. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 30.04.2021) // Российская газета. – 30.12.2004. – № 290.
2. Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ (ред. от 30.12.2021) // Собрание законодательства РФ. – 29.10.2001. – № 44, ст. 4147.
3. Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации: федер. закон от 6.10.2003 № 131-ФЗ // СПС КонсультантПлюс. – URL: http://www.consultant.ru/ (дата обращения: 25.01.2022).

4. О стратегическом планировании в Российской Федерации: федер. закон от 28.06.2014 N 172-ФЗ (ред. от 31.07.2020) // СПС КонсультантПлюс. – URL: http://www.consultant.ru/ (дата обращения: 25.01.2022).

5. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Комплексное развитие сельских территорий» и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации: постановление Правительства РФ от 31 мая 2019 г. N 696 // СПС Гарант. – URL: https://base.garant.ru/ (дата обращения: 04.02.2022).

6. Стратегия устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации на период до 2030 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 02.02.2015 г. № 151-р. // СПС Гарант. – URL: https://base.garant.ru/ (дата обращения: 05.02.2022).

7. О стратегическом планировании в Пензенской области: закон Пензенской области от 04.03.2015 № 2683-ЗПО // Законодательное собрание Пензенской области: офиц. сайт. – URL: https://www.zspo.ru/legislative/acts/24038/ (дата обращения: 25.01.2022).

8. Проблемы и перспективы социально-экономического развития сельских территорий: региональный аспект. – М.: Издание Государственной Думы, 2021. – 320 с.

9. Жихаревич, Б.С. Стратегическое планирование в сельских поселениях России / Б.С. Жихаревич, Н.А. Лебедева // Региональные исследования. – 2019. – № 2. – С. 36–47.

10. Огарков, А.П. Значение территориальных планов в перспективном развитии и комплексной компактной застройке сельских населенных пунктов / А.П. Огарков, И.В. Кикинзон // Землеустройство, кадастр, мониторинг земель. – 2008. – № 11. – С. 67.

11. Севостьянов, В.А. К вопросу установления границ населенных пунктов / В.А. Севостьянов // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2014. – № 3 (111). – С. 70–74.

12. Третьяченко, А.А. Установление границ поселений и населенных пунктов как инструмент эффективного использования земель / А.А. Третьяченко // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2015. – №9. – С. 59–63.

13. Царенко, А.А. Установление границ населенных пунктов как основная функция территориального планирования / А.А. Царенко, И.В. Шмидт, С.А. Киреева // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 404–413.

14. Тараканов, О.В. Проблемы территориального и стратегического развития сельских территорий Пензенского региона / О.В. Тараканов, Е.С. Утюгова, Д.Р. Ярахмедова // Культура управления территорией: экономические и социальные аспекты, кадастр и геоинформатика: сб. – Н. Новгород, 2021. – С. 34–36.

15. Тараканов, О.В. Роль территориального планирования в повышении эффективности использования территорий / О.В. Тараканов, Е.С. Утюгова // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2020. – № 3 (28). – С. 218–223.

16. Люкшина, А.А. Изменение границ населенных пунктов на примере с. Старая Яксарка, Шемышейского района, Пензенской области / А.А. Люкшина, Н.В. Крылова, Н.В. Корягина // Инновационные идеи молодых исследователей для агропромышленного комплекса России: сб. ст. Международной научно-практической конференции молодых ученых (г. Пенза, 17–18 марта 2016 г.). – Пенза: РИО ПГСХА, 2016. – № 1. – С. 107–110.

17. Williamson, I. Land Administration for Sustainable Development / I. Williamson, S. Enemark, J. Wallace, A. Rajabifard. –New York: Esri Press, 2010. – 505 p.

18. Схема территориального планирования Шемышейского района, Пензенской области // Администрация Шемышейского района: официальный сайт. – URL: https://shem.pnzreg.ru/open-government/gradostroitelstvo/skhema-territorialnogo-planirovaniya-shemysheyskogo-rayona/ (дата обращения: 02.02.2022).

References

1. Town-planning Code of the Russian Federation No. 190-FZ dated 29.12.2004 (ed. dated 30.04.2021) // Rossiyskaya Gazeta. – 30.12.2004. – No. 290.

2. Land Code of the Russian Federation No. 136-FZ dated 25.10.2001 (ed. dated 30.12.2021) // Collection of Legislation of the Russian Federation. – 29.10.2001. – No. 44, Article 4147.3.

3. On the general principles of the organization of local self-government in the Russian Federation: feder. Law No. 131-FZ of 6.10.2003 // SPS ConsultantPlus. – URL: http://www.consultant.ru / (accessed: 25.01.2022).

4. On strategic planning in the Russian Federation: feder. the law of 28.06.2014 N 172-FZ (ed. of 31.07.2020) // SPS ConsultantPlus. – URL: http://www.consultant.ru / (date of appeal: 25.01.2022).

5. On approval of the state program of the Russian Federation «Integrated development of rural territories» and on Amendments to Some Acts of the Government of the Russian Federation: Decree of the Government of the Russian Federation of May 31, 2019 N 696 // SPS Garant. – URL: https://base .garant.ru / (accessed: 02/04/2022).

6. Strategy of sustainable development of rural territories of the Russian Federation for the period up to 2030: Decree of the Government of the Russian Federation dated 02.02.2015 No. 151-R. // SPS Garant. – URL: https://base .garant.ru / (date of application: 05.02.2022).

7. On strategic planning in the Penza region: Law of the Penza region dated 04.03.2015 No. 2683-PO // Legislative Assembly of the Penza region: ofic. website. – URL: https://www.zspo.ru/legislative/acts/24038 / (accessed: 25.01.2022).

8. Problems and prospects of socio-economic development of rural areas: regional aspect. – M.: State Duma Edition, 2021. – 320 p.

9. Zhikharevich, B.S. Strategic planning in rural settlements of Russia / B.S. Zhikharevich, N.A. Lebedeva // Regional studies. – 2019. – No. 2. – P. 36–47.

10. Ogarkov, A.P. The importance of territorial plans in the long-term development and complex compact development of rural settlements / A.P. Ogarkov, I.V. Kikinzon // Land management, cadastre, land monitoring. – 2008. – No. 11. – P. 67.

11. Sevostyanov, V.A. On the issue of establishing the boundaries of settlements / V.A. Sevostyanov // Land management, cadastre and land monitoring. – 2014. – № 3 (111). – P. 70–74.

12. Tretyachenko A.A. Setting the boundaries of settlements and settlements as a tool for effective land use / A.A. Tretyachenko // Land management, cadastre and monitoring of lands. – 2015. – No. 9. – P. 59–63.

13. Tsarenko, A.A. Setting the boundaries of settlements as the main function of territorial planning / A.A. Tsarenko, I.V. Schmidt, S.A. Kireeva // Scientific bulletin of Belgorod State University. Series: Natural Sciences. – 2018. – Vol. 42, No. 3. – P. 404–413.

14. Tarakanov, O.V. Problems of territorial and strategic development of rural territories of the Penza region / O.V. Tarakanov, E.S. Utugova, D.R. Yarakhmedova // Culture of territory management: economic and social aspects, cadastre and geoinformatics: collection. – Nizhny Novgorod, – 2021. – P. 34–36.

15. Tarakanov O.V., Ironova E.S. The role of territorial planning in improving the efficiency of the use of territories / O.V. Tarakanov, E.S. Utugova // Education and science in the modern world. Innovation. – 2020. – № 3 (28). – P. 218–223.

16. Lyukshina, A.A. Changing the boundaries of settlements on the example of the village of Staraya Sksarka of the Shemysheysky district of the Penza region / A.A. Lyukshina, N.V. Krylova, N.V. Koryagina // Innovative ideas of young researchers for the agro-industrial complex of Russia: collection of articles of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists (Penza, March 17-18, 2016). – Penza: RIO PGSHA, 2016. – No. 1. – P. 107–110.

17. Williamson, I. Land Administration for Sustainable Development / I. Williamson, S. Enemark, J. Wallace, A. Rajabifard. – New York: Esri Press, 2010. – 505 p.

18. The scheme of territorial planning of the Shemysheysky district of the Penza region // Administration of the Shemysheysky district: official website. – URL: https://shem.pnzreg.ru/open-government/gradostroitelstvo/skhema-territorialnogo-planirovaniya-shemysheyskogo-rayona / (accessed 02.02.2022).