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 15.06.2023.
Формат 60x84 1/8.
Уч.-изд.л. 21.5. Тираж 500 экз. Первый завод 100.
Заказ № 272.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

2(55)/2023

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ 4

Ермаков А.А., Родин А.И., Ерофеев В.Т.
ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО И МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРИСТОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ ИЗ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД НА ЕЕ ХИМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ 4

Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КАК МЕТОДОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ 14

Явинский А.В., Чулкова И.Л.
ВЛИЯНИЕ ГИДРОФОБИЗИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА ЗОЛОЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ 21

Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ: МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ 30

Бодяков А.Н., Маркова И.Ю., Логвиненко А.А., Боцман Л.Н., Огурцова Ю.Н.
СВОЙСТВА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА, СТАБИЛИЗИРОВАННОГО В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ 44

Логанина В.И., Светалкина М.А., Арискин М.В.
ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЛАКОКРАСОЧНОГО ПОКРЫТИЯ НА ЕГО СТОЙКОСТЬ К ОТСЛАИВАНИЮ И РАСТРЕСКИВАНИЮ 52

Логанина В.И.
СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТИ ОТСЛАИВАНИЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОРИСТОСТИ ПОДЛОЖКИ 59

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ 63

Шеин А.И., Зайцев М.Б., Чуманов А.В., Земцова О.Г.
АКТИВНЫЕ ГАСИТЕЛИ КОЛЕБАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ, РАБОТАЮЩИЕ НА ПРИНЦИПЕ РЕАКТИВНОЙ СТРУИ 63

© Авторы публикаций, 2023
© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2023
© ПГУАС, 2023

Шеин А.И., Чуманов А.В., Земцова О.Г.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛЕНТОЧНО-ТРОСОВОГО ГАСИТЕЛЯ С ТОРСИОНОМ ИЛИ ГИДРОЦИЛИНДРОМ ОДНОСТОРОННЕГО ДЕЙСТВИЯ 69

Соловьев С.А., Инькова Ю.А., Соловьева А.А.
ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ДЕРЕВЯННЫХ СТРОПИЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НЕПОЛНОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ 77

Салтыков И.П.
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ЛЁГКИХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА «СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ» 85

Ласьков С.Н.
НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОПОРНОЙ ЗОНЫ БАЛОК СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ УЗЛОВ СО СКРЫТОЙ КОНСОЛЬЮ..... 96

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ 106

Андреев С.Ю., Лебединский К.В., Князев В.А.
ПРИНЦИПЫ ВИХРЕВОЙ МИКРОФЛЮИДИКИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В ВЫСОКОГРАДИЕНТНОМ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ... 106

Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Орлова Н.А.
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И СКОРОСТНЫХ ПОЛЕЙ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ВЫТЯЖНОГО ЗОНТА..... 117

Акифьев И.В., Еремкин А.И., Пономарева И.К.
ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ СПУТНИКОВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ 128

АРХИТЕКТУРА..... 134

Окладникова Е.В.
АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬНУЮ ОТРАСЛЬ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА.....134

Береговой А.М.
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ВОЗДУХООБМЕНА 142

Антропов Д.В., Рассказова А.А., Акимова М.С., Карабанова Н.Ю.
ПЛАНИРОВАНИЕ СОЦИАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДСКОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ НОРМАТИВНЫМ МЕТОДОМ.....147

Мирхасанов Р.Ф., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н.
КОМПОЗИЦИОННАЯ ФОРМА В АРХИТЕКТУРЕ КОНЦА XIX ВЕКА: ЭВОЛЮЦИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ МЫСЛИ....157

Мирхасанов Р.Ф., Садков В.А., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н.
ИСТОКИ ОБРАЗНОГО РЕШЕНИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ЗАДАЧ В КОМПОЗИЦИИ ТЕО ВАН ДУСБУРГА ...162

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS 4

Ermakov A.A., Rodin A.I., Erofeev V.T.
THE INFLUENCE OF CHEMICAL AND MINERALOGICAL COMPOSITION OF POROUS GLASS CERAMICS FROM ZEOLITE-CONTAINING ROCKS ON ITS CHEMICAL RESISTANCE..... 4

Budylina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.
SYSTEM ANALYSIS AS A METHODOLOGY FOR SOLVING PROBLEMS 14

Yavinskiy A.V., Chulkova I.L.
EFFECT OF HYDROPHOBIC ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF ASH-CEMENT STONE..... 21

Budylina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.
SYSTEM ANALYSIS: MATHEMATICAL BASICS SYNTHESIS OF COMPOSITE MATERIALS 30

Bodyakov A.N., Markova I.Y., Logvinenko A.A., Botsman L.N., Ogurtsova Yu.N.
PROPERTIES OF METALLURGICAL SLAG STABILIZED IN INDUSTRIAL CONDITIONS.....44

Loganina V.I., Svetalkina M.A., Ariskin M.V.
THE INFLUENCE OF SURFACE ROUGHNESS OF A PAINT COATING ON ITS RESISTANCE TO PEELING AND CRACKING 52

Loganina V.I.
STATISTICAL ANALYSIS OF THE PROBABILITY OF PAINT COATINGS PEELING DEPENDING ON THE SUBSTRATE POROSITY 59

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS..... 63

Shein A.I., Zaitsev M.B., Chumanov A.V., Zemtsova O.G.
ACTIVE DAMPERS OF BUILDINGS AND STRUCTURES VIBRATION OPERATING ON THE PRINCIPLE OF A JET STREAM 63

Shein A.I., Chumanov A.V., Zemtsova O.G.
DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF A BELT-ROPE DAMPER WITH A TORSION BAR OR A SINGLE-ACTING HYDRAULIC CYLINDER..... 69

Solovev S.A., Inkova Yu.A., Soloveva A.A.
PROBABILISTIC ASSESSMENT OF WOODEN RAFTERS STRUCTURAL RELIABILITY WITH INCOMPLETE STATISTICAL DATA 77

Saltykov I.P.
THEORETICAL AND PRACTICAL RESEARCH OF SOUND INSULATION OF LIGHT ENCLOSING STRUCTURES USING THE METHOD OF "CONCENTRATED PARAMETERS" 85

Laskov S.N.
STRESS STATE OF THE SUPPORT ZONE OF BEAMS OF PREFABRICATED MONOLITHIC UNITS WITH A HIDDEN CONSOLE 96

ENGINEERING SYSTEMS 106

Andreev S.Y., Lebedinskiy K.V., Knyazev V.A.
PRINCIPLES OF VORTEX MICROFLUIDICS FOR INTENSIFICATION OF SEPARATION OF GAS MIXTURES IN A HIGH-GRADIENT CENTRIFUGAL FIELD 106

Eremkin A.I., Averkin A.G., Ponomareva I.K., Orlova N.A.
RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PROFILES OF TEMPERATURE AND VELOCITY FIELDS IN THE FREE SPACE OF THE HOOD.....117

Akifev I.V., Eremkin A.I., Ponomareva I.K.
THE STUDY OF THE ACCURACY OF SATELLITE POSITIONING IN CONSTRUCTION 128

ARCHITECTURE 134

Okladnikova E.V.
ANALYSIS OF THE MAIN FACTORS OF IMPLEMENTATION INFORMATION MODELING TECHNOLOGIES IN THE FAR EAST CONSTRUCTION INDUSTRY 134

Beregovoy A.M.
RENEWABLE ENERGY SOURCES AND UTILIZATION OF THE HEAT FLOW OF THE PREMISES AT REGULATION OF AIR EXCHANGE 142

Antropov D.V., Rasskazova A.A., Akimova M.S., Karabanova N.Y.
SOCIAL INFRASTRUCTURE PLANNING OF URBAN LAND USE USING A NORMATIVE METHOD 147

Mirkhasanov R.F., Sabitov L.S., Garkin I.N.
COMPOSITE FORM IN ARCHITECTURE OF THE END OF THE XIX CENTURY: EVOLUTION OF ENGINEERING THOUGHT.....157

Mirkhasanov R.F., Sadkov V.A., Sabitov L.S., Bocharova Yu.V.
ORIGINS OF IMAGINATIONAL SOLUTION OF ARCHITECTURAL PROBLEMS IN THE COMPOSITION OF THEO VAN DUSBURG.....162

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691:666.266.6:620.192.47 DOI 10.54734/20722958_2023_2_4

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
Россия, 430005, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68, тел.: (8342) 47-71-56

Ерофеев Владимир Трофимович, доктор технических наук, профессор, академик РААСН, директор института архитектуры и строительства, директор НИИ «Материаловедение», зав. кафедрой «Строительные материалы и технологии»
E-mail: yerofeevvt@mail.ru

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

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

Mordovian State University named after N.P. Ogarev
Russia, 430005, Saransk, 68, Bolshevistskaya St., tel.: (8342) 47-71-56

Erofeev Vladimir Trofymovich, Doctor of Sciences, Professor, Academician of the RAACSN, Director of the Institute of Architecture and Construction, Director of the Research Institute «Materials Science», Head of the department «Building materials and technologies»
E-mail: yerofeevvt@mail.ru

Ermakov Anatoly Anatolyevich, Postgraduate student of the department «Building materials and technologies»
E-mail: anatoly.ermakov97@mail.ru

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

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО И МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРИСТОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ ИЗ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД НА ЕЕ ХИМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ*

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

Представлены результаты исследования химической стойкости пористой стеклокерамики на основе цеолитсодержащих пород Республики Мордовия. Установлено, что по показателю химической стойкости пористые стеклокерамические материалы из цеолитсодержащих пород превосходят пеностекло. Разработанные материалы рекомендуется использовать в качестве изоляции трубопроводов, промышленных установок и т.п.

Ключевые слова: пористая стеклокерамика, цеолитсодержащие породы, РФА, химическая стойкость

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-10422).

THE INFLUENCE OF CHEMICAL AND MINERALOGICAL COMPOSITION OF POROUS GLASS CERAMICS FROM ZEOLITE-CONTAINING ROCKS ON ITS CHEMICAL RESISTANCE

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

The results of a study of chemical resistance of porous glass ceramics based on zeolite-containing rocks from the Republic of Mordovia are presented. It has been established that porous glass-ceramic materials from zeolite-containing rocks are superior to foam glass in terms of chemical resistance. The developed materials are recommended to be used as insulation of pipelines, industrial installations, etc.

Keywords: porous glass ceramics, zeolite-containing rocks, XRD, chemical resistance

Введение

Пористые стеклокерамические материалы обладают многими уникальными свойствами. Они имеют низкий коэффициент теплопроводности, высокую прочность при низкой плотности, высокую химическую и биологическую стойкость, могут эксплуатироваться при высоких температурах и др. [1, 2], благодаря чему их часто используют в качестве теплоизоляционного материала при строительстве и ремонте объектов гражданского и промышленного назначения, в том числе АЭС и предприятий топливной промышленности [3, 4].

Основным сырьем для получения пористых стеклокерамических материалов для строительной отрасли являются отходы стекла [4], шлаки черной и цветной металлургии [5], зола-унос [1, 2], кремнистые и другие горные породы [6–9]. В зависимости от используемого сырья технологии получения материалов также разнообразны: вспенивание коллоидной суспензии [10], порошковый метод [1, 2] и др. В ранних работах нами описаны технологические особенности получения пористой стеклокерамики в форме блоков из цеолитсодержащих трепелов [11, 12]. На первом этапе проводили совместную механохимическую активацию сухих компонентов (трепел и кальцинированная сода), а затем полученную шихту обжигали при температуре не более 850 °С. Во время обжига шихта вспенивается и кристаллизуется. Полученные материалы в форме блоков имеют равномерную мелкопористую структуру, низкую плотность, относительно высокую прочность, а также высокую предельную температуру эксплуатации.

Для получения пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих пород (ЦСП) можно использовать сырье, значительно различающееся по химическому и минералогическому составу [6, 7, 9, 10]. Известно, что химический и минералогический состав сырья, а также технология получения оказывают непосредственное влияние на состав, структуру и свойства будущего стеклокерамического материала [7, 13]. Стойкость стеклокерамики к воздействию агрессивных химических сред в первую очередь зависит от структуры, химического и минералогического состава материала [5, 14, 15]. Следовательно, цель исследования – установить влияние химического и минералогического состава пористой стеклокерамики на основе цеолитсодержащих пород на ее химическую стойкость в воде, водных растворах кислот и щелочей.

Задачи:

– установить влияние химического и минералогического состава ЦСП на физико-механические и теплофизические свойства образцов пористой стеклокерамики;

– методом рентгенофазового анализа (РФА) определить влияние химического и минералогического состава пород, а также различных добавок на фазовый состав пористой стеклокерамики;

– установить влияние химического и минералогического состава пористой стеклокерамики на ее химическую стойкость.

Материалы и методы исследования

Для получения образцов пористой стеклокерамики использовали цеолитсодержащие породы трех месторождений, диатомит, Al_2O_3, $Mg(OH)_2$, кальцинированную соду

и хлористый калий. Химический и минералогический составы цеолитсодержащих пород и диатомита приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Химический состав пород

Порода	Химический состав, % масс.										
	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	MgO	TiO_2	Na_2O	SO_3	P_2O_5	ППП
ЦСП №1	70,9	2,4	12,4	3,5	1,7	1,7	0,5	0,1	0	0,3	6,5
ЦСП №2	67,9	7,7	7,6	2,0	1,6	1,1	0,3	0,2	0,1	0,2	11,3
ЦСП №3	62,3	11,3	6,7	2,0	1,4	0,9	0,3	0,1	0	0,2	14,8
Диатомит	81,5	1,5	5,3	2,0	1,0	0,9	0,3	0,2	1,8	0	5,5

Таблица 2

Минералогический состав пород

Порода	Минералогический состав, %						
	Кварц	Кальцит	Гейландит	Мусковит	Кристобалит	Тридимит	Аморфная фаза
ЦСП №1	29,1	0	18,6	16,1	16,2	0	20,0
ЦСП №2	15,5	10,5	20,4	13,1	20,5	0	20,0
ЦСП №3	8,5	21,3	19,6	9,9	19,2	1,5	20,0
Диатомит	10,9	0	0	8,1	0	0	80,0

Для снижения температуры плавления и вспенивания шихты использовали соду кальцинированную (Na_2CO_3). Для получения равномерной макроструктуры пор в стеклокерамике в качестве добавки использовали хлористый калий (KCl). Для уменьшения кажущейся плотности и повышения предельной температуры эксплуатации образцов пористой стеклокерамики использовали брусит ($Mg(OH)_2$) и Al_2O_3. Массовая доля основного вещества всех добавок более 99 %.

Шихту для получения образцов пористых стеклокерамических материалов изготавливали совместной механохимической активацией в планетарной шаровой мельнице Retsch PM 400 цеолитсодержащих пород, диатомита, кальцинированной соды и добавок. Режим механохимической активации: время – 30 минут, перегрузки внутри барабана мельницы – 20 g. Составы шихты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Составы шихты

№ состава	Состав шихты, %							
	ЦСП №1	ЦСП №1	ЦСП №1	Диатомит	Al_2O_3	$Mg(OH)_2$	Na_2CO_3	KCl
С1	81,5	0	0	0	0	0	18,2	0,3
С2	0	73,36	0	8,14	0	0	18,2	0,3
С3	0	0	76,5	5	0	0	18,2	0,3
С4	0	61,15	0	8,14	12,21	0	18,2	0,3
С5	0	0	63,5	15	0	3	18,2	0,3

Полученную шихту обжигали в муфельной печи в кубических металлических формах размером 150×150×150 мм. Режим обжига: нагрев до температуры 650 °С со скоростью 6 °С/мин, выдержка при температуре 650 °С – 1 час, нагрев до температуры

830 °C со скоростью 4 °C/мин, выдержка при температуре 830 °C в течение 30 минут. После остывания форм вместе с печью до комнатной температуры их разбирали, а образцы подготавливали для дальнейших испытаний.

Кажущуюся плотность пористой стеклокерамики определяли отношением массы сухих образцов к их объему. Исследование проводили на образцах кубической формы с размером грани 90±2 мм.

Прочность при изгибе материалов определяли на сухих образцах в форме прямоугольной призмы с размерами граней 120×30×30 мм. Образцы помещали горизонтально на две цилиндрические опоры (диаметр опор – 6±0,1 мм), расположенные на расстоянии 100±1 мм друг от друга. Сверху по всей ширине образца на равном расстоянии от опор укладывали стержень (диаметр 6±0,1 мм), через который прикладывали силу на образец. Скорость приложения силы для всех образцов была одинаковой. В результате эксперимента контролировали силу, при которой образец разрушился. По стандартной формуле определяли прочность при изгибе.

Прочность при сжатии пористой стеклокерамики определяли на образцах кубической формы с размером грани 90±5 мм. В ходе эксперимента фиксировали максимальное значение силы, при которой в образце появились трещины или высота образца уменьшилась на 10 % от первоначального значения.

Коэффициент теплопроводности образцов определяли мобильным измерителем теплопроводности МИТ–1 (Россия) зондовым методом в соответствии с инструкцией к прибору.

При определении кажущейся плотности, прочности при изгибе и сжатии, а также коэффициента теплопроводности за окончательный результат принимали среднеарифметическое значение результатов испытания пяти образцов каждого состава.

Рентгенофазовый анализ образцов пористой стеклокерамики проводили с использованием прибора Empyrean PANalytical (Нидерланды) с полупроводниковым детектором PIXcel^{3D}. Образцы обожженной шихты измельчали в ступке агатовым пестиком с ацетоном до фракции < 90 мкм. Дифракционные картины регистрировались в излучении CuK_{a1+2} в диапазоне углов 2θ=4–80°. Шаг сканирования – 0,0131 °/мин, времени интеграции – 150 сек. Методом Ханавальта определяли качественный фазовый состав образцов с использованием открытой базы данных по кристаллографии.

Химическую стойкость вспененных стеклокерамических материалов определяли с использованием образцов порошка (фракция 0,315–0,630 мм). Потерю массы образцов определяли после кипячения в течение 3 часов в дистиллированной воде, в водном растворе 6 Н HCl и в смеси равных объемов 1 Н растворов Na_2CO_3 и NaOH. 5±0,0005 г подготовленной пробы помещали в колбу и заливали 100 см^3 реагента. Колба была соединена с обратным холодильником. После кипячения содержимого колбы в течение 3 часов из нее сливали агрессивную жидкость, а образец промывали дистиллированной водой. Промытый образец вместе с дистиллированной водой выливали в воронку с беззольным бумажным фильтром. Воронку с фильтром и тестируемым образцом прокаливали в печи при температуре 800±25 °C, охлаждали в эксикаторе над $CaCl_2$ и взвешивали.

Формула для определения химической стойкости:

$$X = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100,$$

где m – масса образца перед испытанием, г; m_1 – масса образца после испытания, г. За конечный результат принимали среднеарифметическое значение результатов испытания трех образцов каждого состава.

Результаты и их обсуждение

Результаты изучения физико-механических (кажущаяся плотность, прочность при изгибе и сжатии) и теплофизических (коэффициент теплопроводности) свойств образцов пористой стеклокерамики, испытанных в работе, сведены в табл. 4.

Таблица 4

Свойства образцов пористой стеклокерамики

№ состава	Свойства			
	Кажущаяся плотность, кг/м^3	Прочность при изгибе, МПа	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С
С1	298,4	1,52	3,31	0,080
С2	287,2	1,93	3,49	0,072
С3	174,2	1,03	1,83	0,057
С4	269,7	1,12	2,09	0,070
С5	158,7	0,57	0,9	0,055

Согласно данным табл. 4, разработанные пористые стеклокерамические материалы имеют кажущуюся плотностью ≈160–300 кг/м^3, прочность при изгибе и сжатии до ≈1,9 МПа и ≈3,1 МПа соответственно и коэффициент теплопроводности 0,055–0,08 Вт/м·°С. По своим свойствам разработанные материалы превосходят пеностекло, а также стеклокерамику из отходов промышленного производства [1, 2].

Макроструктура образцов стеклокерамики из цеолитсодержащих пород различного химического и минералогического состава, а также с использованием добавок $Mg(OH)_2$ и Al_2O_3 представлена на рис. 1.

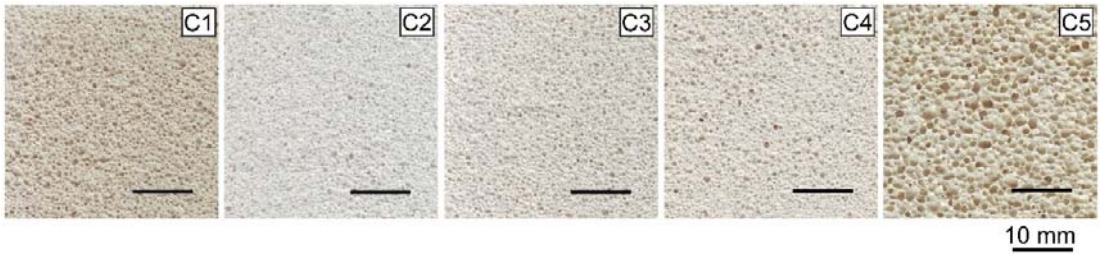


Рис. 1. Фото поверхности образцов пористой стеклокерамики
(С1–С5 – номера составов)

Все образцы пористой стеклокерамики имеют равномерную мелкопористую структуру с максимальным размером ячеек <2 мм. Установлено изменение цвета поверхности образцов, что, вероятно, связано с их различным фазовым составом.

На рис. 2 представлены результаты рентгенофазового анализа образцов обожженной стеклокерамики. Для наглядности рентгенограммы представлены в интервале углов 2θ=10–45°.

По результатам проведенного РФА образцов установлен качественный фазовый состав стеклокерамических материалов. На всех рентгенограммах в интервале углов от 17 до 37° (2θ) находится аморфное гало. Изменение аморфного гало в зависимости от количества в составе материала CaO, Al_2O_3 и MgO незначительное.

Кристаллическая фаза образца С1 представлена анортоклазом [$(Na_{0.85}K_{0.15})(AlSi_3O_8)$, Code: 96-900-0860] и кварцем [SiO_2, Code: 96-900-9667]. Образец получен из шихты без кальцита в составе.

При увеличении в составе шихты кальцита до 10,5 % (образец С2) интенсивность линий анортоклаза уменьшилась. На рентгенограммах появились новые линии, соответствующие кристаллическим фазам волластонита [$CaSiO_3$, Code: 96-900-5779] и девитрита [$Na_2Ca_3Si_6O_{16}$] [16].

При добавлении в состав шихты из ЦСП №2 Al_2O_3 в количестве 12,21 % (образец С4) наблюдается уменьшение интенсивности линий девитрита, а линии волластонита и анортоклаза практически незаметны. Появились линии нефелина [$K_{0.39}Na_{1.5}Al_2SiO_9$, Code: 96-901-3820], который стал основной кристаллической фазой стеклокерамики. Образование нефелина при увеличении в составе стеклокерамики Al_2O_3 наблюдали и другие авторы [17].

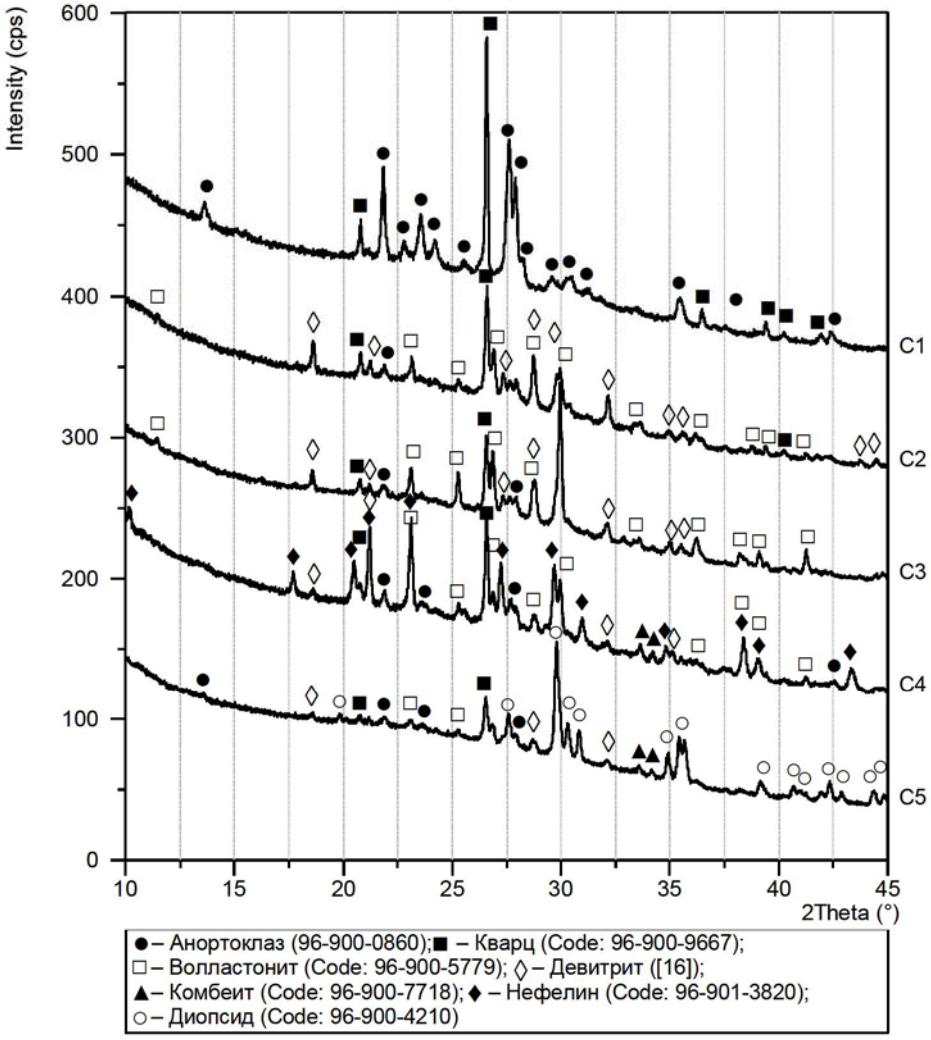


Рис. 2. Рентгенограммы образцов пористой стеклокерамики
(С1–С5 – номера составов)

При использовании цеолитсодержащей породы №3 (образец С3) с максимальным содержанием кальцита в составе (21,3 %) кристаллическая фаза образца характеризуется незначительным количеством девитрита и анортоклаза и существенным увеличением волластонита. Новые кристаллические фазы не определены.

При модификации шихты на основе ЦСП №3 бруситом в количестве 3 % (образец С5) на рентгенограмме наблюдается значительное уменьшение интенсивности линий волластонита, девитрита, кварца и анортоклаза. Появились новые линии, соответствующие кристаллическим фазам комбеита [$Na_2Ca_2Si_3O_9$, Code: 96-900-7718] и диопсида [$Mg_{0,56}Ca_{0,44}SiO_3$, Code: 96-900-4210]. Доминирующей кристаллической фазой пористой стеклокерамики является диопсид.

Наглядно влияние химического и минералогического состава образцов пористых стеклокерамических материалов на их химическую стойкость представлено на рис. 3. Химическую стойкость определяли по потере массы порошкообразных образцов (фракция 0,315–0,63 мм) после кипячения в течение 3 часов в агрессивных химических средах.

После кипячения образцов стеклокерамических материалов (фракция 0,315–0,63 мм) в течение 3 часов в воде все образцы потеряли в массе менее 1 % (см. рис. 3). Влияние химического и минералогического состава на стойкость пористой стеклокерамики в воде незначительное. Данный результат подтверждает способность стеклокерамических материалов не разрушаться под действием воды. Материал может эксплуатироваться во влажных условиях без ограничений.

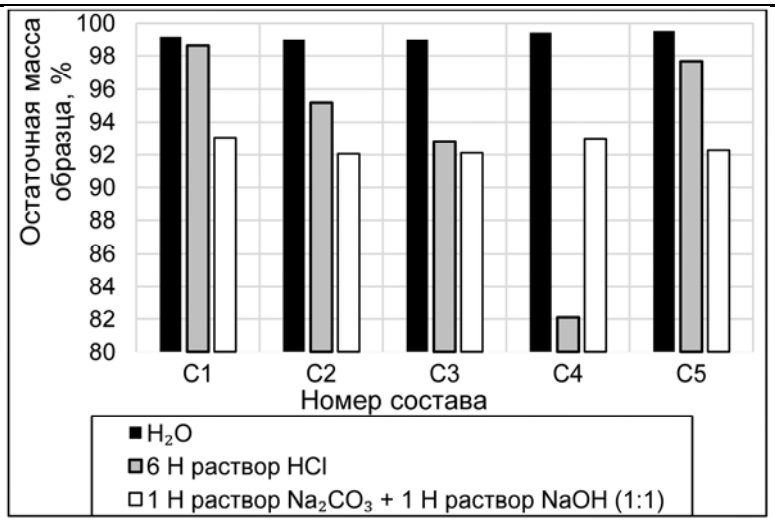


Рис. 3. Остаточная масса порошкообразных образцов после кипячения в течение 3 часов в агрессивных химических средах
(С1–С5 – номера составов)

Из литературы известно, что разные минералы имеют разное сопротивление к действию кислот [18, 19]. Установлено влияние фазового состава образцов стеклокерамики на их химическую стойкость в водном растворе HCl (6 Н). Стойкость уменьшается с увеличением в материале количества волластонита, девитрита и нефелина. После 3 часов кипячения образца С4 цвет раствора стал ярко-желтым. Масса образца уменьшилась на 17,89 %. В образце С4 наибольшее количество волластонита и нефелина (см. рис. 2). О растворении в водных растворах соляной кислоты минералов нефелина и волластонита имеются данные в научной литературе [20]. Образцы С1 (основная кристаллическая фаза – анортоклаз и кварц) и С5 (основная кристаллическая фаза – диопсид) практически не подвержены химической коррозии в водном растворе HCl (6 Н). Потеря массы образцов не превышает 1,5 % и 2,5 % соответственно. Согласно [21] минералы анортоклаз и диопсид не растворяются в водных растворах HCl.

Согласно данным рис. 3 стойкость стеклокерамики из цеолитсодержащих пород и добавок к воздействию щелочных растворов (Na_2CO_3(1 Н) + NaOH(1 Н)) изменяется незначительно. Потеря массы образцов после кипячения в щелочном растворе находится в пределах ≈7–8 %. Существенного влияния химического и минералогического состава образцов пористой стеклокерамики на их химическую стойкость в водном растворе щелочей не установлено.

Выводы

Из цеолитсодержащих пород различного химического и минералогического состава, кальцинированной соды и добавок получены пористые стеклокерамические материалы с кажущейся плотностью ≈160–300 кг/м^3, прочностью при изгибе и сжатии до ≈1,9 МПа и ≈3,1 МПа соответственно, с коэффициентом теплопроводности 0,055–0,08 Вт/м·°С.

Установлено влияние химического и минералогического состава пород, а также различных добавок на фазовый состав пористой стеклокерамики. Кристаллическая фаза образцов из шихты без кальцита в составе состоит из анортоклаза и кварца. С увеличением в составе материала CaO доминирующим минералом в составе стеклокерамики становится волластонит, а с увеличением MgO – диопсид.

Установлено влияние химического и минералогического состава образцов пористой стеклокерамики на основе цеолитсодержащих пород на их химическую стойкость. На основе результатов проведенных экспериментальных исследований установлена высокая стойкость образцов в воде, водном растворе HCl и щелочах. Химическую стойкость образцов пористой стеклокерамики водном растворе HCl

можно увеличить, изменив фазовый состав материала в сторону уменьшения количества волластонита, девитрита и нефелина.

По отдельным показателям пористые стеклокерамические материалы из цеолитсодержащих пород превзошли пеностекло. Рекомендуется использовать разработанные материалы в качестве изоляции трубопроводов, промышленных установок и т.п.

Список литературы

1. Zhu, M. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass / M. Zhu, R. Ji, Z. Li, H. Wang, L. Liu, Z. Zhang // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 112. – P. 398–405. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.183.

2. Fernandes, H.R. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents / H.R. Fernandes, D.U. Tulyaganov, J.M.F Ferreira // Ceramics International. – 2009. – Vol. 35, No. 1. – P. 229–235. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2007.10.019.

3. Guo, H. Preparation and characterization of foamed microporous mullite ceramics based on kyanite / H. Guo, F. Ye, W. Li, X. Song, G. Xie // Ceramics International. – 2015. – Vol. 41, No. 10. – P. 14645–14651. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.07.186.

4. König, J. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density / J. König, A. Lopez-Gil, P. Cimavilla-Roman, M.A. Rodriguez-Perez, R.R. Petersen; M.B. Østergaard, N. Iversen, Y. Yue, M. Spreitzer // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 247. – 118574. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118574.

5. Liu, T. Low-cost and environment-friendly ceramic foams made from lead-zinc mine tailings and red mud: Foaming mechanism, physical, mechanical and chemical properties / T. Liu, X. Li, L. Guan, P. Liu,T. Wu, Z. Li, A. Lu // Ceramics International. – 2016. – Vol. 42(1). – P. 1733–1739. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.09.131.

6. Ivanov, K.S. Associated Synthesis of Microgranular Foam-Glass-Ceramic from Diatomaceous Shales // Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika). – 2022. – Vol. 79(5-6). – P. 234–238. – DOI: 10.1007/s10717-022-00491-4.

7. Kazantseva, L.K. Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks / L.K. Kazantseva, S.V. Rashchenko // Ceramics International. – 2016. – Vol. 42(16). – P. 19250–19256. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.09.091.

8. Береговой, В.А. Газокерамика на основе природных опок / В.А. Береговой, Е.В. Снадин. – Пенза, 2021. – 106 с.

9. Beregovoi, V.A. Glass-crystalline materials of a cellular structure, formed by vibration foaming technology / V.A. Beregovoi, D.S. Sorokin, A.M. Beregovoi // Defect and Diffusion Forum. – 2021. – Vol. 410. – P. 823–828. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.823.

10. Huo, W. A novel fabrication method for glass foams with small pore size and controllable pore structure / W. Huo, S. Yan, J.-M. Wu, J. Liu, Y. Chen, Y. Qu, X. Tang, J. Yang // Journal of the American Ceramic Society. – 2017. – Vol. 100(12). – P. 5502–5511. DOI: 10.1111/jace.15089.

11. Ерофеев, В.Т. Исследование фазовых превращений в шихте (трепел : Na_2CO_3) для пеностеклокерамики / В. Т. Ерофеев, А. И. Родин, А. С. Кравчук, А. А. Ермаков // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 3(40). – С. 16–23.

12. Родин, А.И. Структура и свойства пористой стеклокерамики из шихты на основе кремнистых пород, модифицированной бокситами / А.И. Родин, А.А. Ермаков, В.Т. Ерофеев // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2(51). – С. 5–16. – DOI: 10.54734/20722958_2022_2_5.

13. Xi, C. Preparation of glass-ceramic foams using extracted titanium tailing and glass waste as raw materials / C. Xi, F. Zheng, J. Xu, W. Yang, Y. Peng, Y. Li, P. Li, Q. Zhen, S. Bashir, J.L. Liu // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 190. – P. 896–909. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.170.

14. Pisciella, P. Chemical durability of glasses obtained by vitrification of industrial wastes / P. Pisciella, S. Crisucci, A. Karamanov, M. Pelino // Waste Management. – 2001. – Vol. 21(1). – P. 1–9. – DOI: 10.1016/S0956-053X(00)00077-5.

15. Голованов, Ю.Н. Зависимость химической стойкости и кристаллизационной способности стекломассы от состава и режима приготовления / Ю.Н. Голованов, Н.Е. Брежнева, С.Н. Озиранер, А.А. Еремин, В.Л. Зотов // Атомная энергия. – 1963. – Т. 15, вып. 2. – С. 130–138.

16. Kahlenberg, V. Devitrite ($Na_2Ca_3Si_6O_{16}$) – structural, spectroscopic and computational investigations on a crystalline impurity phase in industrial soda-lime glasses / V. Kahlenberg, D. Girtler, E. Arroyabe, R. Kaindl, D.M. Többens // Mineralogy and Petrology. – 2010. – Vol. 100. – P. 1–9. – DOI: 10.1007/s00710-010-0116-8.

17. McClane, D.L. Nepheline crystallization and the residual glass composition: Understanding waste glass durability / D.L. McClane, J.W. Amoroso, K.M. Fox, M.C. Hsieh, M.R. Kesterson, A.A. Kruger // International Journal of Applied Glass Science. – 2020. – Vol. 11, No. 4. – P. 649–659. – DOI: 10.1111/ijag.15418.

18. Bogatyreva, E.V. Estimation criteria for chemical resistance of minerals / Journal of Mining Science / E.V. Bogatyreva // Journal of Mining Science. – 2013. – Vol. 49. – P. 138–152. – DOI: 10.1134/S1062739149010176.

19. Türk, T. Extraction of potassium from feldspar by roasting with $CaCl_2$ obtained from the acidic leaching of wollastonite-calcite ore / T. Türk, Z. Üçerler, F. Burat, G. Bulut, M.O. Kangal // Minerals. – 2021. – Vol. 11(12). – Article No. 1369. – DOI: 10.3390/min11121369.

20. Bagani, M. Nepheline syenite as an alternative source for aluminum production / M. Bagani, E. Balomenos, D. Panias // Minerals. – 2021. – Vol. 11(7). – Article No. 734. – DOI: 10.3390/min11070734.

21. Горшков, В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – Москва, 1981. – 335 с.

References

1. Zhu, M. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass / M. Zhu, R. Ji, Z. Li, H. Wang, L. Liu, Z. Zhang // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 112. – P. 398–405. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.183.

2. Fernandes, H.R. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents / H.R. Fernandes, D.U. Tulyaganov, J.M.F Ferreira // Ceramics International. – 2009. – Vol. 35, No. 1. – P. 229–235. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2007.10.019.

3. Guo, H. Preparation and characterization of foamed microporous mullite ceramics based on kyanite / H. Guo, F. Ye, W. Li, X. Song, G. Xie // Ceramics International. – 2015. – Vol. 41, No. 10. – P. 14645–14651. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.07.186.

4. König, J. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density / J. König, A. Lopez-Gil, P. Cimavilla-Roman, M.A. Rodriguez-Perez, R.R. Petersen; M.B. Østergaard, N. Iversen, Y. Yue, M. Spreitzer // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 247. – 118574. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118574.

5. Liu, T. Low-cost and environment-friendly ceramic foams made from lead-zinc mine tailings and red mud: Foaming mechanism, physical, mechanical and chemical properties / T. Liu, X. Li, L. Guan, P. Liu,T. Wu, Z. Li, A. Lu // Ceramics International. – 2016. – Vol. 42(1). – P. 1733–1739. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.09.131.

6. Ivanov, K.S. Associated Synthesis of Microgranular Foam-Glass-Ceramic from Diatomaceous Shales // Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika). – 2022. – Vol. 79(5-6). – P. 234–238. – DOI: 10.1007/s10717-022-00491-4.

7. Kazantseva, L.K. Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks / L.K. Kazantseva, S.V. Rashchenko // Ceramics International. – 2016. – Vol. 42(16). – P. 19250–19256. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.09.091.

8. Beregovoi, V.A. Gas ceramics based on natural flasks / V.A. Beregovoi, E.V. Snadin. – Penza, 2021. – 106 p.

9. Beregovoi, V.A. Glass-crystalline materials of a cellular structure, formed by vibration foaming technology / V.A. Beregovoi, D.S. Sorokin, A.M. Beregovoi // Defect and Diffusion Forum. – 2021. – Vol. 410. – P. 823–828. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.823.

10. Huo, W. A novel fabrication method for glass foams with small pore size and controllable pore structure / W. Huo, S. Yan, J.-M. Wu, J. Liu, Y. Chen, Y. Qu, X. Tang, J. Yang // Journal of the American Ceramic Society. – 2017. – Vol. 100(12). – P. 5502–5511. DOI: 10.1111/jace.15089.

11. Erofeev, V.T. Study of phase transformations in charge (tripoli : Na_2CO_3) for glass ceramic foams / V.T. Erofeev, A.I. Rodin, A.S. Kravchuk, A.A. Ermakov // Regional architecture and engineering. – 2019. – No. 3(40). – P. 16–23.

12. Rodin, A.I. Structure and properties of porous glass ceramics from a charge mixture based on siliceous rocks modified with bauxites / A.I. Rodin, A.A. Ermakov, V.T. Erofeev // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2(51). – Pp. 5–16. – DOI: 10.54734/20722958_2022_2_5.

13. Xi, C. Preparation of glass-ceramic foams using extracted titanium tailing and glass waste as raw materials / C. Xi, F. Zheng, J. Xu, W. Yang, Y. Peng, Y. Li, P. Li, Q. Zhen, S. Bashir, J.L. Liu // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 190. – P. 896–909. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.170.

14. Pisciella, P. Chemical durability of glasses obtained by vitrification of industrial wastes / P. Pisciella, S. Crisucci, A. Karamanov, M. Pelino // Waste Management. – 2001. – Vol. 21(1). – P. 1–9. – DOI: 10.1016/S0956-053X(00)00077-5.

15. Golovanov, Yu.N. Dependence on the chemical resistance and crystallization ability of glass mass on the composition and preparation composition / Yu.N. Golovanov, N.E. Brezhnev, S.N. Oziraner, A.A. Eremin, V.L. Zotov // Atomic Energy. – 1963. – Vol. 15, No. 2. – P. 130–138.

16. Kahlenberg, V. Devitrite ($Na_2Ca_3Si_6O_{16}$) – structural, spectroscopic and computational investigations on a crystalline impurity phase in industrial soda-lime glasses / V. Kahlenberg, D. Girtler, E. Arroyabe, R. Kaindl, D.M. Többens // Mineralogy and Petrology. – 2010. – Vol. 100. – P. 1–9. – DOI: 10.1007/s00710-010-0116-8.

17. McClane, D.L. Nepheline crystallization and the residual glass composition: Understanding waste glass durability / D.L. McClane, J.W. Amoroso, K.M. Fox, M.C. Hsieh, M.R. Kesterson, A.A. Kruger // International Journal of Applied Glass Science. – 2020. – Vol. 11, No. 4. – P. 649–659. – DOI: 10.1111/ijag.15418.

18. Bogatyreva, E.V. Estimation criteria for chemical resistance of minerals / Journal of Mining Science / E.V. Bogatyreva // Journal of Mining Science. – 2013. – Vol. 49. – P. 138–152. – DOI: 10.1134/S1062739149010176.

19. Türk, T. Extraction of potassium from feldspar by roasting with $CaCl_2$ obtained from the acidic leaching of wollastonite-calcite ore / T. Türk, Z. Üçerler, F. Burat, G. Bulut, M.O. Kangal // Minerals. – 2021. – Vol. 11(12). – Article No. 1369. – DOI: 10.3390/min11121369.

20. Bagani, M. Nepheline syenite as an alternative source for aluminum production / M. Bagani, E. Balomenos, D. Panias // Minerals. – 2021. – Vol. 11(7). – Article No. 734. – DOI: 10.3390/min11070734.

21. Gorshkov, V.S. Methods of physical and chemical analysis of binders / V.S. Gorshkov, V.V. Timashev, V.G. Savelyev. – Moscow, 1981. – 335 p.

УДК 001.8:519.7:69 DOI 10.54734/20722958_2023_2_14

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

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КАК МЕТОДОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ

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

С позиций системного анализа предлагается единая концепция анализа, синтеза и управления свойствами многокомпонентных многокритериальных сложных систем и процессов различной природы (строительные композиты, эргатические системы, технологические процессы). В частности, строительные композиты как объекты идентификации, формализации и моделирования их структуры наделяются признаками многофазности, полиструктурности, масштабной многоуровневости и т.д. с обеспечением необходимой комплектности, полноты, системности описания и оценки рецептурно-технологических эффектов при получении структур материала с заданными свойствами.

Ключевые слова: системный анализ, структурный подход, сложные системы, композиционные материалы, технологические процессы, эргатические системы, имитаторы

SYSTEM ANALYSIS AS A METHODOLOGY FOR SOLVING PROBLEMS

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

From the standpoint of system analysis, a unified concept of analysis, synthesis and control of the properties of multi-component, multi-criteria, complex systems and processes of various nature (building composites, ergatic systems, technological processes) is proposed. In particular, building composites as objects of identification, formalization and modeling of their structure, are endowed with signs of multi-phase, poly-structural, large-scale multi-level, etc. with the provision of the necessary arranged sets, completeness, systematic description and evaluation of recipe-technological effects in obtaining material structures with desired properties.

Keywords: system analysis, structural approach, complex systems, composite materials, technological processes, ergatic systems, simulators

Как правило, *сложная система является результатом развития некоторой более простой системы*: спроектированная с нуля, она редко оказывается работоспособной. Сложные системы часто являются иерархическими и состоят из взаимозависимых подсистем, которые, в свою очередь, также могут быть разделены на подсистемы. Какие компоненты в системе считаются элементарными, определяется исследователем. Внутрикомпонентная связь обычно сильнее, чем связь между компонентами; взаимодействия внутри компонентов отделяются от динамики взаимодействия между компонентами. Системная методология решения сложных прикладных проблем опирается на принципы системного подхода и общей теории систем, методологически обобщая концептуальный и математический аппарат кибернетики, исследования операций и системотехники. *Неструктурированные* системы с качественно выраженными проблемами описываются лишь на содержательном уровне, а задачи решаются с использованием неформальных процедур. *Слабоструктурированные* описываются как количественно, так и качественно (в основном). Хорошо *структурированные системы поддаются математической формализации*. *Степень структуризации определяется альтернативами достижения целей; критерием выбора предпочтительной альтернативы; частными и обобщенной моделями*. В процессе изучения система может превратиться из неструктурированной в слабоструктурированную, а затем и структурированную: степень структуризации проблемы повышается, проблема формулируется все более четко и исчерпывающе. При идентификации параметров нелинейных систем последние *должны принадлежать к заранее заданному виду*: параметр, наилучшим образом описывающий систему при одной форме представления, может оказаться совершенно неудовлетворительным при другом описании системы. Практическая реализация системного подхода к математическому моделированию сложных систем приводится в работах [1…5] авторов.

Эргатические системы

Раздельное определение параметров функционирования объекта и оператора практически невозможно. С известной долей неопределенности эргатическая система сводится к некоторой разомкнутой, по которой можно определить некоторую *обобщенную передаточную функцию* (по синхронным измерениям входных и выходных переменных, полученных в процессе нормальной эксплуатации). Так что *параметрическая идентификация возможна лишь с использованием итеративных методов*; такой подход использовался при параметрической идентификации системы [6]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\alpha}\mathbf{x} + \boldsymbol{\beta}\mathbf{u},$$

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_n)^{\mathrm{T}}, \mathbf{u} = (u_1, u_2, \ldots, u_m)^{\mathrm{T}}$ – соответственно n-мерный вектор состояния и m-мерный вектор управления, $\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}$ – матрицы коэффициентов.

В конечных разностях справедливо:

$$\frac{\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}^k}{\Delta t} \approx \boldsymbol{\alpha}\mathbf{x}^k + \boldsymbol{\beta}\mathbf{u}^k, \mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + (\boldsymbol{\alpha}\Delta t)\mathbf{x}^k + (\boldsymbol{\beta}\Delta t)\mathbf{u}^k,$$

$$\mathbf{x}^{k+1} = (\mathbf{E} + \boldsymbol{\alpha}\Delta t)\mathbf{x}^k + (\boldsymbol{\beta}\Delta t)\mathbf{u}^k; \ \mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}^k + \mathbf{B}\mathbf{u}^k,$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{E} + \boldsymbol{\alpha}\Delta t = \begin{bmatrix} a_{11} & \ldots & a_{1n} \\ & \ldots & \\ a_{n1} & \ldots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+\alpha_{11}\Delta t & \ldots & \alpha_{1n}\Delta t \\ & \ldots & \\ \alpha_{n1}\Delta t & \ldots & 1+\alpha_{nn}\Delta t \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\beta}\Delta t = \begin{bmatrix} b_{11} & \ldots & b_{1m} \\ & \ldots & \\ b_{n1} & \ldots & b_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{11}\Delta t & \ldots & \beta_{1m}\Delta t \\ & \ldots & \\ \beta_{n1}\Delta t & \ldots & \beta_{nm}\Delta t \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{x}^k = \mathbf{x}(t_k) = \mathbf{x}(k\Delta t), \ \mathbf{u}^k = \mathbf{u}(t_k) = \mathbf{u}(k\Delta t);$$

$$x_1^{k+1} = a_{11}x_1^k + \ldots + a_{1n}x_n^k + b_{11}u_1^k + \ldots + b_{1m}u_m^k,$$

$$x_2^{k+1} = a_{21}x_1^k + \ldots + a_{2n}x_n^k + b_{21}u_2^k + \ldots + b_{2m}u_m^k,$$

$$\ldots$$

$$x_n^{k+1} = a_{n1}x_1^k + \ldots + a_{nn}x_n^k + b_{n1}u_n^k + \ldots + b_{nm}u_m^k;$$

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{\Phi}\mathbf{w}^k, \mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} a_{11}\ldots a_{1n} & b_{11} & \ldots & b_{1m} \\ & \ldots & & \\ a_{n1}\ldots a_{nn} & b_{n1} & \ldots & b_{nm} \end{bmatrix}.$$

Векторно-матричное уравнение $\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{\Phi}\mathbf{w}^k$ описывает систему с $(n+m)$ входами $x_1^k, x_2^k, \ldots, x_n^k, u_1^k, u_2^k, \ldots, u_m^k$ и n выходами $x_1^{k+1}, x_2^{k+1}, \ldots, x_n^{k+1}$ (рис. 1); $x_1^{k+1}, x_2^{k+1}, \ldots, x_n^{k+1}$ определяются изолированно; x_i^{k+1} является единственной выходной координатой системы с $(n+m)$ входами $x_1^k, x_2^k, \ldots, x_n^k, u_1^k, u_2^k, \ldots, u_m^k$ (рис. 2).

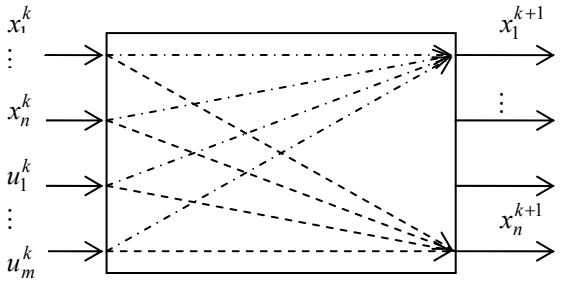


Рис. 1

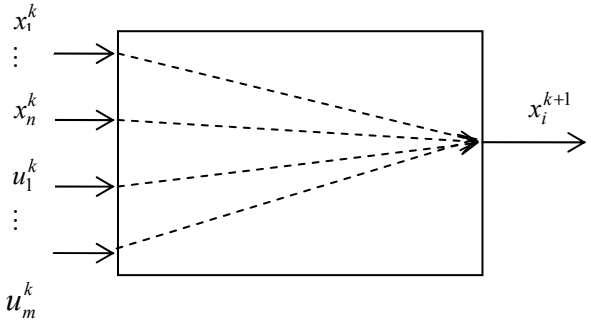


Рис. 2

При параметрической идентификации

$$x_i^{k+1} = a_{i1}x_1^k + \ldots + a_{in}x_n^k + b_{i1}u_1^k + \ldots + b_{im}u_m^k,\ i = \overline{1,n}$$

используются $r \geq n+m+1$ совокупностей синхронных измерений x_i^{k+1} и $x_1^k, x_2^k, \ldots, x_n^k, u_1^k, u_2^k, \ldots, u_m^k$:

$$x_{i(1)}^{k+1} = x_i^1,\ x_{1(1)}^k = x_1^0, \ldots, x_{n(1)}^k = x_n^0,\ u_{1(1)}^k = u_1^0, \ldots, u_{m(1)}^k = u_m^0,$$

$$\ldots$$

$$x_{i(r)}^{k+1} = x_i^r,\ x_{1(r)}^k = x_1^{r-1}, \ldots, x_{n(r)}^k = x_n^{r-1},\ u_{1(r)}^k = u_1^{r=1}, \ldots, u_{m(r)}^k = u_m^{r-1}.$$

Справедливо

$$x_{i(1)}^{k+1} = \mathbf{u}_{(1)}^{\mathrm{T}}\mathbf{a}_i, x_{i(\mu)}^{k+1} = \mathbf{u}_{(\mu)}^{\mathrm{T}}\mathbf{a}_i, \ldots, x_{i(r)}^{k+1} = \mathbf{u}_{(r)}^{\mathrm{T}}\mathbf{a}_i;$$

$$\mathbf{u}_{(\mu)} = \left[x_1^{\mu-1}, \ldots, x_n^{\mu-1}, u_1^{\mu-1}, \ldots, u_m^{\mu-1}\right]^{\mathrm{T}} = \mathbf{w}_{(\mu-1)};$$

$$\mathbf{a}_i = \left[a_{i1}, \ldots, a_{in}, b_{i1}, \ldots, b_{im}\right]^{\mathrm{T}};$$

$$\boldsymbol{\chi}_i = \mathbf{U}\mathbf{a}_i,\ \boldsymbol{\chi}_i = \left[x_i^1, x_i^2, \ldots, x_i^r\right]^{\mathrm{T}},\ \mathbf{U} = \begin{bmatrix} x_1^0 \ldots x_n^0 & u_1^0 \ldots & u_m^0 \\ & \ldots & \\ x_1^{\mu-1} \ldots x_n^{\mu-1} & u_1^{\mu-1} & \ldots u_m^{\mu-1} \\ & \ldots & \\ x_1^{r-1} \ldots x_n^{r-1} & u_1^{r-1} & \ldots u_m^{r-1} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{a}_i = \left(\mathbf{U}^{\mathrm{T}}\mathbf{U}\right)^{-1}\mathbf{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\chi}_i;$$

$$\left[a_{i1}, \ldots, a_{in}, b_{i1}, \ldots, b_{im}\right]^{\mathrm{T}} = \left(\mathbf{U}^{\mathrm{T}}\mathbf{U}\right)^{-1}\mathbf{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\chi}_i.$$

Схема определения матриц $\mathbf{U}^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\chi}$ по синхронным измерениям фазовых координат приводится на рис. 3 (используются стандартные обозначения для углов тангажа $\omega_z(t)$, атаки $\alpha(t)$ и отклонения руля $\delta_в(t)$).

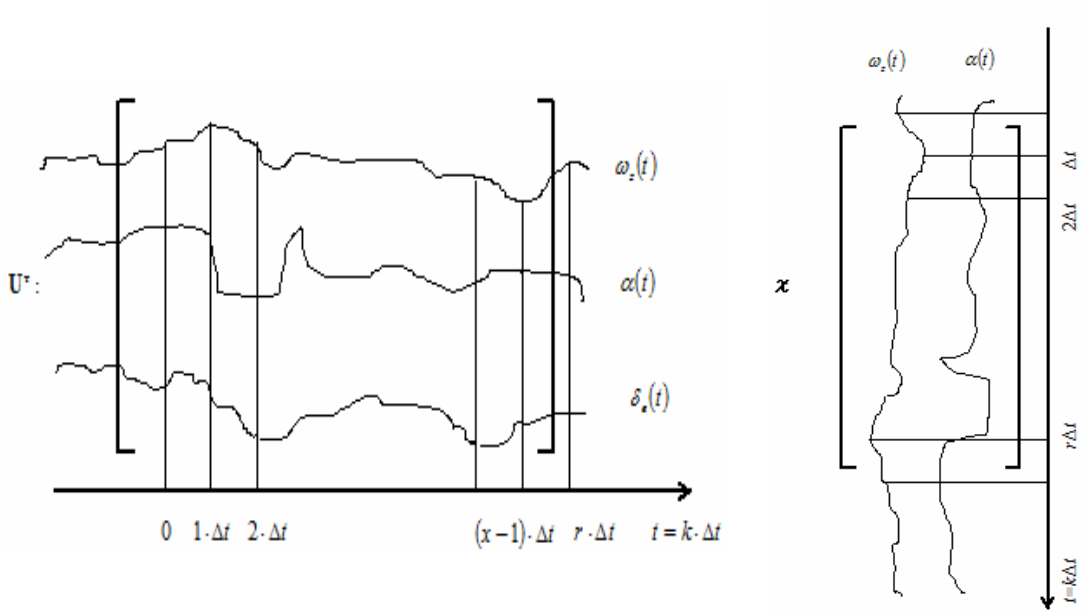


Рис. 3. Схема определения матриц $\mathbf{U}^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\chi}$

Технологические задачи

Системное мышление как совокупность методов и способов исследования, описания и конструирования систем успешно нами используется при проектировании строительных материалов [7…10]. Они, будучи сложными системами, обладают системными атрибутами.

При решении технологических задач с использованием принципов системного анализа технологический процесс рассматривался как сложная система, состоящая из элементов различных уровней детализации: от атомного до отдельного процесса. Система состоит из взаимодействующих элементов. Сущность системы невозможно понять, рассматривая только свойства элементов; существенны как способ взаимодействия элементов, так и взаимодействия элементов (или системы) с окружающей средой. Анализ элементарных процессов, проводимый отдельно, не позволяет установить стадию технологического процесса (например, массоперенос вещества осуществляется на нескольких технологических переделах: при химической реакции взаимодействия вяжущего с активатором, или при перемешивании компонентов, тепловой обработке и др.). Так же, как и *анализ отдельных стадий процесса без выявления взаимосвязи между ними и с окружающей средой, он не дает возможности судить обо всем технологическом процессе.*

При анализе технологического процесса *можно выделить несколько уровней иерархии, между которыми существуют отношения соподчиненности.* Элементарные процессы технологии (химические, массообменные, тепловые, механические, гидромеханические) располагаются *на первом уровне иерархии.* На более высоких уровнях будут элементы, выделяемые по какому-либо признаку (например, по административно-хозяйственному или производственному). *При анализе отдельного процесса в качестве элементов или ступеней иерархии могут выступать явления, определяющие в совокупности целевую функцию процесса* (химическое превращение, теплообмен и т.д.). Основная идея системного анализа состоит в применении *общих принципов декомпозиции системы на отдельные элементы и установление связей между ними, в определении цели исследования и этапов для достижения этой цели.* Системный подход к исследованию технологических процессов имеет *цель получения оценок функционирования процесса на любом уровне декомпозиции* и осуществляется в несколько этапов. *Отдельный элемент системы в зависимости от поставленной цели рассматривается как отдельная система с более детализованными уровнями декомпозиции.* При системном исследовании процесса для выявления уровней декомпозиции, отдельных элементов и связей между ними (иерархические уровни, выбор элементов определяются исходя из общей цели исследования и степени изученности процесса) осуществляются *смысловой и качественный анализы объекта*. Производятся *формализация имеющихся знаний* (их источником служат фундаментальные законы и экспериментальные данные) об элементах, их взаимодействии, а также *структурная идентификация (представление знаний в виде математических моделей)* системы. Именно в математической модели формализуется рассматриваемый процесс, устанавливаются математические связи между входными и выходными параметрами. Адекватность модели (соответствие результатов моделирования экспериментальным данным) определяется *уровнем знаний о процессе и обоснованностью принятых допущений.* Математические модели сложных систем или процессов состоят из ряда элементарных; представляются системами уравнений (используются детерминированные фундаментальные законы, отражающие общий характер явления) при совокупности ограничений и допущений. *Реальные условия протекания процессов не будут совпадать с модельными. Поэтому модели будут содержать коэффициенты (параметры модели), определяемые экспериментально.*

Декомпозиция технологического процесса предполагает разделение на основные операции (элементы): подготовка материалов, смешение компонентов, формование полуфабриката, тепловая обработка и дополнительные операции. Элементы в системе находятся в определенных отношениях между собой и окружающей средой (связи: входы, оказывающие влияние на функционирование элемента (системы); *выходы,* или отклики, являющиеся воздействием элемента (системы) на окружающую среду). Контролируемые и регулируемые входы – управляющие факторы. Контролируемые и нерегулируемые входы – известные факторы, но не изменяемые произвольно (нерегулируемость входов может быть связана с трудностью регулирования). Неконтролируемые факторы – воздействия на систему, которые находятся вне контроля. Неконтролируемость факторов определяется недостаточной изученностью процесса (влияние фактора на функционирование системы); невозможностью контроля за выделенным фактором. Предполагается определенная последовательность выполнения основных операций (элементы) в технологическом процессе (система), а также наличие взаимосвязи между элементами (отклики предыдущего элемента являются входы последующего). Математически функционирование системы в общем виде описывается некоторой системой уравнений; каждое уравнение системы определяет зависимость i-го выхода от всех входных воздействий. Установить влияние неконтролируемых факторов практически невозможно: требуется упрощение математической модели. Оценка шума фактически выделяется в самостоятельную задачу. При структурном подходе составление модели базируется на фундаментальных законах (применяется для хорошо изученных систем). Приведенный подход эффективно использовался при разработке ряда радиационно-защитных композитов.

Таким образом, с позиций системного анализа определяются когнитивный, гомеостатический и синергетический подходы к решению сложных, слабоструктурированных и слабоформализуемых задач различной природы (строительные композиты, эргатические системы, технологические процессы) с переносом знаний из одной области в другую.

Список литературы

1. Селяев, В.П. Эволюция теории прочности бетонов. От простого к сложному / В.П. Селяев, П.В. Селяев, Е.Л. Кечуткина // Строительные материалы. – 2016. – № 12. – С. 70–79.
2. Гарькина, И.А. Проблема многокритериальности при управлении качеством сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, В.О. Петренко // Мир транспорта и технологических машин. – 2013. –№ 2 (41). – С. 123–129.
3. Чернышов, Е.М. Проблема комплексности и системности качественного описания и статистической достоверности количественной оценки характеристик структуры строительных композитов / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // Эксперт: теория и практика. – 2022. – № 2 (17). – С. 75–80.
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. 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.
6. 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.
7. Будылина, Е.А. Инновационное проектирование, смена парадигм, технология производства строительных материалов / Е.А. Будылина, А.М. Данилов, Г.А. Фокин // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 3 (48). – С. 97–105.
8. 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.
9. Гусев, Б.В. Модели полидисперсных систем: критерии оценки и анализ показателей эффективности / Б.В. Гусев, Е.В. Королев, А.Н. Гришина // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 8. – С. 31–39.
10. Гришина, А.Н. Оценка эффективности модифицирования цементных материалов синтетическими нано- и микроразмерными частицами гидросиликатов цинка / А.Н. Гришина // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 3 (52). – С. 5–15.

References

1. Selyaev, V.P. Evolution of the theory of concrete strength. From simple to complex / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, E.L. Kechutkina // Construction materials. – 2016. – № 12. – P. 70–79.
2. Garkina, I.A. The problem of multi-criteria in the quality management of complex systems / I.A. Garkina, A.M., Danilov V.O. Petrenko // The world of transport and technological machines. – 2013. – №. 2 (41). – P. 123–129.
3. Chernyshov, E.M. The problem of the complexity and consistency of the qualitative description and statistical reliability of the quantitative assessment of the characteristics of the structure of building composites / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev // Expert: theory and practice. – 2022. – №2 (17). – P. 75–80.
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. 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.

6. 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.

7. Budylina, E.A. Innovative design, paradigm shift, building materials production technology / E.A. Budylina, A.M. Danilov, G.A. Fokin // Regional architecture and engineering. – 2021. – №3 (48). – P. 97–105.

8. 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.

9. Gusev, B.V. Models of polydisperse systems: evaluation criteria and analysis of performance indicators / B.V. Gusev, E.V. Korolev, A.N. Grishina // Industrial and civil construction. – 2018. – №8. – P. 31–39.

10. Grishina, A.N. Evaluation of the effectiveness of modifying cement materials with synthetic nano- and micro-sized particles of zinc hydrosilicates / A.N. Grishina // Regional architecture and engineering. – 2022. – №3 (52). – P. 5–15.

УДК 691.3 DOI 10.54734/20722958_2023_2_21

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)
Россия, 644080, Омск, проспект Мира, 5
Явинский Александр Викторович, аспирант кафедры «Промышленное и гражданское строительство», преподаватель кафедры «Техносферная и экологическая безопасность»
E-mail: 121qqz@mail.ru
Чулкова Ирина Львовна, доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство»
E-mail: le5@inbox.ru

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)
Russia, 644080, Omsk, 5, Prospekt Mira
Yavinsky Aleksander Viktorovich, Postgraduate student of the department «Industrial and Civil Engineering», lecturer of the department «Technosphere and environmental Safety»
E-mail: 121qqz@mail.ru
Chulkova Irina Lvovna, Doctor of Sciences, Professor of the department «Industrial and Civil Engineering»
E-mail: le5@inbox.ru

ВЛИЯНИЕ ГИДРОФОБИЗИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА ЗОЛОЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

А.В. Явинский, И.Л. Чулкова

Изучалась проблема использования золы гидроудаления в составе тяжелого бетона. Использование золы гидроудаления негативно сказывается на водопоглощении и морозостойкости тяжелого бетона. Для решения данной проблемы предложено использовать гидрофобизирующие добавки. Испытывались следующие гидрофобизаторы – олеат натрия, ProfiLux, Пента-811. Было определено рациональное количество вводимого гидрофобизатора, которое составляет 1 % от массы вяжущего. Установлено, что использование гидрофобизирующих добавок в количестве 1 % от массы вяжущего уменьшает водопоглощение образцов более чем в 2 раза. Введение гидрофобизирующих добавок снижает прочность тяжелого бетона в возрасте 3, 7, 28 суток, повышает сроки схватывания и морозостойкость.

Ключевые слова: гидрофобизирующие добавки, зола гидроудаления, смешанное вяжущее, водопоглощение, тяжелый бетон

EFFECT OF HYDROPHOBIC ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF ASH-CEMENT STONE

A.V. Yavinskiy, I.L. Chulkova

This article is devoted to the problem of the use of pond ash in the composition of heavy concrete. The use of pond ash has a negative effect on water absorption and frost resistance of heavy concrete. To solve this problem it is proposed to use waterproofing admixture. The following waterproofing admixture were tested in the work – sodium oleate, ProfiLux, Penta-811. The rational amount of the introduced waterproofing admixture has been established, which is 1 % of the weight of the binder. It has been found that the use of waterproofing admixture in an amount of 1 % of the weight of the binder reduces the water absorption of samples more than twice. The influence of waterproofing admixture on the strength of heavy concrete at the age of 3, 7, 28 days, increases frost resistance and the time of setting.

Keywords: waterproofing admixture, pond ash, mixed binders, water absorption, heavy concrete

Введение. Образующиеся при сжигании угля отходы тепловых электростанций (ТЭЦ) создают серьезную проблему при их утилизации и хранении [1,2]. В мире наблюдается тенденция к повышению количества потребляемого твердого топлива на тепловых электростанциях. За последние 30 лет в 2 раза выросло количество потребляемого угольного топлива. Вследствие сжигания угля на ТЭЦ вырабатываются зола и шлак, которые удаляются сухим или мокрым способом. Ежегодная выработка отходов

ТЭЦ в России составляет более 25 млн тонн, однако переработке подвергается не более 10 % вырабатываемых в год отходов, что значительно меньше, чем в других развитых странах (рис. 1). Следствием чего стали огромные площади золоотвалов по всей России, общая площадь которых составляет более 30 тыс. га, на которых хранится около 1,5 млрд тонн отходов [3].

В настоящее время на территории Омской области находится более 150 млн тонн золошлаковых отходов. Территории, занимаемые золоотвалами омских ТЭЦ, превышают 900 га земли [4]. На текущий момент даже такого количества земли, выделяемой под золоотвалы, не хватает, вследствие чего разрабатывается проект по расширению площади золоотвала ТЭЦ-5. Хотя по федеральному классификационному каталогу отходов зола гидроудаления ТЭЦ относится к 5 классу опасности, ее хранение на золоотвале наносит вред окружающей среде и экологии региона, а также потенциально может причинить огромный ущерб, например, при обрушении дренажной трубы [5, 6]. Разлив золы гидроудаления на реке Дан в Северной Каролине привел к экологической катастрофе и большому штрафу для компании DukeEnergy, который составил более 5 миллионов долларов.

Негативный эффект от хранения золы гидроудаления на золоотвале состоит в постоянном пылении с поверхности отвала. Выветривание частиц золы приводит к загрязнению атмосферного воздуха на близлежащих к отвалу территориях [7]. Также вредные вещества, например мышьяк, вымываются осадками из отвала и могут загрязнять подземные источники чистой воды. Отдельно стоит отметить, что территория, которая выделяется для строительства отвала, полностью выходит из хозяйственного оборота на многие года, так как даже после рекультивации она не может использоваться для сельскохозяйственной деятельности [8].

Поддержание работы золоотвала требует постоянного вложения денежных средств и ресурсов [9]. Стоимость содержания золоотвала включается в оплату за потребление тепловой и электрической энергии, а значит, данная проблема негативно сказывается на всех жителях России.

Ряд источников [10, 11] подтверждает, что утилизация отходов ТЭЦ может значительно улучшить экологическую и экономическую обстановку в России. По данным многочисленных исследований можно сделать вывод, что использование золы гидроудаления в строительной отрасли актуально на сегодняшний день [12]. Так, в работе [13] при оценке направлений переработки золы гидроудаления дорожное строительство называется наиболее перспективной отраслью. В Германии более 3 млн тонн золы используется при производстве цемента [14].

Основным недостатком введения золы в состав бетона является повышение его водопоглощения, что отрицательно сказывается на его морозостойкости [15, 16]. Для компенсации негативного эффекта от введения золы гидроудаления в состав тяжелого бетона предлагается использовать гидрофобизирующие добавки.

Проводилось исследование эффективности гидрофобизирующих добавок [17–19] путем нанесения гидрофобизирующей добавки на поверхность изделия, однако в данных работах не рассматривался способ введения добавки в состав бетонной смеси. Объемная гидрофобизация изделий позволяет повысить долговечность и снизить водопоглощение [20]. Негативное влияние введения гидрофобизаторов в состав бетонной смеси может выражаться в снижении прочности и повышении сроков схватывания изделия [21–24].

Цель данной работы – оценить эффективность гидрофобизирующих добавок в составе тяжелого бетона с добавкой золы гидроудаления при различных условиях твердения. Для оценки различных гидрофобизирующих добавок образцы испытывались на водопоглощение, морозостойкость и прочность.

Для оценки эффективности гидрофобизирующих добавок были изготовлены образцы-кубы с ребром 10 см из тяжелого бетона с золой гидроудаления. Часть образцов твердела в нормально-влажностных условиях (НВУ), другая часть подверглась тепловлажностной обработке (ТВО) в пропарочной камере. Режим ТВО составил:

3 часа – подъем температуры, 6 часов – изотермическая выдержка при температуре 70^0C, 3 часа – плавное остывание.

В работе использовалась зола гидроудаления с ТЭЦ-5 г. Омска. Для определения химического состава зола гидроудаления отбиралась с глубины 0,5, 4,5, 8,5, 12,5 метра с 3 разных точек (всего 12 образцов). Химический состав золы гидроудаления определялся с помощью рентгенофлуоресцентного метода. Усредненный химический состав представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав золы гидроудаления

SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	ППП*
57,83	1,11	23,29	7,26	0,13	0,78	1,66	0,50	0,69	0,42	6,33

Для изготовления тяжелого бетона использовался цемент ЦЕМ I 42,5 Н, который был исследован в лаборатории СибАДИ и показал соответствие всем требованиям ГОСТ 31108-2020.

В качестве мелкого заполнителя брался речной кварцевый песок с модулем крупности 2,5, поставленный АО «Омский речной порт». В качестве крупного заполнителя – гранитный щебень фракции 5-20.

В качестве гидрофобизирующих добавок использовались олеат натрия, кремнийорганический гидрофобизатор Пента-811 производства компании Пента Юниор, ProfiLux-гидрофобизатор на водной основе производства компании ProfiLux.

Для поиска рационального количества вводимого гидрофобизатора изготавливались образцы золоцементного камня (золоцементное отношение 20:80 выбрано на основании результатов прошлых исследований [25]), которые различались количеством вводимой добавки. Рациональное количество вводимого гидрофобизатора оценивалось по водопоглощению образцов (для каждого состава была изготовлена серия из 6 образцов). Результаты испытаний представлены на рис. 1.

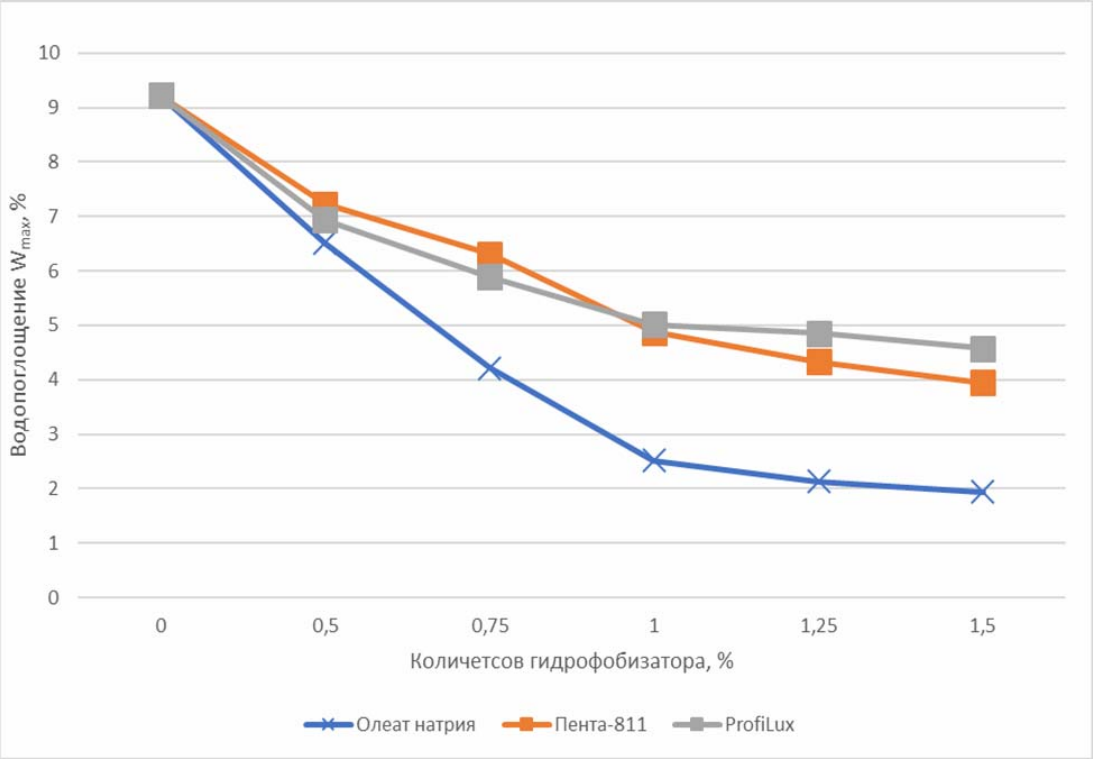


Рис. 1. График зависимости водопоглощения образцов от количества вводимого гидрофобизатора

По результатам, представленным на рис. 1, можно сделать вывод, что рациональным количеством вводимого гидрофобизатора будет 1 % от массы вяжущего для любой из испытанных добавок. Увеличение количества вводимой добавки не приносит заметного снижения водопоглощения образцов. Например, при повышении количества вводимого олеата натрия с 1 до 1,5 % от массы вяжущего водопоглощение образцов снижается всего на 1 %. Разница же между бездобавочным образцом и образцом, содержащим 1 % олеата натрия, составляет 6 %. На рис. 2 показан эффект гидрофобизации тяжелого бетона.

Рис. 2. Образец с гидрофобизатором (слева), бездобавочный образец (справа)

Для дальнейшего исследования влияния гидрофобизирующих добавок на свойства тяжелого бетона были запроектированы составы с золой гидроудаления и контрольный бездобавочный состав. Составы бетонной смеси представлены в табл. 2.

Таблица 2

Составы бетонной смеси

Компонент смеси	Содержание, кг/м^3			
	Контрольный состав	Состав №1	Состав №2	Состав №3
Цемент	269	269	269	269
Зола гидроудаления	67	67	67	67
Песок	521	521	521	521
Щебень	1470	1470	1470	1470
Вода	185	185	185	185
Олеат натрия	-	3,6	-	-
ProfiLux	-	-	3,6	-
Пента-811	-	-	-	3,6

Для исследования влияния гидрофобизирующих добавок на сроки схватывания, прочность, морозостойкость из бетонной смеси изготавливались образцы-кубы с ребром 10 см. Результаты приведены в табл. 3.

По результатам, представленным в табл. 3, можно сделать следующие выводы. Введение гидрофобизирующих добавок в состав тяжелого бетона негативно сказывается на его прочности в ранние сроки твердения. Снижение прочности в возрасте 3 суток между контрольным составом №1 и составом №2, в который вводился олеат натрия, составляет 42 %. Составы №3 и №4 также имеют сниженную прочность в возрасте 3 суток на 25 % по сравнению с контрольным образцом.

Таблица 3

Влияние гидрофобизирующих добавок на свойства тяжелого бетона

№ состава	Прочность при сжатии на 3 сутки $R^3_{сж}$, МПа	Прочность при сжатии на 7 сутки $R^7_{сж}$, МПа	Прочность при сжатии на 28 сутки $R^{28}_{сж}$, МПа	Прочность после ТВО $R^{тво}_{сж}$, МПа	Время начала схватывания, мин	Время конца схватывания, мин	Марка по морозостойкости, циклы
1	12,1	23,2	44,1	35,5	202	327	F100
2	7,0	17,6	36,4	28,0	301	441	F200
3	9,7	20,2	40,3	32,2	260	381	F200
4	9,2	19,3	38,6	32,8	272	390	F200

В возрасте 7 суток снижение прочности у составов №2, №3, №4 также меньше, чем у контрольного состава №1. Однако снижение прочности не столь критичное, как в возрасте 3 суток, оно составляет 25 %, 13 %, 17 % соответственно.

В возрасте 28 суток у образцов с использованием гидрофобизаторов все еще наблюдается снижение прочности (от 9 до 18 %) по сравнению с контрольным образцом.

Одной из возможных причин снижения прочности является негативное влияние гидрофобизаторов на процессы гидратации цемента. Оно выражается в уменьшении количества и прочности кристаллических контактов при гидратации цемента.

При ТВО составов, в которые вводился гидрофобизатор, также отсутствует компенсация негативного эффекта снижения прочности. Так, у состава №2 наблюдается снижение прочности на 22 % по сравнению с контрольным образцом, у составов №3 и №4 – на 8 %.

Компенсировать негативный эффект, выражающийся в снижении ранней прочности бетона с гидрофобными добавки, можно путем введения ускорителей твердения, таких, как хлористый кальций, а также пластифицирующих добавок [26], которые уменьшат водоцементное отношение, следствием чего станет повышение прочности бетона.

Время начала и конца схватывания бетонной смеси у составов с использованием гидрофобизаторов увеличивается по сравнению с контрольным бездобавочным составом. Для состава №2 начало схватывания возрастает на 99 минут, а конец схватывания наступает позднее на 114 минут. Увеличение сроков схватывания может позволить повысить расстояние доставки бетонной смеси без использования дополнительных замедлителей схватывания. Минусом от повышения сроков схватывания является необходимость дополнительной выдержки перед распалубкой изделий или ТВО.

Составы, в которых использовались гидрофобизаторы, показали марку по морозостойкости F200, в то время как у бездобавочного состава №1 она соответствовала F100. Значительное повышение марки по морозостойкости является следствием снижения водопоглощения. Введение гидрофобизаторов в бетон приводит к разрыву сплошности водного раствора [27], следствием чего становится появление пузырьков воздуха в капилляре. Участки, которые заполняются воздухом, служат демпфирующими емкостями, повышающими морозостойкость бетонных образцов.

Выводы. 1. Определено рациональное количество вводимого гидрофобизатора в составе тяжелого бетона, которое составляет 1 % от массы вяжущего.

2. Установлено, что введение олеата натрия в количестве 1 % уменьшает водопоглощение смешанного вяжущего с 9,2 % (у образца без добавки) до 2,5 %.

3. Доказано, что прочность тяжелого бетона при введении в него гидрофобизирующих добавок снижается в возрасте 3, 7 и 28 суток по сравнению с бездобавочным

образцом. Проведение ТВО изделий не позволяет компенсировать негативный эффект снижения прочности при введении добавок.

4. Установлено, что введение гидрофобизирующих добавок повышает время начала и конца схватывания тяжёлого бетона. Введение 1 % олеата натрия увеличивает время начала схватывания на 99 минут, а время конца схватывания на 114 минут.

5. Доказано, что введение гидрофобизирующих добавок повышает морозостойкость тяжелого бетона с золой гидроудаления с марки F100 до F200.

Список литературы

1. Баженов, Ю.М. Высококачественные самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов сжигания угля / Ю.М. Баженов, В.В. Воронин, Л.А. Алимов, А.М. Бахрах, О.А. Ларсен, В.Н. Соловьев, Н.Д. Куанг // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12, №. 12 (111). – С. 1385–1391.

2. Лесовик, В.С. Теоретические предпосылки создания цементных композитов повышенной непроницаемости / В.С. Лесовик, Р.С. Федюка // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2016. – №. 1 (47). – С. 65–72.

3. Нигматулин, Р.И. Как обустроить экономику и власть России: анализ инженера и математика / Р.И. Нигматулин //Энергобезопасность и энергосбережение. – 2007. – №. 5. – С. 3–12.

4. Явинский, А.В. Влияние золы гидроудаления на свойства тяжелого бетона для строительства дорожного покрытия / А.В. Явинский, И.Л. Чулкова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 3. – С. 16–24.

5. Lemly, A.D. Damage cost of the Dan River coal ash spill / A.D. Lemly // Environmental Pollution. – 2015. – Vol. 197. – P. 55–61.

6. Yang, Y. Importance of a nanoscience approach in the understanding of major aqueous contamination scenarios: case study from a recent coal ash spill / Y. Yang, B.P. Colman, E.S. Bernhardt, M.F. Hochella // Environmental Science & Technology. – 2015. – Vol. 49, №. 6. – P. 3375–3382.

7. Вишня, Б.Л. Методы рекультивации отработанных золоотвалов ТЭС / Б.Л. Вишня, В.Л. Шульман, А.В. Орлов // Биологическая рекультивация нарушенных земель: материалы Международного совещания. – Екатеринбург, 1996. – С. 22.

8. Малева, М.Г. Влияние рекультивационных мероприятий на накопление металлов у орхидеи Platanthera bifolia в условиях золоотвала / М.Г. Малева, Г.Г. Борисова, Е.И. Филимонова, М.А. Глазырина, Н.В. Лукина, А.В. Собенин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – №. 9–1 (99). – С. 88–94.

9. Бирюков, В.В. Эффективные направления крупномасштабного использования золошлаковых отходов / В.В. Бирюков, С.Е. Метелев, В.В. Сиротюк, В.Р. Шевцов // Сибирский торгово-экономический журнал. – 2008. – №. 7. – С. 66–70.

10. Ефимов, Н.Н. Экологические аспекты и проблемы утилизации и рециклинга золошлаковых отходов тепловых электростанций / Н.Н. Ефимов, Е.А. Яценко, В.А. Смолий, А.С. Косарев, В.В. Копица // Экология промышленного производства. – 2011. – №. 2. – С. 40–44.

11. Подгородецкий, Г.С. Проблемы и перспективы утилизации золошлаковых отходов ТЭЦ. Часть 1 / Г.С. Подгородецкий, В.Б. Горбунов, Е.А. Агапов, Т.В. Ерохов, О.Н. Козлова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61, №. 6. – С. 439–446.

12. Кожуховский, И.С. Организационно-экономические и правовые аспекты создания и развития производственно-технических комплексов по переработке золошлаковых отходов в строительную и иную продукцию / И.С. Кожуховский, Ю.К. Целыковский, Э.С. Цховребов // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14, № 6 (129). – С. 756–773

13. Федорова, Н.В. Анализ зарубежного опыта использования золошлаковых отходов ТЭС и возможностей мультиагентного моделирования процессов утилизации

(обзор) / Н.В. Федорова, В.А. Мохов, А.Ю. Бабушкин // Экология промышленного производства. – 2015. – №. 3. – С. 2–7.

14. Senapati, M.R. Fly ash from thermal power plants–waste management and overview / M.R. Senapati // Current science. – 2011. – С. 1791–1794.

15. Haldive, S.A. Experimental study on combined effect of fly ash and pond ash on strength and durability of concrete / S.A. Haldive, A.R. Kambekar // Int J SciEng Res. – 2013. – Vol. 4, №. 5. – P. 81–86.

16. Jose, A. Characterization of cement stabilized pond ash using FTIR spectroscopy / A. Jose, M.R. Nivitha, J.M. Krishnan, R.G. Robinson // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 263. – P. 120136.

17. Зайченко, Н.М. Высокофункциональные бетоны с различным содержанием обогащенной золы-уноса ТЭС / Н.М. Зайченко, И.Ю. Петрик //Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение: сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию Инженерно-технического института Северо-Восточного федерального университета им. МК Аммосова (Якутск, 27-28 октября 2016 г.). – Якутск: МЦНИП, 2016. – С. 240.

18. Губарь, В.Н. Способы повышения качества золы-уноса ТЭС, применяемой в высококачественных бетонах / В.Н. Губарь, И.Ю. Петрик, А.В. Жибоедов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2016. – №. 3. – С. 63–70.

19. Ефименко, Ю.В. Влияние золы на свойства бетона / Ю.В. Ефименко [и др.] // Вологдинские чтения. – 2012. – №. 80. – С. 26–27.

20. Кожухова, М.И. Оценка эффективности применения гидрофобных водных эмульсий с содержанием нано- и микроразмерных частиц для модификации мелкозернистого бетона / М.И. Кожухова [и др.] // Строительные материалы. – 2017. – №. 5. – С. 92–97.

21. Кожухова, М.И. Особенности гидрофобизации мелкозернистых бетонных поверхностей / М.И. Кожухова, В.В. Строкова, К.С. Соболев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2014. – №. 4. – С. 33–35.

22. Массалимов, И.А. Гидрофобизация плотного и мелкозернистого бетонов полисульфидными растворами / И.А. Массалимов [и др.] // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2016. – Т. 8, №. 5. – С. 85–99.

23. Федюк, Р.С. Вопросы проектирования гидротехнических бетонов / Р.С. Федюк, Д.Н. Пезин, Е.А. Попов // Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека: сб. трудов II Междунар. онлайн-конгресса. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 490–494.

24. Соловьев, В.Г. Объемная гидрофобизация растворных смесей / В.Г. Соловьев, В.А. Швецова // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2021: сб. докладов II Нац. научной конф. – М., 2022. – С. 313–317.

25. Явинский, А.В. Влияние удельной поверхности золы гидроудаления на свойства золоцементного камня / А.В. Явинский, И.Л. Чулкова // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 2. – С. 73–80.

26. Ращупкина, М.А. Влияние водоредуцирующих суперпластификаторов и золы гидроудаления на свойства цементного камня / М.А. Ращупкина, А.В. Явинский, И.Л. Чулкова// Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2021. – №. 3. – С. 49–55.

27. Сивков, С.П. Влияние модифицированных гидрофобных добавок на свойства цементных растворов и бетонов / С.П. Сивков, Е.А. Косинов // Технологии бетонов. – 2010. – №. 7–8. – С. 35–37.

References

1. Bazhenov, Y.M. High-quality self-compacting concretes using coal combustion waste / Y.M Bazhenov., V.V. Voronin, L.A. Alimov, A.M. Bakhrakh, O.A. Larsen, V.N. Soloviev, N.D. Kuang // Vestnik MGSU. – 2017. – Vol.12, No.12 (111). – P.1385–1391.

2. Lesovik, V.S. Theoretical prerequisites for creating cement composites of high impermeability / Lesovik V.S., Fedyuka R.S. // Bulletin of the Siberian State Automobile and Road Academy. – 2016. – No.1 (47). – P.65–72.

3. Nigmatulin, R.I. How to equip economy and power of Russia: Analysis of Engineer and Mathematics / R.I. Nigmatulin // EnergoSecurity and Energy Saving. – 2007. – No.5. – P.3–12.

4. Yavinsky, A.V. Influence of hydraulic ash on the properties of heavy concrete for road pavement construction / A.V. Yavinsky, I.L. Chulkova // Bulletin of BSTU named after V.G.Shukhov. – 2022. – No 3. – P.16–24.

5. Lemly, A.D. Damage cost of the Dan River coal ash spill / A.D. Lemly // Environmental Pollution. – 2015. – Vol.197. – P.55–61.

6. Yang, Y. Importance of a nanoscience approach in the understanding of major aqueous contamination scenarios: case study from a recent coal ash spill / Y. Yang, B.P. Colman, E.S. Bernhardt, M.F. Hochella // Environmental Science & Technology. – 2015. – Vol.49, No.6. – P.3375–3382.

7. Vishnya, B.L. Methods of Recultivation of TPP Waste Ash Dumps / B.L. Vishnya, V.L. Shulman, A.V. Orlov // Biological Recultivation of Disturbed Lands: materials of International Meeting. – Yekaterinburg, 1996. – 1996. – P.22.

8. Maleva, M.G. The influence of reclamation measures on the accumulation of metals in Platanthera bifolia orchid under ash dump conditions / M.G. Maleva, G.G. Borisova, E.I. Filimonova, M.A. Glazyrina, N.V. Lukina, A.B. Sobenin // International Scientific Research Journal. – 2020. – No.9–1 (99). – P.88–94.

9. Biryukov, V.V. Effective directions of the large-scale use of ash-and-slag wastes / V.V. Biryukov, S.E. Metelev, V.V. Sirotyuk, V.R. Shevtsov // Siberian trade and economic journal. – 2008. – No.7. – P.66–70.

10. Efimov, N.N. Environmental aspects and problems of utilization and recycling of ash and slag waste from thermal power plants / N.N. Efimov, E.A. Yatsenko, V.A. Smoliy, A.S. Kosarev, V. Kopitsa // Ecology of Industrial Production. – 2011. – No.2. – P.40–44.

11. Podgorodetsky, G.S. Problems and prospects of utilization of ash-and-slag wastes from TPPs. Part 1 / G.S. Podgorodetsky, V.B. Gorbunov, E.A. Agapov, T.V. Erohov, O.N. Kozlova // Izvestia of higher educational institutions.Ferrous metallurgy. – 2018. – Vol.61, No.6. – P.439–446.

12. Kozhukhovsky, I.S. Organizational, economic and legal aspects of the creation and development of industrial and technical complexes for processing ash waste into construction and other products / I.S. Kozhukhovsky, Y.K. Tselykovsky, E.S. Tskhovrebov // Bulletin of MSCU. – 2019. – Vol.14, No.6 (129). – P.756–773.

13. Fedorova, N.V. Analysis of foreign experience in the use of ash and slag waste from TPPs and the possibilities of multi-agent modeling of recycling processes (review) / N.V. Fedorova, V.A. Mokhov, A. Babushkin // Ecology of industrial production. – 2015. – No.3. – P.2–7.

14. Senapati, M.R. Fly ash from thermal power plants-waste management and overview / M.R. Senapati // Current science. – 2011. – P.1791–1794.

15. Haldive, S.A. Experimental study on combined effect of fly ash and pond ash on strength and durability of concrete / S.A. Haldive, A.R. Kambekar // Int J SciEng Res. – 2013. – Vol.4, No.5. – P.81–86.

16. Jose, A. Characterization of cement stabilized pondh ash using FTIR spectroscopy / A. Jose, M.R. Nivitha, J.M. Krishnan, R.G. Robinson // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol.263. – P.120136.

17. High-functional concretes with different content of enriched TPP fly ash // Modern problems of construction and life support: safety, quality, energy and resource saving:

collection of articles of IV All-Russian Scientific-Practical Conference devoted to the 60th Anniversary of Engineering-Technical Institute of North-Eastern Federal University named after MK Ammosov (Yakutsk, October 27-28, 2016). – Yakutsk: ICNIP, 2016. – P.240.

18. Gubar, V.N. Ways to improve the quality of TPP fly ash used in high quality concrete / V.N. Gubar, I.Yu. Petrik, A.V. Zhiboedov // Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. – 2016. – No.3. – P.63–70.

19. Efimenko, Y.V. Influence of ash on the properties of concrete / Y.V. Efimenko [etc.] // Vologda Readings. – 2012. – No.80. – P.26–27.

20. Kozhukhova, M.I. Evaluation of the effectiveness of hydrophobic aqueous emulsions containing nano- and microscale particles for modification of fine-grained concrete / M.I. Kozhukhova [etc.]. // Building Materials. – 2017. – No.5. – P.92–97.

21. Kozhukhova, M.I. Features of hydrophobization of fine-grained concrete surfaces / M.I. Kozhukhova, V.V. Strokova, K.S. Sobolev // Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.V.Shukhov. – 2014. – No.4. – P.33–35.

22. Massalimov, I.A. Hydrophobization of dense and fine-grained concrete with polysulfide solutions / I.A. Massalimov [etc.] // Nanotechnology in construction: scientific online journal. – 2016. – Vol.8. – No.5. – P.85–99.

23. Fedyuk, R.S. Projects of design of hydrotechnical betones / R.S. Fedyuk, D.N. Pezin, E.A. Popov // Nature-based Technologies of Construction Composites for Human Habitat Protection: proceedings of the II International. internet congress. – Belgorod: BSTU named after S.D. Shukhov, 2019. – P.490–494.

24. Solovjev, V.G. Volumetric hydrophobization of mortar mixtures / V.G. Solovjev, V.A. Shvetsova // Actual problems of the construction industry and education – 2021: collection of reports II Nazi. scientific conf. – M., 2022. – P.313–317.

25. Yavinsky, A.V. Influence of specific surface of pond ash on the properties of ash-and-cement stone / A.V. Yavinsky, I.L. Chulkova // Industrial and Civil Engineering. – 2023. – No 2. – P.73–80.

26. Rashupkina, M.A. Effect of water-reducing superplasticizers and hydroremoval ash on the properties of the cement stone / M.A. Rashupkina, A.V. Yavinsky, I.L. Chulkova // Izvestiya vysshee uchebnykh obrazovaniyakh.Construction. – 2021. – No.3. – P.49–55.

27. Sivkov, S.P. Effect of modified hydrophobic additives on the properties of cement mortars and concretes / S.P. Sivkov, E.A. Kosinov // Concrete Technology. – 2010. – No.7–8. – P.35–37.

УДК 001.8:519.7:69 DOI 10.54734/20722958_2023_2_30

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

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ: МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

Рассматриваются актуальные математические задачи системного анализа, связанные с разработкой композиционных материалов как сложных систем. Особое внимание уделяется моделированию кинетических процессов формирования физико-механических характеристик; объективизации оценки качества с использованием сплайнов; оптимизации структуры и свойств по дифференциальным моделям материалов и нелинейному синтезу. Указываются примеры практических реализаций.

Ключевые слова: композиты, сложные системы, синтез, математическое моделирование, методы

SYSTEM ANALYSIS: MATHEMATICAL BASICS SYNTHESIS OF COMPOSITE MATERIALS

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

Actual mathematical problems of system analysis related to the development of composite materials as complex systems are considered. Particular attention is paid to modeling kinetic processes of physical and mechanical characteristics formation; to the objectification of quality assessment using splines, optimization of structure and properties by differential models of materials and nonlinear synthesis. Examples of practical implementations are given.

Keywords: composites, complex systems, synthesis, mathematical modeling, methods

1. Моделирование кинетических процессов

Рассмотрим аналитические представления кинетических процессов формирования физико-механических характеристик композитов [1, 2]. Процессы в гетерогенных системах обычно носят экспоненциальный характер:

$$y = ae^{bx},\ \lg y = \lg a + bx,\ \lg y = Y,\ x = X,\ \lg a = A;\ Y = A + bX;$$

A, b легко вычисляются методом линейной регрессии.

В качестве иллюстрации приведем параметрическую идентификацию таблично заданного кинетического процесса (табл. 1).

Таблица 1

x	1,84	1,92	2,0	2,08	2,16	2,24	2,32	2,4
y	61,7	62,5	63	63,6	64,5	65	65,4	66,4
x	2,48	2,56	2,64	2,72	2,8	2,96	3,04	3,12
y	67.1	68,0	68,7	69.4	70,2	70,2	71.1	72,8
x	3,2	3,28	3,36	3,44	3,52	3,6	3,68	3,76
y	73,6	74,5	76,4	77,2	78,1	79,2	80,3	81,2
x	3,84	3,92	4,0	4,08	4,16	4,24	4,32	4,4
y	82,2	83,3	84,4	85,4	86,5	87,8	89,1	90,1
x	4,48	4,56	4,64	4,72	4,8	4,88	4,96	
y	91,3	92,5	93,8	95,1	96,4	97,8	98,7	

Непосредственные вычисления дают

$$y = 20e^{0,25x} + 3.$$

При $y = ax^b$ используется соотношение $\lg y = \lg a + b \lg x$.

В ряде случаев метод непригоден; в частности, при

$$y = a_0 + a_1 \lg\left(a_2 + x\right),$$

в которой требуется идентифицировать a_0, a_1, a_2, используя метод малых возмущений:

$$\Delta y = \frac{a_1}{a_2 - x}\Delta x = b\Delta x.$$

Здесь коэффициент b может быть идентифицирован с помощью линейной регрессии:

$$b = \frac{a_1}{a_2 - x}.$$

Однако это не дает решения для a_0, a_1, a_2. Использование высших частных производных (возмущения второго и последующих порядков) на практике обычно не имеет смысла, так как здесь значимость производных мала (измерения, как правило, зашумлены).

Для ряда дисперсных систем используются нелинейные аналитические модели (получаются на основе интуитивных или теоретических соображений). Рассмотрим параметрическую идентификацию процесса

$$y = a_0 + a_1 x_1 x_2^3 + a_2 x_2 e^{-a_3 \frac{x_1^2}{x_3}} + \frac{a_4 x_4}{\sqrt{1 - a_5 x_5^2}},\ y = a_0 + a_1\xi_1 + a_2\xi_3 e^{-a_3\xi_2} + \frac{a_4\xi_4}{\sqrt{1 - a_5\xi_5^2}};$$

$$\xi_1 = x_1 x_2^3,\ \xi_2 = \frac{x_1^2}{x_3},\ \xi_3 = x_2,\ \xi_4 = x_4,\ \xi_5 = x_5.$$

При малости приращений переменных справедливо:

$$\Delta y = a_1\Delta\xi_1 - a_2 a_3 \xi_3 e^{-a_3\xi_2}\Delta\xi_2 + a_2 e^{-a_3\xi_2}\Delta\xi_3 + \frac{a_4\xi_4}{\sqrt{1 - a_5\xi_5^2}}\Delta\xi_4 + \frac{a_4 a_5 \xi_4 \xi_5}{\sqrt{(1 - a_5\xi_5^2)^3}}\Delta\xi_5;$$

$$b_1 = a_1, b_2 = -a_2 a_3 \xi_3 e^{-a_3 \xi_2}, b_3 = a_2 e^{-a_3 \xi_2}, b_4 = \frac{a_4 \xi_4}{\sqrt{1 - a_5 \xi_5^2}}, b_5 = \frac{a_4 a_5 \xi_4 \xi_5}{\sqrt{(1 - a_5 \xi_5^2)^3}},$$

$$\Delta y = b_1 \Delta\xi_1 - b_2 \Delta\xi_2 + b_3 \Delta\xi_3 + b_4 \Delta\xi_4 + b_5 \Delta\xi_5 = \sum_i b_i \Delta\xi_i .$$

При идентификации a_0, a_1, a_2 воспользуемся методом линейной регрессии

$$b_1 = a_1, b_2 = -a_2 a_3 \xi_3 e^{-a_3 \xi_2}, b_3 = a_2 e^{-a_3 \xi_2}, b_4 = \frac{a_4 \xi_4}{\sqrt{1 - a_5 \xi_5^2}}, b_5 = \frac{a_4 a_5 \xi_4 \xi_5}{\sqrt{(1 - a_5 \xi_5^2)^3}}$$

(статическая система с одним выходом: $X = a_0 + a_1 U_1 + \cdots + a_m U_m$). С учетом $b_5 = b_4 a_5 \xi_4 \xi_5$, определим a_5. В соответствии с предыдущим ξ_4, ξ_5 доступны для измерения. Подставляя выражения для a_5 в формулу для b_4, получим a_4. Член a_1 непосредственно определяется величиной b_1. Члены a_2, a_3 определятся по соотношениям для b_2, b_3; значение a_3 – из выражения $b_2 = -a_3 \xi_3 b_3$ (переменная ξ_3 доступна для измерения); a_2 – подстановкой a_3 в выражение для b_2.

Аналогично можно производить параметрическую идентификацию и в случаях других нелинейностей.

2. Кубические сплайны

Обобщенный критерий качества композиционного материала строится на основе частных критериев качества (отдельных свойств!) [3…5]. Поэтому актуальной является задача получения аналитических зависимостей частных критериев как функций времени (задач приближения функций: по заданной таблице чисел $\left(x_i, f\left(x_i\right)\right)$, $x_i \in \left[a, b\right], i = \overline{1, N}$, вычислить функцию $f\left(x\right)$ с той или иной точностью на отрезке $\left[a, b\right]$ действительной оси; основан на построении интерполяционного многочлена Лагранжа

$$L_N = \sum_{i=1}^{n} f\left(x_i\right) \frac{\omega_N\left(x\right)}{\left(x - x_i\right) \omega'_N\left(x_i\right)}, \quad \omega_N\left(x\right) = \prod_{i=1}^{n} \left(x - x_i\right)) .$$

Однако даже при большом числе узлов интерполяционный многочлен Лагранжа не всегда позволяет получить необходимое приближение функции (так, последовательность интерполяционных многочленов Лагранжа, построенных для непрерывной на отрезке $\left[-1, 1\right]$ функции $f\left(x\right) = \left|x\right|$ по равноотстоящим узлам, не сходится при возрастании числа узлов N к $f\left(x\right)$). Иногда трудности построения приемлемых интерполяционных многочленов удаётся преодолевать за счёт перехода к специальным многочленам или выбора подходящей системы узлов интерполяции. Вместо построения глобального интерполяционного многочлена на всём промежутке используется кусочно-линейная интерполяция (точками $a = x_1 < x_2 < \ldots < x_N = b$ отрезок разбивается на части; на каждом промежутке $\left[x_i, x_{i+1}\right], i = \overline{1, N}$ строится свой интерполяционный многочлен). Полученные многочлены (обычно одной степени) интерполируют функцию на всём отрезке; особую озабоченность при этом вызывают условия сопряжения на концах соседних отрезков. Перспективным оказалось использование сплайнов. При построении кубических сплайнов, являющихся дважды непрерывно дифференцируемыми функциями, предполагается, что на отрезке $\left[a, b\right]$ в узлах сетки

ω $\{a = x_1 < x_2 < \ldots < x_N = b\}$ заданы значения функции $f(x)$: $f_i = f(x_i), i = \overline{1, N}$. Интерполяционный кубический сплайн $S(x)$ удовлетворяет условиям

$$S(x_i) = f_i, S'(x_i) = f'(x_i), S''(x_i) = f''(x_i),$$

и на каждом из отрезков $[x_i, x_{i+1}]$ он определяется четырьмя коэффициентами (для его построения на всём промежутке $[a, b]$ необходимо определить 4·*N* коэффициентов). Предполагается, непрерывность во всех внутренних узлах интерполяции $x_i, i = \overline{2, N-1}$, не только сплайна $S(x)$, но и его производных $S'(x)$ и $S''(x)$. Из этих условий получаются $3(N-1)$ уравнений для определения неизвестных коэффициентов сплайна. Два уравнения получаются из ограничений на значение сплайна и его производных на концах промежутка $[a, b]$ (краевые условия). Наиболее употребительными являются краевые условия вида

$$S'(a) = f'(a), S'(b) = f'(b);$$

$$S''(a) = f''(a), S''(b) = f''(b);$$

$$S^k(a) = S^k(b), k = 1, 2;$$

$$S'''(x_p + 0) = S'''(x_p - 0), p = 1, p = N - 1.$$

При определении аналитических зависимостей для кинетических процессов (по каждому из частных критериев) нами использовался приведенный ниже алгоритм построения интерполяционных кубических сплайнов. На каждом из отрезков $[x_i, x_{i+1}]$ справедливо:

$$S(x) = a_i + b_i x + c_i x^2 + d_i x^3;$$

$$S'(x_i) = m_i, i = \overline{o, N};$$

$$h_i = x_{i+1} - x_i, t = (x - x_i)/h_i;$$

$$S(x) = f_i(1-t)^2(1+2t) + f_{i+1}t^2(3-2t) + m_i h_i(1-t)^2 - m_{i+1}t^2(1+t)h_i$$

(на каждом из $[x_i, x_{i+1}]$ непрерывен вместе со своей первой производной всюду на $[a, b]$). Из условия непрерывности второй производной во всех внутренних узлах следует:

$$\mu_i = \frac{h_{i-1}}{h_{i-1} + h_i}, \lambda_i = 1 - \mu_i = \frac{h_i}{h_{i-1} + h_i}, i = \overline{0, N}.$$

$$\lambda_i m_{i-1} + 2m_i + \mu_i m_{i+1} = 3\left(\mu_i \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i} + \lambda_i \frac{f_i - f_{i-1}}{h_{i-1}}\right).$$

С учетом граничных условий добавятся уравнения

$$2m_0 + m_1 = 3\frac{f_1 - f_0}{h_0}, m_{N-1} + 2m_N = 3\frac{f_N - f_{N-1}}{h_{N-1}}.$$

Построение кубического сплайна свелось к решению линейной системы с трехдиагональной матрицей относительно неизвестных коэффициентов m_i:

$$2m_0 + m_1 = 3\frac{f_1 - f_0}{h_0},$$

$$\lambda_i m_{i-1} + 2m_i + \mu_i m_{i+1} = 3\left(\mu_i \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i} + \lambda_i \frac{f_i - f_{i-1}}{h_{i-1}}\right),$$

$$m_{N-1} + 2m_N = 3\frac{f_N - f_{N-1}}{h_{N-1}}.$$

Были получены удовлетворительные для практических целей результаты [2].

3. Дифференциальные модели

При оптимизации структуры и свойств композиционных материалов широко используются модели, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями, в основном второго порядка [6, 7]; $k_{1,2} = -\lambda_{1,2}$ – корни характеристического уравнения. При $n^2 - \omega_0^2 > 0$ справедливо

$$z = c_1\, e^{-\lambda_1 t} + c_2\, e^{-\lambda_2 t};\ \lambda_1 = n + \sqrt{n^2 - \omega_0^2};\quad \lambda_2 = n - \sqrt{n^2 - \omega_0^2};\ \lambda_1 > \lambda_2 > 0;$$

при $z(0) = -x_m,\quad \dot{z}(0) = 0$ с учетом $\dot{z}(t) = -c_1\, e^{-\lambda_1 t} - c_2\, e^{-\lambda_2 t}$:

$$z(0) = c_1 + c_2 = -x_m,\ \dot{z}(0) = -(c_1\,\lambda_1 + c_2\,\lambda_2) = 0;$$

$$c_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}\, x_m,\quad c_2 = -\frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2}\, x_m;$$

$$z = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}\, x_m e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2}\, x_m e^{-\lambda_2 t},\ x = \frac{x_m}{\lambda_1 - \lambda_2}\left(\lambda_2\, e^{-\lambda_1 t} - \lambda_1\, e^{-\lambda_2 t}\right) + x_m;$$

$$\ddot{z} = \ddot{x} = c_1\,\lambda_1^2\, e^{-\lambda_1 t} + c_2\,\lambda_2^2\, e^{-\lambda_2 t}.$$

Из $\ddot{x} = 0$ следует

$$\frac{\lambda_2\,\lambda_1^2}{\lambda_1 - \lambda_2}\, x_m e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1\,\lambda_2^2}{\lambda_1 - \lambda_2}\, x_m e^{-\lambda_2 t} = 0;\ \lambda_1\, e^{-\lambda_1 t_n} = \lambda_2\, e^{-\lambda_2 t_n},\ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = e^{(\lambda_1 - \lambda_2) t_n}.$$

Точке перегиба соответствует значение $t = t_n$, определяемое из условия $t_n = \dfrac{1}{\lambda_1 - \lambda_2}\ln\dfrac{\lambda_1}{\lambda_2}$ (при $t = t_n$ вогнутость сменяется на выпуклость).

Вид кинетического процесса определяется корнями $\lambda_1 = \lambda_1(\omega_0, n)$ и $\lambda_2 = \lambda_2(\omega_0, n)$ (рис. 1); ω_0 и n определяют упругие и демпфирующие свойства материала. Из $\lambda_1 = n + \sqrt{n^2 - \omega_0^2} < 2n,\ \lambda_2 = n - \sqrt{n^2 - \omega_0^2} < n,\ \left(n^2 > \omega_0^2\right)$ следует $\lambda_1 < n < \lambda_2 < 2n$. При этом $\lambda_1 \to \lambda_2$ при $n \to \omega_0$. Справедливо

$$\frac{\partial \lambda_1}{\partial n} = 1 + \frac{n}{\sqrt{n^2 - \omega_0^2}} > 0,\qquad \frac{\partial \lambda_2}{\partial n} = 1 - \frac{n}{\sqrt{n^2 - \omega_0^2}} < 0,$$

$$\frac{\partial \lambda_1}{\partial \omega_0} = -\frac{\omega_0}{\sqrt{n^2 - \omega_0^2}} < 0,\qquad \frac{\partial \lambda_2}{\partial \omega_0} = \frac{\omega_0}{\sqrt{n^2 - \omega_0^2}} > 0,$$

$$\frac{\partial^2 \lambda_1}{\partial n^2} = -\frac{\omega_0^2}{\sqrt{\left(n^2 - \omega_0^2\right)^3}} < 0,\qquad \frac{\partial^2 \lambda_2}{\partial n^2} = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\left(n^2 - \omega_0^2\right)^3}} > 0,$$

$$\frac{\partial^2 \lambda_1}{\partial \omega_0^2} = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\left(n^2 - \omega_0^2\right)^3}} > 0,\qquad \frac{\partial^2 \lambda_2}{\partial \omega^2} = -\frac{\omega_0^2}{\sqrt{\left(n^2 - \omega_0^2\right)^3}} < 0.$$

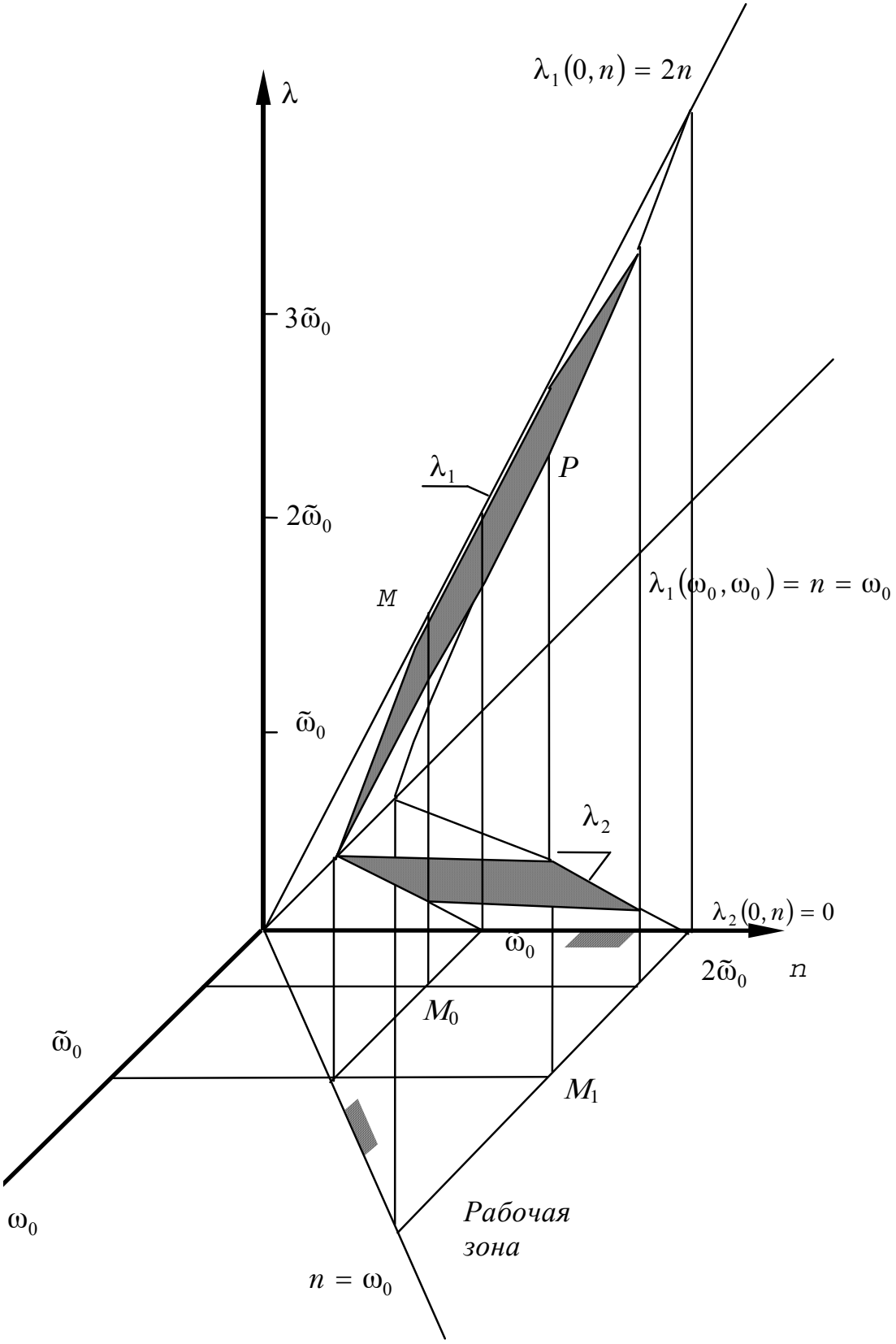


Рис. 1. Вид функций $\lambda_1 = \lambda_1(\omega_0, n)$ и $\lambda_2 = \lambda_2(\omega_0, n)$

Введем безразмерный коэффициент демпфирования $\xi = \dfrac{n}{\omega_0}$, $n \geq \omega_0$, $\xi \geq 1$; определяется структурой и физико-химическими свойствами материала:

$$\lambda_1 = \left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}\right) \cdot \omega_0, \quad \lambda_2 = \left(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}\right) \cdot \omega_0;$$

$$\lambda_1 - \lambda_2 = 2\,\omega_0 \sqrt{\xi^2 - 1};$$

$$r = \frac{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}}{\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}} = \frac{\left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}\right) \cdot \left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}\right)}{\left(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}\right) \cdot \left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}\right)} = \left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}\right)^2 = \frac{1}{\omega_0^2} \lambda_1^2;$$

$$\lambda_1 = \omega_0 \sqrt{r}; \qquad \lambda_1 = \lambda_2\, r; \qquad \lambda_2 = \frac{1}{\sqrt{r}} \omega_0.$$

Справедливо:

$$\frac{\partial r}{\partial \xi} = 2\left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}\right) \cdot \left(1 + \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 - 1}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\xi^2 - 1}}\, r; \quad \frac{\partial r}{\partial \xi} > 0 \qquad \forall\, \xi \geq 1.$$

С ростом ξ значение $\dfrac{\lambda_1}{\lambda_2}$ растет. Из

$$\frac{\partial^2 r}{\partial \xi^2} = 2\left[\frac{\partial r}{\partial \xi}\sqrt{\xi^2 - 1} - r\frac{\xi}{\xi^2 - 1}\right] \cdot \frac{1}{\xi^2 - 1} = \frac{2r}{\sqrt{\left(\xi^2 - 1\right)^3}}\left(2\sqrt{\xi^2 - 1} - \xi\right); \quad \frac{d^2 r}{d\xi^2} = 0$$

следует, что функция $r = r(\xi)$ имеет перегиб в точке с абсциссой $\xi = \dfrac{2}{\sqrt{3}}$ (при $1 \leq \xi \leq \dfrac{2}{\sqrt{3}}$ функция выпукла, при $\xi > \dfrac{2}{\sqrt{3}}$ – вогнута). Легко заметить, что функция $r = r(\xi)$ является решением дифференциального уравнения $\dfrac{d\,r}{d\,\xi} - \dfrac{2}{\sqrt{\xi^2 - 1}} \cdot r = 0$; $r = \left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}\right)^2$.

В ряде случаев использовались модели кинетического процесса *x(t)*, представляющего собой решение задачи Коши:

$$z^{(4)} + a_1 z^{(3)} + a_2 z^{(2)} + a_3 z^{(1)} + a_4 z = 0,$$

$$z = x - x_m; \qquad x(0) = x_0, \quad \dot{x}(0) = \dot{x}_0, \ddot{x}(0) = \ddot{x}_0, \dddot{x}(0) = \dddot{x}_0;$$

x_0, $\dot{x}_0, \ddot{x}_0, \dddot{x}_0$ определяются требуемым видом кинетического процесса и заданным эксплуатационным значением x_m исследуемой характеристики материала.

Для моделей второго порядка $\lambda_1 = \lambda_1(\omega_0,\ n)$, $\lambda_2 = \lambda_2(\omega_0,\ n)$. Линии уровня функции $\lambda_2(\omega_0,\ n)$ определяются уравнением (рис. 2а)

$$n - \sqrt{n^2 - \omega_0^2} = \lambda_2^{(0)} = \text{const}; \quad \sqrt{n^2 - \omega_0^2} = n - \lambda_2^{(0)}; \quad n = \frac{\lambda_2^{(0)}}{2} + \frac{1}{2\lambda_2^{(0)}}\,\omega_0^2.$$

При движении вдоль параболы $n = \frac{\lambda_2^{(0)}}{2} + \frac{1}{2\lambda_2^{(0)}}\omega_0^2$ значение λ_2 постоянно и равно $\lambda_2^{(0)}$.Рассмотрим две линии уровня $\lambda_2 = \lambda_2^{(1)} > 0,\ \lambda_2 = \lambda_2^{(2)} > 0,\ \lambda_2^{(2)} > \lambda_2^{(1)}$. Абсцисса их точки пересечения определяется уравнением

$$\frac{\lambda_2^{(1)}}{2} + \frac{1}{\lambda_2^{(1)}}\omega_0^2 = \frac{\lambda_2^{(2)}}{2} + \frac{1}{2\lambda_2^{(2)}}\omega_0^2;\ \omega_0^n = \sqrt{\lambda_2^{(1)} \cdot \lambda_2^{(2)}}.$$

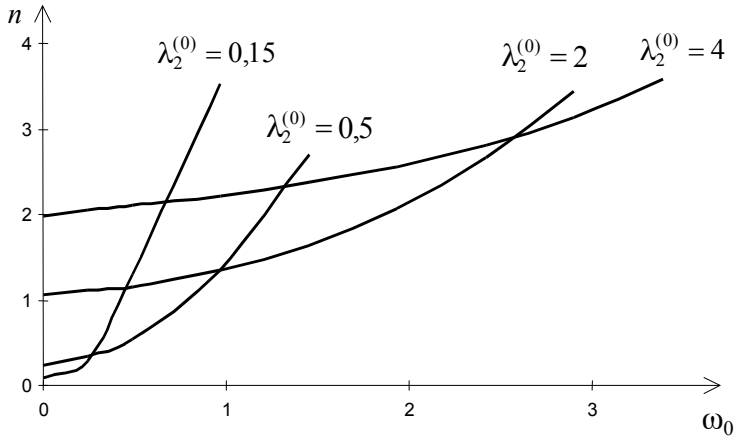
Если $\omega_0 = \sqrt{\lambda_2^{(1)} \cdot \lambda_2^{(2)}}$, то линия уровня $n = \frac{\lambda_2^{(2)}}{2} + \frac{1}{2\lambda_2^{(2)}}\omega_0^2$ проходит выше линии уровня $n = \frac{\lambda_2^{(1)}}{2} + \frac{1}{2\lambda_2^{(1)}}\omega_0^2$, а при значениях $\omega_0 > \sqrt{\lambda_2^{(1)} \cdot \lambda_2^{(2)}}$ первая линия уровня проходит ниже второй (рис. 2б).

Направление наискорейшего роста λ_2 совпадает с направлением **grad** $\lambda_2(\omega_0,n)$ и перпендикулярно направлению касательной к линии уровня в заданной точке.

Аналогично определяются линии уровня функции $\lambda_1(\omega_0,\ n)$:

$$n = \frac{\lambda_1^{(0)}}{2} + \frac{1}{\lambda_1^{(0)}}\omega_0^2.$$

а



б

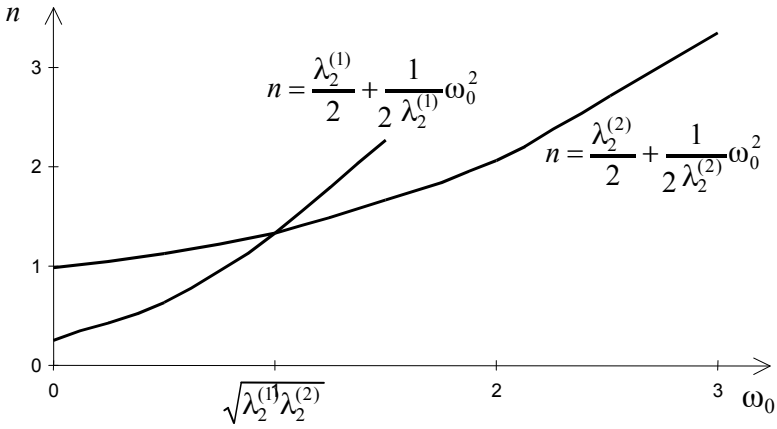


Рис. 2. Расположение линий уровня:
а – $\lambda_2^{(0)} = \text{const}$; б – взаимное

Линии уровня $r = r_0 = \text{const}$;($r = r\left(\omega_0,\ n\right)$) определятся из условия

$$r = \left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}\right)^2 = \left(\frac{n}{\omega_0} + \sqrt{\left(\frac{n}{\omega_0}\right)^2 - 1}\right)^2 = r_0 .$$

Отсюда искомая линия уровня:

$$n = \frac{1 + r_0}{2 \cdot \sqrt{r_0}} \cdot \omega_0 \qquad \left(\omega_0,\quad n > 0,\quad r > 1\right).$$

Если при получении материала выбирается направление движения, обеспечивающее выполнение условия ξ = const, то корни λ_1, λ_2 (рис. 3) и переменная r станут функциями лишь одной переменной ω_0;

$$\frac{d\,\lambda_1}{d\,\omega_0} = \xi + \sqrt{\xi^2 - 1}; \quad \frac{d\,\lambda_2}{d\,\omega_0} = \xi - \sqrt{\xi^2 - 1},$$

то есть скорости изменения корней вдоль прямой ξ = const постоянны при изменении ω_0;

$$r = \left(\frac{d\,\lambda_1}{d\,\omega_0}\right)^2 .$$

При изменении ξ в 10 раз от 1 до 10 скорость изменения λ_2 уменьшается в 20 раз, а скорость изменения λ_1 увеличивается в 20 раз; r увеличивается в 400 раз.

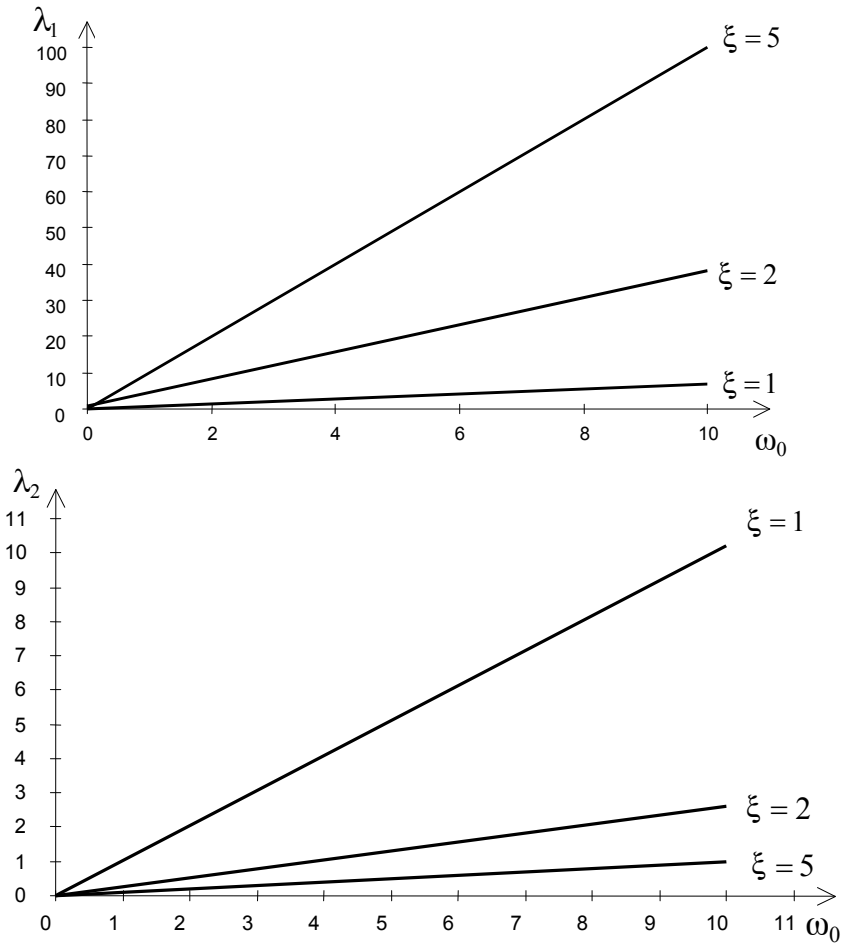


Рис. 3. Зависимости $\lambda_1 = \lambda_1\left(\omega_0, \xi\right)$ и $\lambda_2 = \lambda_2\left(\omega_0, \xi\right)$

Пусть исходная точка $M_0(\xi,\ \omega_0)$ находится между прямыми $\xi = \xi_1$ и $\xi = \xi_2$, $1 < \xi_1 < \xi_2$ (см. рис. 2, 3), и пусть граница класса системы определяется линией уровня $\Phi(\xi,\ \omega_0) = d$. Тогда для улучшения класса системы следует точку M_1 взять в направлении $\overline{M_0N}$. При этом M_1 может находиться как левее, так и правее линии ξ = const и Φ = const (рис. 4, 5).

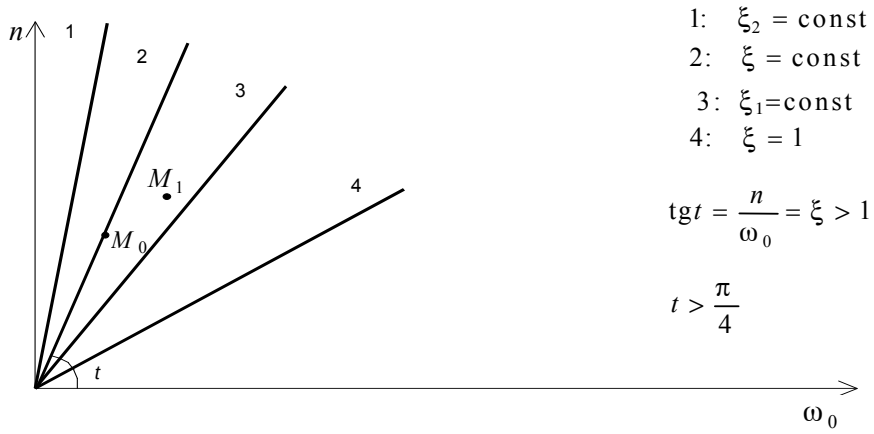


Рис. 4. Расположение M_1 относительно линий уровня ξ=const

Эффективность предложенной методики подтвердилась при разработке химически стойких серных композитов, эпоксидных композитов для защиты от радиации и др. [7, 8].

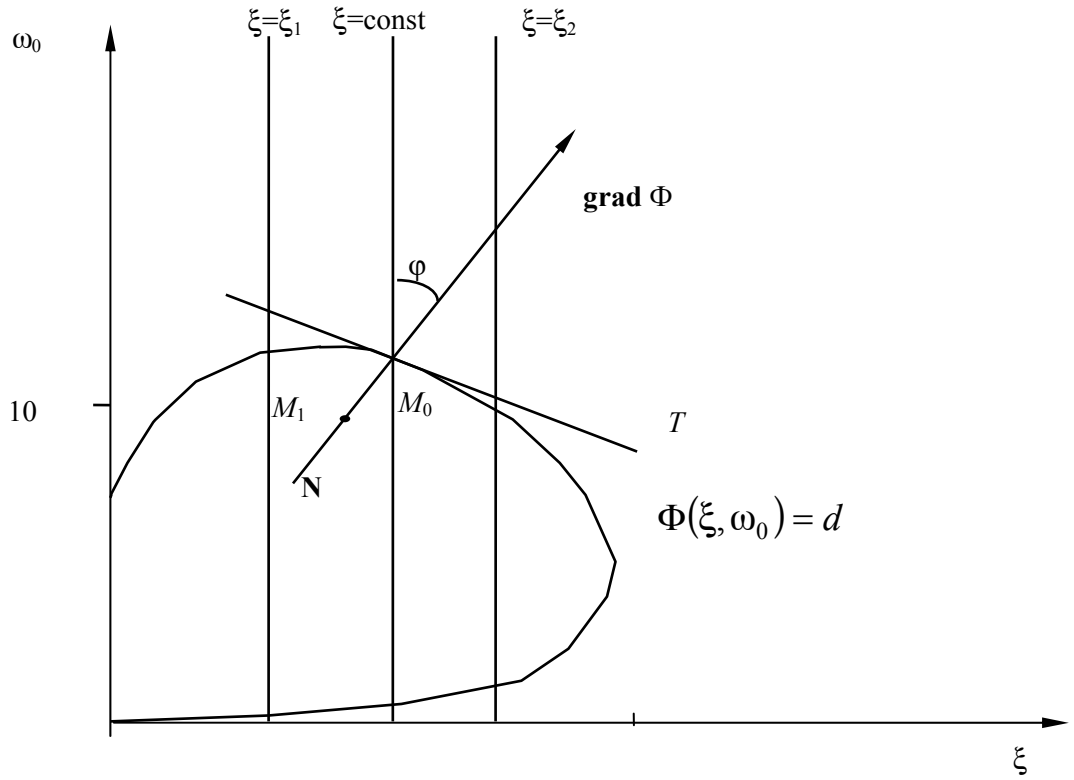


Рис. 5. Взаимное расположение областей равных оценок в плоскости $\xi\ 0\ \omega_0$ и линий уровня ξ=const

4. Нелинейный синтез композитов

Ограничимся случаем, когда минимизируется сумма линейной и квадратичной форм при ограничениях вида линейных неравенств при неотрицательности переменных:

$$q(\mathbf{x}) = \sum_j c_j\, x_j + \sum_j \sum_k d_{jk}\, x_j\, x_k = \min;\ \sum_k a_{ik}\, x_k - b_i \le 0,\ i = \overline{1,m};\ x_i \ge 0,\ j = \overline{1,n};$$

квадратичная форма – положительно определённая (а значит, и выпуклая; $f(\mathbf{x})$ является выпуклой, если при любом $0 \le \lambda \le 1$ справедливо

$$f\left[\lambda\, \mathbf{x}_1 + (1-\lambda)\, \mathbf{x}_2\right] \le \lambda\, f(\mathbf{x}_1) + (1-\lambda)\, f(\mathbf{x}_2)\,).$$

Линейная форма – также выпуклая функция. Поэтому целевая функция будет выпуклой. Необходимые условия Куна – Таккера являются и достаточными условиями существования единственного оптимума. Для записи условий Куна – Таккера введём в рассмотрение функцию Лагранжа:

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = \sum_j c_j\, x_j + \sum_j \sum_k d_{jk}\, x_j\, x_k + \sum_i \lambda_i \left(\sum_k a_{ik}\, x_k - b_i \right);$$

производные от $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$ по x_j и λ_i запишутся в виде

$$c_j + 2\sum_k d_{jk}\, x_k + \sum_i \lambda_i\, a_{ij} = p_j,\ j = \overline{1,n};\ \ b_i - \sum_k a_{ik} x_k = q_i,\ i = \overline{1,m}.$$

Найдем решение при условиях

$$x_j\, p_j = 0, \lambda_i\, q_i = 0,\ x_j \ge 0;\ \ \lambda_i \ge 0,\ p_j \ge 0,\ q_i \ge 0;\ i = \overline{1,m},\ j = \overline{1,n}$$

(в классической задаче оптимизации определяется минимум целевой функции $q(\mathbf{x})$; $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ – точка в пространстве R^n при наличии ограничений типа равенств $f_i(\mathbf{x}) = 0,\ i = \overline{1,m},\ m < n$). При наличии ограничений минимум функции $q(\mathbf{x})$ будет *условным,* при отсутствии – *безусловным* (сводится к определению и исследованию стационарных точек функции $q(\mathbf{x})$). Классический способ решения данной задачи состоит в том, что уравнения $f_i(\mathbf{x}) = 0,\ i = \overline{1,m},\ m < n$ используются для исключения из рассмотрения m переменных. Целевая функция приводится к виду $q(x_1, x_{2,}, \ldots, x_n) = q_1(y_1, y_{2,}, \ldots, y_{n-m})$, $y_1, y_{2,}, \ldots, y_{n-m}$ – неисключённые переменные. Задача сводится к нахождению значений $y_1, y_{2,}, \ldots, y_{n-m}$, которые обращают в минимум функцию q_1 и на которые не наложено никаких ограничений (задача на безусловный экстремум). Если ограничения имеют сложный вид, то исключение с их помощью m переменных из функции $q(\mathbf{x})$ представляет значительные трудности (поэтому задачи на условный экстремум и сводятся к задаче на безусловный и используется функция Лагранжа). При большом числе переменных угадывание допустимого базисного решения становится чрезвычайно трудоёмким (используются эффективные известные систематические методы получения допустимого базисного решения).

Для иллюстрации рассмотрим задачу определения рецептурно-технологических параметров композита, при которых достигается максимальное значение прочности на сжатие $R_{\text{сж}}$ (эквивалентна минимизации $q(x_1, x_2) = -R_{\text{сж}}$). Сначала методами математического планирования эксперимента была получена аппроксимационная модель

$$R_{\text{сж}} = 2x_1 + 4x_2 - x_1^2 - 2x_2^2$$

в области факторного пространства $x_1 + 2x_2 - 8 \le 0$, $2x_1 - x_2 - 12 \le 0$, $x_1, x_2 \ge 0$.

Функция $q(x_1, x_2)$ – выпуклая (сумма линейной функции $y = -2x_1 - 4x_2$ и положительно-определенной квадратичной формы $y = x_1^2 + 2x_2^2$). Система ограничений задачи включает только линейные неравенства; можно воспользоваться теоремой Куна – Таккера.

Функция Лагранжа:

$$L(x_1, x_2, \lambda_1, \lambda_2) = -2x_1 - 4x_2 + x_1^2 + 2x_2^2 + \lambda_1(x_1 + 2x_2 - 8) + \lambda_2(2x_1 - x_2 - 12);$$

необходимые и достаточные условия существования седловой точки:

$$p_1 = \frac{\partial L}{\partial x_1} = -2 + 2x_1 + \lambda_1 + 2\lambda_2 \geq 0,\ p_2 = \frac{\partial L}{\partial x_2} = -4 + 4x_2 + 2\lambda_1 - \lambda_2 \geq 0;$$

$$-q_1 = \frac{\partial L}{\partial \lambda_1} = x_1 + 2x_2 - 8 \leq 0,\ -q_2 = \frac{\partial L}{\partial \lambda_2} = 2x_1 - x_2 - 12 \leq 0.$$

$$x_1 p_1 = x_1(-2 + 2x_1 + \lambda_1 + \lambda_2) = 0,\ x_2 p_2 = x_2(-4 + 4x_2 + 2\lambda_1 - \lambda_2) = 0;$$

$$\lambda_1 q_1 = -\lambda_1(x_1 + 2x_2 - 8) = 0,\ \lambda_2 q_2 = -\lambda_2(2x_1 - x_2 - 12) = 0.$$

Введя дополнительные неотрицательные переменные v_1, v_2, w_1, w_2, обращающие неравенства (4) в равенства, получим:

$$p_1 - v_1 = -2 + 2x_1 + \lambda_1 + 2\lambda_2 - v_1 = 0;\ p_2 - v_2 = -4 + 4x_2 + 2\lambda_1 - \lambda_2 - v_2 = 0$$

$$-q_1 + w_1 = -8 + x_1 + 2x_2 + w_1 = 0,\ -q_2 + w_2 = -12 + 2x_1 - x_2 + w_2 = 0;$$

$$x_1 = 1 - \frac{1}{2}\lambda_1 - \lambda_2 + \frac{1}{2}v_1,\ x_2 = 1 - \frac{1}{2}\lambda_1 + \frac{1}{4}\lambda_2 + \frac{1}{4}v_2;$$

$$w_1 = 5 + \frac{3}{2}\lambda_1 + \frac{1}{2}\lambda_2 - \frac{1}{2}v_1 - \frac{1}{2}v_2,\ w_2 = 11 + \frac{1}{2}\lambda_1 + \frac{5}{4}\lambda_2 - v_1 + \frac{1}{4}v_2.$$

Отсюда базисное решение:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = v_1 = v_2 = 0,\ x_1 = 1, x_2 = 1, w_1 = 5, w_2 = 11;$$

$$p_1 = v_1 = 0,\ p_2 = v_2 = 0;\ q_1 = w_1 = 5, q_2 = w_2 = 11,$$

откуда следует справедливость условий

$$x_1 p_1 = 0, x_2 p_2 = 0;\quad \lambda_1 q_1 = 0, \lambda_2 q_2 = 0;\ x_1, x_2 \geq 0, \lambda_1, \lambda_2 \geq 0, p_1, p_2 \geq 0, q_1, q_2 \geq 0.$$

Так что $(x_1^0, x_2^0, \lambda_1^0, \lambda_2^0) = (1, 1, 0, 0)$ является седловой точкой функции Лагранжа для исходной задачи; $x^*(1, 1)$ – оптимальный план исходной задачи; $q_{\min} = -3$; $(R_{сж})_{\max} = 3$. Использование условий Куна – Таккера оказалось эффективным и в ряде других случаев, связанных с синтезом композиционных материалов со специальными свойствами, а также с задачами управления в эргатических системах [9…11].

Выводы

Предлагаются методы решения некоторых математических задач системного анализа, связанных непосредственно с разработкой композиционных материалов как сложных систем: моделирование кинетических процессов формирования физико-механических характеристик; объективизация оценки качества с использованием сплайнов; оптимизация структуры и свойств по дифференциальным моделям материалов, нелинейный синтез. Указываются примеры практических реализаций.

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. Данилов, А.М. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем: монография / А.М. Данилов, И.А. Гарькина. – Пенза: ПГУАС. – 2014. – 168 с.

3. Бормотов, А.Н. Декомпозиция систем и иерархические структуры показателей качества композитов / А.Н. Бормотов // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 9-2. – С. 196–203.

4. 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.

5. Данилов, А.М. Математическое моделирование сложных систем: состояние, перспективы, пример реализации / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 2 (31). – С. 333–337.

6. Селяев, В.П. Нелинейные модели деградации полимерных композитов, работающих в агрессивных средах / В.П. Селяев, С.Ю. Грязнов, Д.Р. Бабушкина // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 2 (47). – С. 5–15.

7. Бормотов, А.Н. Оптимизация структуры эпоксидных композитов повышенной плотности / А.Н. Бормотов, А.П. Прошин // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – 1999. – № 3. – С. 123.

8. 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.

9. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // Academia. Архитектура и строительство. – 2020. – № 3. – С. 143–159.

10. Чернышов, Е.М. Проблема комплексности и системности качественного описания и статистической достоверности количественной оценки характеристик структуры строительных композитов / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // Эксперт: теория и практика. – 2022. – № 2 (17). – С. 75–80.

11. 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.

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. Danilov, A.M. Interpolation, approximation, optimization: analysis and synthesis of complex systems: monograph / A.M. Danilov, I.A. Garkina. – Penza: PGUAS. – 2014. – 168 p.

3. Bormotov, A.N. Decomposition of systems and hierarchical structures of quality indicators of composites / A.N. Bormotov // Modern science-intensive technologies. – 2016. – №9-2. – P. 196–203.

4. 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.

5. Danilov, A.M. Mathematical modeling of complex systems: state, prospects, implementation example / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Bulletin of civil engineers. – 2012. – №2 (31). – P. 333–337.

6. Selyaev, V.P. Nonlinear degradation models for polymer composites operating in aggressive environments / V.P. Selyaev, S.Yu. Gryaznov, D.R. Babushkina // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 2 (47). – P. 5–15.

7. Bormotov, A.N. Optimization of the structure of high-density epoxy composites / A.N. Bormotov, A.P. Proshin // Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences. – 1999. – № 3. – P. 123.

8. 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.

9. Korolev, E.V. Prospects for the development of building materials science / E.V. Korolev // Academia. Architecture and construction. – 2020. – №3. – P. 143–159.

10. Chernyshov, E.M. The problem of the complexity and consistency of the qualitative description and statistical reliability of the quantitative assessment of the characteristics of the structure of building composites / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev // Expert: theory and practice. – 2022. – № 2 (17). – P. 75–80.

11. 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.

УДК 662.613.1 DOI 10.54734/20722958_2023_2_44

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46

Бодяков Александр Николаевич, старший преподаватель кафедры «Автомобильные и железные дороги»
E-mail: savaa72@mail.ru

Маркова Ирина Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технологии материалов»
E-mail: irishka-31.90@mail.ru

Логвиненко Анжелика Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные и железные дороги»
E-mail a.loqvinenko@mail.ru

Боцман Лариса Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технологии материалов»
E-mail: lora80@list.r

Огурцова Юлия Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технологии материалов»
E-mail: ogurtsova.y@ya.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St.

Bodyakov Aleksander Nikolaevich, Senior lecturer of the Department «Roads and Railways»
E-mail: savaa72@mail.ru

Markova Irina Yurievna, Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Materials Science and Technology of Materials»
E-mail: irishka-31.90@mail.ru

Logvinenko Angelika Aleksandrovna, Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Roads and Railways»
E-mail: a.loqvinenko@mail.ru

Botsman Larisa Nikolaevna, Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Materials Science and Technology of Materials»
E-mail: lora80@list.r

Ogurtsova Yulia Nikolaevna, Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department» Materials Science and Technology of Materials»
E-mail: ogurtsova.y@ya.ru

СВОЙСТВА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА, СТАБИЛИЗИРОВАННОГО В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ*

А.Н. Бодяков, И.Ю. Маркова, А.А. Логвиненко, Л.Н. Боцман, Ю.Н. Огурцова

Проблема стабилизации распадающегося металлургического шлака является весьма актуальной в связи с ограниченными возможностями его вторичного использования, например в качестве замены традиционного минерального сырья. Строительная отрасль, в частности дорожное строительство, является крупнейшим потребителем каменных материалов. Рассмотрен способ стабилизации распадающегося шлака гранулированной пылью газоочистных установок в условиях сталеплавильного цеха ОЭМК. Анализ влияния стабилизации на состав, физико-механические свойства и структурные особенности металлургического шлака показал, что применение технологии стабилизации позволило улучшить свойства шлака и расширить области его применения.

Ключевые слова: сталеплавильный шлак, стабилизированный шлак, пыль газоочистных установок, каменный материал, дорожное строительство

* Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет-2030» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

PROPERTIES OF METALLURGICAL SLAG STABILIZED IN INDUSTRIAL CONDITIONS

A.N. Bodyakov, I.Y. Markova, A.A. Logvinenko, L.N. Botsman, Yu.N. Ogurtsova

The problem of stabilization of decaying metallurgical slag is very urgent due to the limited possibilities of its secondary use, for example, as a replacement of traditional mineral raw materials. Construction industry, in particular road construction, is the largest consumer of stone materials. The paper considers a method of stabilizing decaying slag with granular dust of gas cleaning plants in the conditions of a steelmaking OEMK plant. Analysis of the stabilization effect on the composition, physico-mechanical properties and structural features showed that the use of stabilization technology allowed to improve the properties of slag and expand its application areas.

Keywords: steelmaking slag, stabilized slag, dust of gas plants in steelmaking plants, stone material, road construction

Введение. В настоящее время в стране имеются достаточные объемы законченных научных исследований, экспериментального и опытного строительства, позволяющие развернуть строительство и ремонт дорог с широким применением местных материалов и отходов промышленности.

На современном этапе в металлургической промышленности обострены проблемы увеличения отходов производства. Являясь одной из крупнейших в мире отраслей промышленности, сталеплавильная промышленность, как известно, оказывает значительное влияние на экологическую обстановку.

Потребность удовлетворения спроса на щебень привела к высокой нагрузке на сырьевую базу и производственные мощности регионов, в которых сосредоточены наиболее крупные запасы. Дефицит каменных строительных материалов для транспортного строительства показал, что необходимо исследовать возможности расширения областей применения на данный момент не используемых материалов или потребуется существенное расширение добычи щебня в стране.

Теоретический анализ. Перспективным направлением исследований является использование отходов металлургического производства. Наиболее распространенный вид таких отходов – шлаки металлургического производства. Шлак – это неметаллический побочный продукт, состоящий в основном из силикатов и оксидов, образующихся в процессе рафинирования расплавленной стали. В настоящий момент применяют два метода для производства стали: кислородно-конверторные установки и электродуговую печь (ДСП). С учетом этого существует необходимость в сокращении объема производимых отходов и сохранении невозобновляемых ресурсов. Таким образом, основная цель заключалась в оценке потенциала рециклинга сталеплавильного шлака ДСП, особенно для сталеплавильной промышленности.

Последние исследования показали, что выход первичного шлака на тонну стали составляет 12–15 %, а процент вторичного шлака – около 3 % [1]. Если не перерабатывать сталеплавильный шлак, то его необходимо утилизировать в отвалах. Таким образом, на отвалах происходит постоянное увеличение количества вывозимых отходов. Повторное использование сталеплавильного шлака можно рассматривать как способ ограничить количество сбрасываемых в отходы ресурсов, что, в свою очередь, позволит снизить потребление природных строительных материалов. По этим причинам в последнее время было проведено большое количество экспериментальных исследований по изучению возможности частичной или полной замены природных заполнителей сталеплавильным шлаком в качестве конструкционных материалов.

Несмотря на достаточное количество имеющихся схем переработки шлаковых отвалов, на сегодняшний день не решена проблема шлакопереработки особых, самораспадающихся шлаков черной металлургии. Самораспадающиеся шлаки ДСП не могут быть переработаны по реализованным в промышленности схемам, поскольку при затвердевании и охлаждении быстро превращаются в тонкодисперсный порошок.

Как правило, свойства образующегося стального шлака варьируются в зависимости от производителя, видов выпускаемой стали, а также условий охлаждения

шлака. Поэтому, прежде чем сталеплавильный шлак может быть переработан, необходимо изучить его свойства. К ним относятся: способ образования сталеплавильного шлака, его химический и фазовый состав, физико-механические характеристики.

Причиной распада металлургического шлака является полиморфное превращение двухкальциевого силиката (C_2S, белита), входящего в его состав. При комнатной температуре существует пять полиморфных форм C_2S [2]. Вследствие большой разницы в строении кристаллической решетки, переход β-C_2S в γ-C_2S сопровождается увеличением объема примерно на 12 %, что приводит к рассыпанию шлака.

Поэтому целью работы является исследование влияния добавки стабилизатора на структуру и свойства сталеплавильных шлаков в промышленных условиях. Это позволит внедрить новые технические решения в проблему переработки шлаковых расплавов, что даст возможность исключить вывоз металлургических шлаков в отвалы и обеспечит их крупнотоннажное использование в различных отраслях промышленности.

Методика. Химический состав используемых сырьевых и синтезированных материалов определяли на рентгенофлуоресцентном спектрометре серии ARL 9900 WorkStation со встроенной системой дифракции. Растровая электронная микроскопия (РЭМ) использовалась для изучения строения и структуры каменных материалов. Исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU. Определялись физико-механические свойства шлака по методикам ГОСТ 8269.0–97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний»: марка по прочности шлакового щебня (дробимость) по степени разрушения зерен в водонасыщенном состоянии при сжатии (раздавливании) в цилиндре; марка по истираемости по потере массы пробы щебня, возникающей при воздействии ударных нагрузок от шаров и истирающих усилий в полочном барабане; устойчивость структуры зерен шлакового щебня против распадов по потере массы пробы после выдерживания в дистиллированной воде в течение 30 суток и последующего трехкратного пропаривания; марка по морозостойкости шлака при попеременном замораживании и оттаивании в водонасыщенном состоянии. Оценка показателей с целью установления возможности использования в дорожном строительстве производилась в соответствии с ГОСТ 3344–83 «Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства. Технические условия».

Экспериментальная часть. Главной задачей эксперимента являлись лабораторные испытания и масштабирование эксперимента в условиях цеха.

Стабилизация шлака в лабораторных условиях осуществлялась по методике [3]. В результате достижения воспроизводимости эксперимента вводился стабилизатор. В качестве стабилизатора использовалась гранулированная пыль газоочистных установок ДСП от 2–5 % по [4]. Гранулы размером 2–5 мм являются оптимальными для введения в шлаковый расплав по [5], обеспечивая наибольшее усвоение и равномерное распределение по всему объему стабилизатора. Наличие в составе гранулированной пыли ДСП оксидов кальция, калия, натрия, марганца способствует равномерному распределению оксида железа в объеме обрабатываемого шлака. Смешиваясь со шлаковым расплавом, частицы гранулированной пыли ДСП нагреваются. Температура плавления гранулированной пыли ДСП составляет 1250–1270 ^{o}C, при этом температура шлака во время слива составляет 1400–1420 ^{o}C, благодаря этому происходит полное расплавление и распределение стабилизатора в шлаковом объеме. С учетом экспериментального подтверждения в лабораторных условиях стабилизации шлака производилась апробация технологии стабилизации в условиях цеха.

Промышленная апробация изложенного способа стабилизации проводилась при выплавке стали (рис. 1) в электросталеплавильном цехе ОЭМК. Присадка стабилизатора осуществлялась в шлаковой чаше (в 3 этапа) в количестве 2 % от массы шлака во время слива в полиэтиленовых мешках массой 30 кг (рис. 1а). Первое введение стабилизатора выполнялось после заполнения расплавом 1/3 объема шлаковой чаши, что значительно уменьшало количество включений металла, находящегося на дне чаши, в структуру шлака (в процессе его стабилизации). При этом снижение темпе-

ратуры шлакового расплава в этот временной отрезок его слива, обусловленное разогревом стенок шлаковой чаши, и определило минимально требуемую концентрацию вводимого стабилизатора. Введение стабилизатора во второй временной период слива обеспечило полную стабилизацию шлака в объеме слива. Слив из шлаковой чаши (рис. 1б) с этой плавки кантовался на специальной площадке (рис. 1в). После остывания шлака произведен его визуальный осмотр (рис. 1г). После охлаждения шлаковая смесь была пропущена через дробильно-сортировочный комплекс (рис. 1д). Кусковой стабилизированный шлак (рис. 1е) был испытан по стандартным методикам.

Рис. 1. Промышленная апробация технологии стабилизации в условиях цеха:
а – введение стабилизатора в шлаковый ковш во время слива; б – слив стабилизированного шлака в шлаковую траншею; в – охлаждение стабилизированного шлака в шлаковой траншее;. г – стабилизированный шлак после охлаждения; д – дробильно-сортировочная установка; е – стабилизированный шлак после магнитной сепарации и сортировки

Результаты. После прохождения стабилизированного шлака, полученного в промышленных условиях, через дробильно-сортировочную установку и магнитную сепарацию было установлено, что застабилизировалось в монолитный (кусковой) шлак с размером фракции больше 20 мм – 58,69 %. Химический состав шлака до стабилизации и после представлен в табл. 1.

Таблица 1

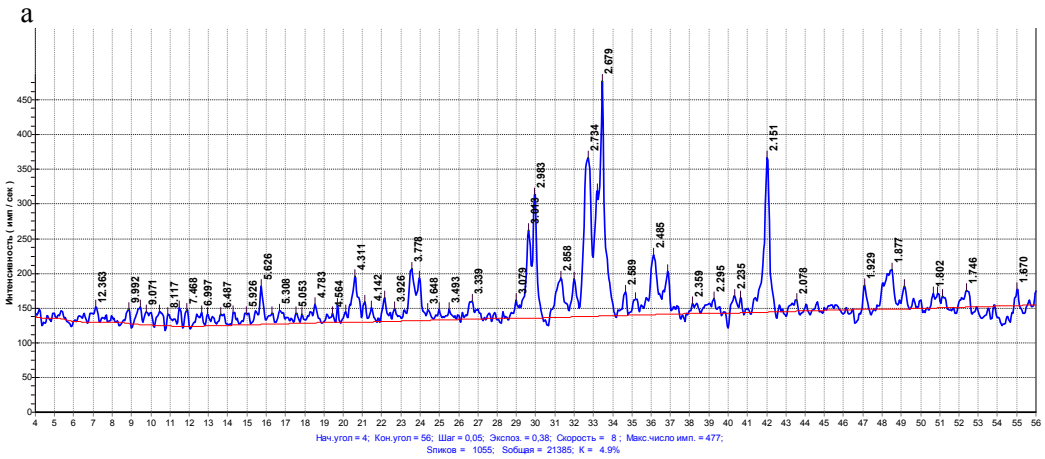
Химический состав представительных проб

Наименование	Содержание оксидов, %												
	CaO	SiO_2	Fe_2O_3	MgO	Al_2O_3	MnO	Cr_2O_3	P_2O_5	TiO_2	SO_3	SrO	K_2O	Na_2O
Отвальный шлак ОЭМК	40,49	28,66	17,15	7,71	3,73	1,10	0,32	0,20	0,12	0,12	0,08	0,07	0,06
Стабилизированный шлак	37.59	29.80	18.09	10.52	2.23	0.78	0.22	0.08	0,14	0,05	0,08	0,08	0,22

При этом существуют некоторые различия между стабилизированным и отвальным шлаком, это связано с изменением фазового состава в ходе перекристаллизации шлака путем введения стабилизатора.

По данным рентгенофазового анализа (рис. 2), в составе шлаков ОЭМК основной фазой до стабилизации является γ-$2CaO{\cdot}SiO_2$ (d (A) = 1,637; 1,800; 1,91; 2,745; 3,01; 3,834; 4,311), присутствуют: MgO (d (A) = 2,43: 2,108; 1,49), $Ca(OH)_2$ (d (A) = 2,68; 1,933; 1,704; 1,482; 1,450), $3CaO{\cdot}Al_2O_3$ (d (A) = 4,004; 2,78; 1,910; 1,566), $MgO{\cdot}Al_2O_3$ (d(A) = 2,02, 2,46), геленит $2CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}SiO_2$ (d (A) = 3,71; 3,06; 2,85; 2,436). Одной из важнейших отличительных особенностей шлаков ОЭМК является значительное содержание железосодержащих фаз – $CaO{\cdot}Fe_2O_3$ (d(A) = 2,69; 2,67; 2,238; 1,838; 1,832), $CaO{\cdot}2FeO$ (d(A) =2,585; 2,233; 1,59), вюстита FeO (d (A) = 2,468; 2,141; 1,492), Fe_2O_3 (d (A) = 2,536; 1,626; 1,484). В ряде проб шлаков присутствуют кальциймагниевые силикаты типа мервинита (d(A) = 2,84; 2.68: 2,41: 2,30; 2,20; 2,16; 1,88; 1,53).

а



б

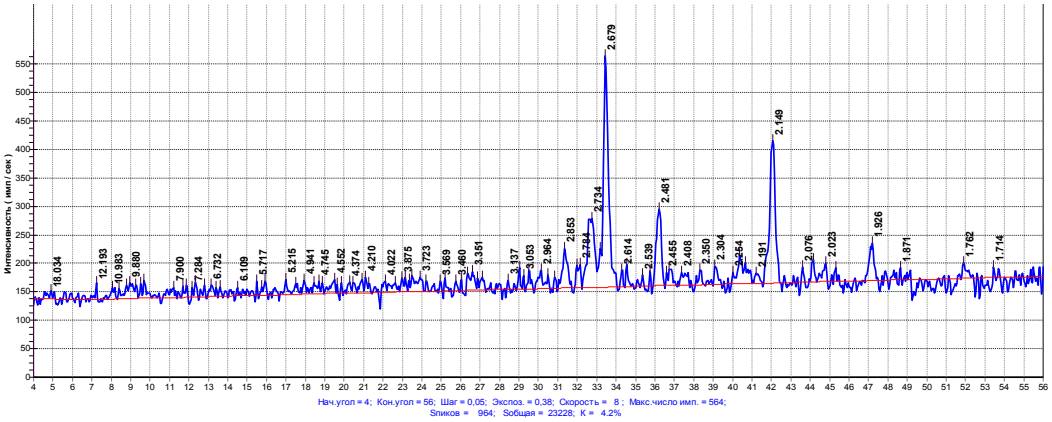


Рис. 2. Рентгенограмма электросталеплавильного шлака:
а – отвальный шлак, полученный по водной технологии охлаждения; б – шлак стабилизированный

По результатам испытаний видно, что при полной стабилизации γ-$2CaO{\cdot}SiO_2$ исчезает за счет преобразования части $2CaO{\cdot}SiO_2$ в $2CaO{\cdot}Fe_2O_3{\cdot}SiO_2$ по схеме $2CaO{\cdot}SiO_2 + Fe_2O_3 \rightarrow 2CaO{\cdot}Fe_2O_3{\cdot}SiO_2$.

Оставшийся C_2S стабилизируется в виде β-C_2S, при этом общее количество $2CaO{\cdot}SiO_2$ снижается с 100,0 до 55,0 масс. %, при этом оставшаяся часть $2CaO{\cdot}SiO_2$ полностью состоит из β-$2CaO{\cdot}SiO_2$, а содержание $2CaO{\cdot}Fe_2O_3{\cdot}SiO_2$ повышается.

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что при стабилизации синтезированного $2CaO{\cdot}SiO_2$ с помощью добавки на основе отходов металлургического производства работают сразу два механизма стабилизации: необратная стабилизация высокотемпературной модификации C_2S ионами щелочных металлов; химическая стабилизация за счет преобразования $2CaO{\cdot}SiO2$ в более стабильные фазы, в данном случае в $2CaO{\cdot}Fe_2O_3{\cdot}SiO_2$.

Анализ структурных особенностей шлака до стабилизации (рис. 3) и после показал следующее (рис. 4).

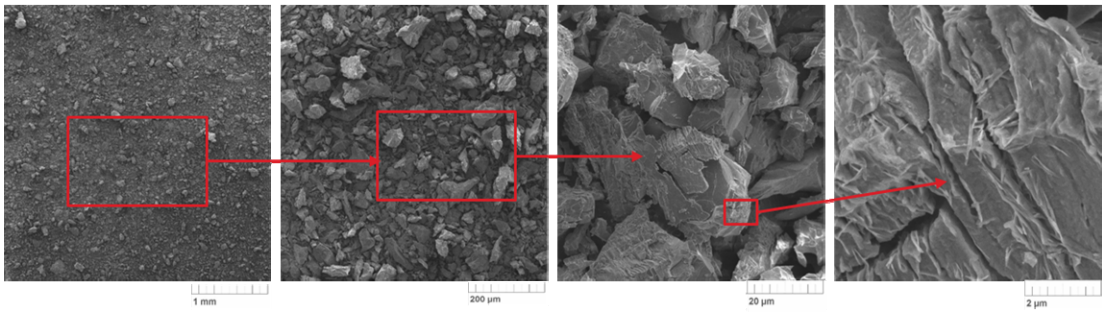


Рис. 3. Микрофотографии исходного шлака после распада

В исходном состоянии кристаллическая структура шлака имеет неоднородное, зональное строение, обусловленное закономерным распределением примесей и включений (см. рис. 3). Отдельные поликристаллы монтичеллита в виде зерен растут свободно до соприкосновения друг с другом. Толщина этих кристаллов не превышает 400 нм. Магнезиоферрит представлен изометричными округлыми кристаллами, образующими плотные агрегаты. На микрофотографии шлака четко фиксируются кристаллы мервинита, имеющие округлую форму, кристаллы ларнита похожи на кристаллы мервинита.

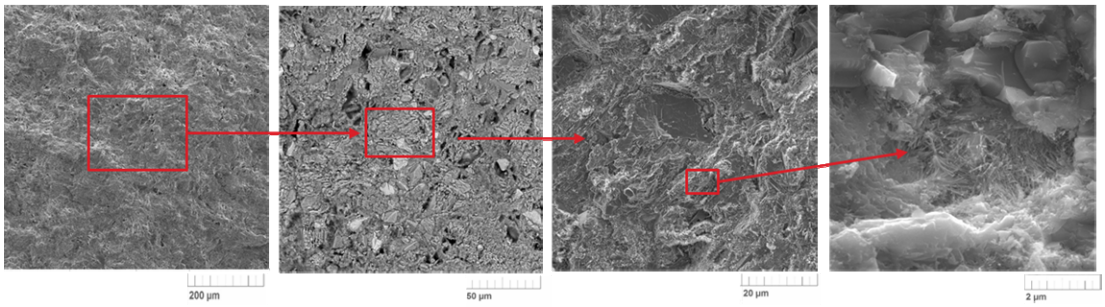


Рис. 4. Микрофотографии шлака после стабилизации

В микроструктуре стабилизированных образцов отчетливо видны две фазы: кремнийсодержащие кристаллы белита (матрица) с включениями ферритов кальция ($2CaO{\cdot}Fe_2O_3$). Ферриты кальция формируют трехмерную сетку в матрице, равномерно распределяясь по всему объему образца.

Стабилизированный шлак не обладает активностью; поэтому полученные высокие прочностные и деформативные характеристики обеспечиваются сразу после стабилизации и не меняются с течением времени (в отличие от отвального шлака).

Анализ физико-механических характеристик в соответствии с нормативной документацией показал, что между отвальным и стабилизированным шлаком имеются

существенные различия (см. табл. 1). Физико-механические свойства шлакового щебня, не подверженного стабилизации, не соответствуют минимально допустимым значениям, такой материал может применяться в дорожном строительстве с большими ограничениями.

Стабилизированный шлак соответствует марке по прочности в водонасыщенном состоянии М1200, марке по истираемости в полочном барабане И2, марке по морозостойкости F50 и устойчивости структуры УС1 (табл. 2), что позволяет существенно расширить области его применения.

Таблица 2

Физико-механические характеристики шлака до стабилизации (отвальный шлак) и после

Наименование показателей по ГОСТ 3344-83	Отвальный шлак	Стабилизированный шлак
Марка по прочности	300-800	1200
Марка по истираемости в полочном барабане	И4	И2
Марка по морозостойкости	Не соответствует требованиям для F5	F50
Насыпная плотность, кг/м^3	1,32-1,44	1,38
Суммарная удельная эффективная активность естественных радионуклидов $А_{эфф}$	146	173
Водонасыщение, %	13	4,95
Устойчивость структуры	УС2	УС1
Активность	А	НА

Выводы. Исследования показали, что поэтапное равномерное распределение стабилизатора в объеме обрабатываемого жидкого шлака ДСП обеспечивает стабилизацию высокотемпературных форм двухкальциевого силиката (исключая силикатный распад) в процессе и после его охлаждения. Введение 2 % стабилизатора в шлаковый расплав позволяет получить 58,69 % стабилизированной фракции шлака более 20 мм от общей массы. В оставшихся 41,31 % происходит неполная стабилизация компонентов расплава, что приводит к частичному распаду шлака при остывании и снижению его физико-механических свойств.

Полученный каменный материал, стабилизированный шлак, имеет марки по прочности М1200, по морозостойкости F50, по истираемости И2, т.е. по своим прочностным характеристикам он превышает отвальный шлак и классифицируется как шлаковый щебень, пригодный для строительства и реконструкции автомобильных дорог в качестве оснований и покрытий.

В результате стабилизации шлакового расплава обеспечивается исключение образования тонкодисперсной пыли γ-распада двухкальциевого силиката, что приводит к снижению негативного воздействия продуктов распада на окружающую среду. Значительно снижается активность стабилизированного шлака, что обеспечивает высокие прочностные и деформативные характеристики (М1200, F50, И2) сразу после стабилизации. Полученные показатели не подвержены изменениям с течением времени (в отличие от отвального шлака).

Список литературы

1. Primavera, A. EAF slag treatment for inert materials' production / A. Primavera [etc.] // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2016. – Vol. 2. – P. 3–12.

2. Вопросы утилизации рафинировочных шлаков сталеплавильного производства: монография / О.Ю. Шешуков, М.А. Михеенков, И.В. Некрасов, Д.К. Егиазарьян, А.А. Метелкин, О.И. Шевченко; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВО «УрФУ

им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (фи- лиал) УрФУ, 2017. – 208 с.

3. Bodyakov, A.N. Stabilization of metallurgical slug from arc steel-making furnaces / A.N. Bodyakov, K.V. Meshkova, G.S. Dukhovny // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 945, №. 1. – P. 012082.

4. Состав и способ стабилизации распадающихся металлургических шлаков: пат. на изобретение RU 2 752 914 C1 / Духовный Г.С., Евтушенко Е.И., Рубанов Ю.К., Бодяков А.Н., Деев В.В., Бондаренко С.Н.; 11.08.2021. Заявка №2020125236 от 29.07.2020.

5. Bondarenko, S.N. Metallurgical Waste Recycling for Transport Construction / S.N. Bondarenko, A.N. Bodyakov, M.S. Lebedev // Proceedings of the International Conference Industrial and Civil Construction 2021. – Springer International Publishing, 2021. – P. 79–84.

References

1. Primavera, A. EAF slag treatment for inert materials' production / A. Primavera [etc.] // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2016. – Vol. 2. – P. 3–12.

2. Questions of utilization of refining slags of steelmaking production : monograph / O.Y. Sheshukov, M.A. Mikheenkov, I.V. Ne- krasov, D.K. Egiazaryan, A.A. Metelkin, O.I. Shevchenko; Ministry of Education and Science of the Russian Federation; FSAOU VO «UrFU named after the first President of Russia B.N. Yeltsinquestions», Nizhnetagil. technol. in-t (phil.). – Nizhny Tagil : NTI (financial) UrFU, 2017. – 208 p.

3. Bodyakov, A.N. Stabilization of metallurgical slug from arc steel-making furnaces / A.N. Bodyakov, K.V. Meshkova, G.S. Dukhovny // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 945, №. 1. – P. 012082.

4. Composition and method of stabilization of decaying metallurgical slags: Patent for the invention RU 2 752 914 C1 / Dukhovny G.S., Yevtushenko E.I., Rubanov Y.K., Bodyakov A.N., Deev V.V., Bondarenko S.N.; 08/11/2021. Application No. 2020125236 dated 29.07.2020.

5. Bondarenko, S.N. Metallurgical Waste Recycling for Transport Construction / S.N. Bondarenko, A.N. Bodyakov, M.S. Lebedev // Proceedings of the International Conference Industrial and Civil Construction 2021. – Springer International Publishing, 2021. – P. 79–84.

УДК 691-405 DOI 10.54734/20722958_2023_2_52

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

Светалкина Мария Анатольевна,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление качеством и технология строительного производства»
E-mail: adikaevka_01@mail.ru

Арискин Максим Васильевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

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

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

Svetalkina Maria Anatolievna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Quality Management and Technology of Construction Production»
E-mail: adikaevka_01@mail.ru

Ariskin Maksim Vasilievich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Building Structures»
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЛАКОКРАСОЧНОГО ПОКРЫТИЯ НА ЕГО СТОЙКОСТЬ К ОТСЛАИВАНИЮ И РАСТРЕСКИВАНИЮ

В.И. Логанина, М.А. Светалкина, М.В. Арискин

Дана оценка напряженно-деформированного состояния лакокрасочных покрытий цементных бетонов при воздействии температуры в зависимости от шероховатости поверхности покрытия. Приведены результаты расчета распределения напряжений по сечению покрытий и определена вероятность их растрескивания и отслаивания. Сделано сравнение значений напряжений в покрытии на гладкой и шероховатой поверхностях поливинилацетатцементного покрытия. Приведена эпюра распределения напряжений в ПВАЦ покрытии. Оценена вероятность отслаивания и растрескивания покрытия.

Ключевые слова: лакокрасочное покрытие, подложка, шероховатость поверхности, усадка, внутренние напряжения

THE INFLUENCE OF SURFACE ROUGHNESS OF A PAINT COATING ON ITS RESISTANCE TO PEELING AND CRACKING

V.I. Loganina, M.A. Svetalkina, M.V. Ariskin

Evaluation of the stress-strain state of coatings under the influence of temperature depending on the surface roughness of the coating is given. The results of calculation of stresses distribution over the cross section of the coatings and the possibility of their cracking and peeling are presented. A comparison of the stress values in the coating on a smooth and rough surface of a polyvinyl acetate cement coating is made. The plot of stress distribution in the PVAC coating is given. The probability of peeling and cracking of the coating is estimated.

Keywords: paint coating, substrate, surface roughness, shrinkage, internal stresses

Одним из распространенных видов материалов, применяемых для отделки фасадов зданий, являются лакокрасочные материалы и декоративные штукатурные смеси [1–4]. Отделочные покрытия фасадов зданий претерпевают значительное воздействие внешней среды, ослабляющее прочность и способное привести к нарушению его

сплошности [5, 6]. Исследованию процессов, развивающихся в системе «подложка – покрытие», посвящены многочисленные публикации [7, 8]. Внутренние напряжения, возникающие в покрытии вследствие воздействия внешней среды, резко ослабляют когезионную и адгезионную прочность покрытия, ускоряя тем самым деструктивные физико-химические процессы, вызывающие его преждевременное разрушение при эксплуатации [9–12]. Связь внутренних напряжений с микрорельефом поверхности покрытия рассмотрена в работах [13–17]. В работах [18, 19] приведены сведения о применении метода голографии для оценки напряженно-деформированного состояния лакокрасочных покрытий цементных бетонов. Авторами установлено, что в области поверхности покрытий, характеризующейся большей шероховатостью, наблюдаются концентрации напряжений. В области поверхности, характеризующейся низким значением шероховатости, наблюдается более равномерное распределение напряжений.

Представляет интерес изучение влияния морфологии поверхности покрытий на величину внутренних напряжений в покрытиях в процессе эксплуатации и определение вероятности растрескивания или отслаивания покрытий. Растрескивание покрытий происходит, когда внутренние растягивающие напряжения σ достигнут значения когезионной прочности R_{kog} материала покрытия, т.е.

$$\sigma > R_{kog} . \quad (1)$$

Отслаивания покрытий наблюдается при соблюдении соотношения

$$\tau > R_{сц} , \quad (2)$$

где τ – касательные напряжения; $R_{сц}$ – прочность сцепления.

В качестве подложек рассматривался тяжелый бетон, характеризующийся значением коэффициента линейного температурного расширения КЛТР, равным $10{,}0 \cdot 10^{-6}$ 1/град. В качестве красочного состава применяли поливинилацетатцементную ПВАЦ краску, значение коэффициента линейного температурного расширения КЛТР покрытия составляло $6{,}63 \cdot 10^{-6}$ 1/град. Толщина покрытия составляла 1 мм. Расчеты проводились для условий г. Москвы. Расчет был выполнен с помощью программного модуля SCAD Office. Расчетная модель представляет конечные элементы оболочки с размером 0,1×0,1 мм. Граничные условия для подложки не задавались. Для предотвращения влияния заделки на напряжённо-деформированное состояние (далее – НДС) в лакокрасочном слое и в области контакта с подложкой граничные условия располагались на расстоянии не менее чем 5 толщин лакокрасочного состава. Моделирование рельефа в подложке выполнялось путем ведения дополнительных элементов треугольной формы. Исследования проводились по нескольким схемам (рис. 1). Моделировалась равномерно распределенная шероховатость поверхности подложки, при этом высота пиков и впадин составляла 0,1 мм.

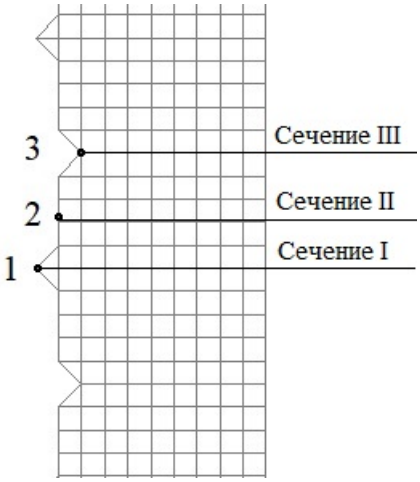


Рис. 1. Схема расчета напряженного состояния покрытия

Результаты исследований приведены на рис. 2–8.

Установлена неравномерность распределения напряжений по сечению покрытия в зависимости от шероховатости его поверхности. Так, в марте значения касательных напряжений в точке 1 (сечение I) составляют τ = –0,013 МПа, зоне контакта с подложкой τ = –0,125 МПа (рис. 2, а); в точке 3 (сечение III) τ = –0,01317 МПа, в зоне контакта τ = –0,223 МПа.

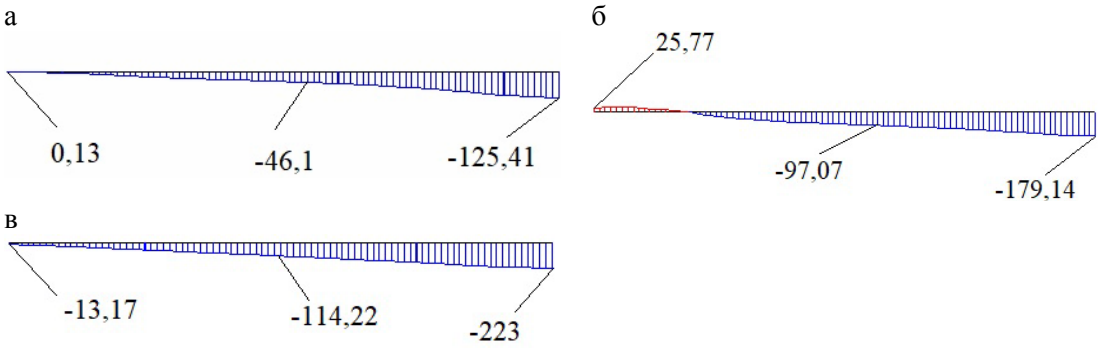


Рис. 2. Эпюра касательных напряжений по сечению ПВАЦ покрытия в марте (значения напряжений приведены в кН/м^2):
а – в точке 1; б – в точке 2; в – в точке 3

В точке 2 (сечение II) касательные напряжения составляют τ = 0,02577 МПа (рис. 2, б). В октябре значения касательных напряжений в точке 1 (сечение I) составляют τ = 0,009 МПа (рис. 3,а), а в точке 3 (сечение III) τ = 0,01276 МПа (рис. 3,в), что исключает возможность отслаивания покрытия, так как прочность сцепления ПВАЦ покрытия составляет 0,9–1,1 МПа.

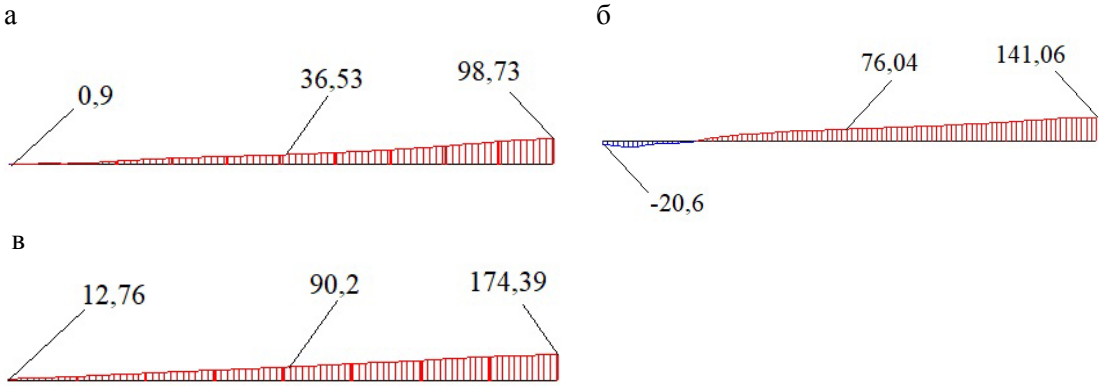


Рис. 3. Эпюра касательных напряжений по сечению ПВАЦ покрытия в октябре (значения напряжений приведены в кН/м^2):
а – в точке 1; б – в точке 2; в – в точке 3

Шероховатость поверхности покрытия в значительной степени сказывается на величине нормальных напряжений (рис. 4). Так, значения нормальных напряжений в зоне контакта покрытия с подложкой составляют в марте σ=(0,716–0,850) МПа в зависимости от характера шероховатости поверхности. Максимальные нормальные напряжения возникают в микровпадине (точка 3, сечение III) и составляют σ=0,750 МПа, что значительно превышает когезионную прочность ПВАЦ покрытия, равную 0,45 МПа.

Изополя распределение касательных (а, в) и нормальных (б, г) напряжений по сечению ПВАЦ покрытия приведены на рис. 6.

При ровной гладкой поверхности покрытия (отсутствии шероховатости поверхности) напряжения значительно меньше. Так, значения нормальных напряжений ровной поверхности в марте составляют σ=0,687 МПа (рис. 7,а), а шероховатой – σ=0,75 МПа.

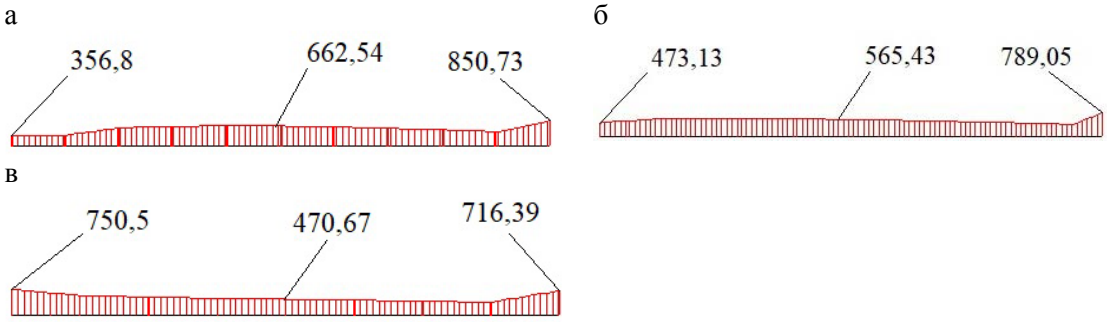


Рис. 4. Эпюра нормальных напряжений по сечению ПВАЦ покрытия в марте
(значения напряжений приведены в кН/м^2):
а – в точке 1; б – в точке 2; в – в точке 3

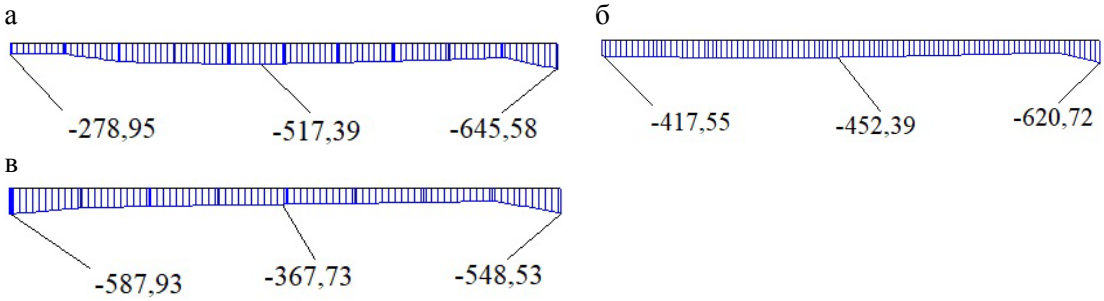


Рис. 5. Эпюра нормальных напряжений по сечению ПВАЦ покрытия в октябре
(значения напряжений приведены в кН/м^2):
а – в точке 1; б – в точке 2; в – в точке 3

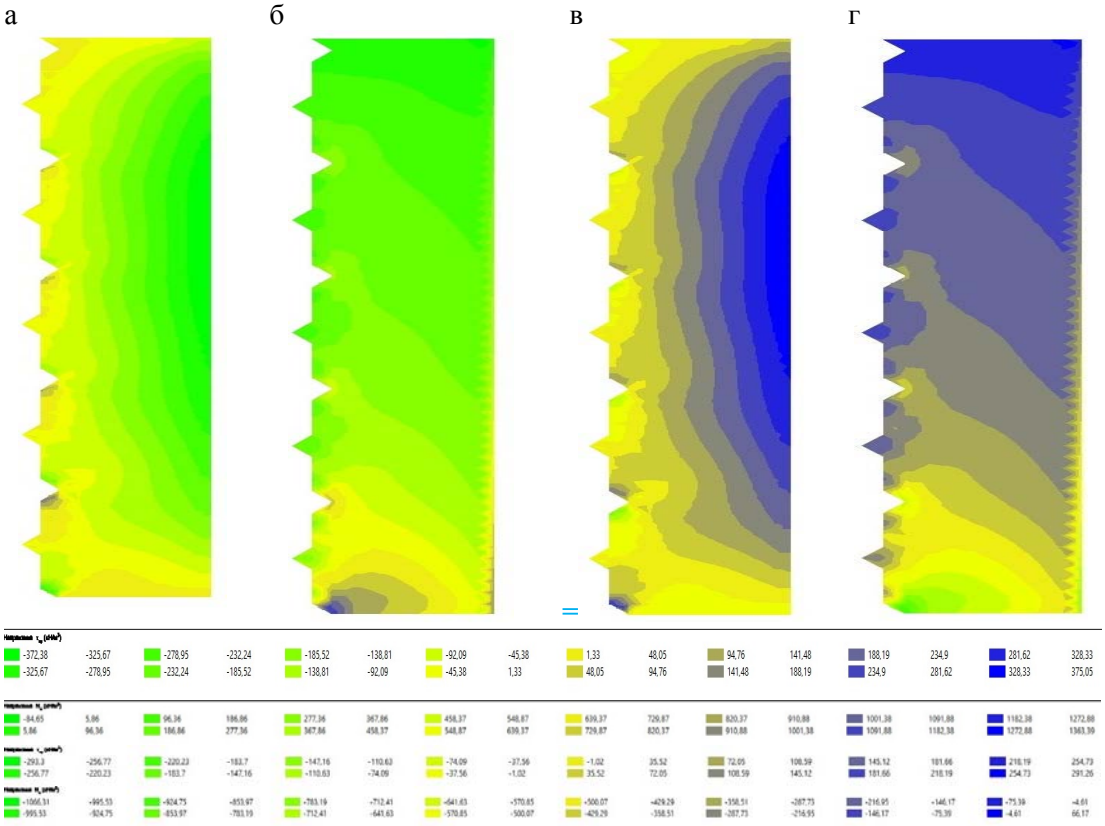


Рис. 6. Изополя распределения касательных (а, в) и нормальных (б, г) напряжений
по сечению поливинилацетатцементного покрытия:
а, б – март; в, г – октябрь

Изополя распределения касательных и нормальных напряжений по сечению поливинилацетатцементного покрытия (при отсутствии шероховатости поверхности покрытия) приведены на рис. 8.

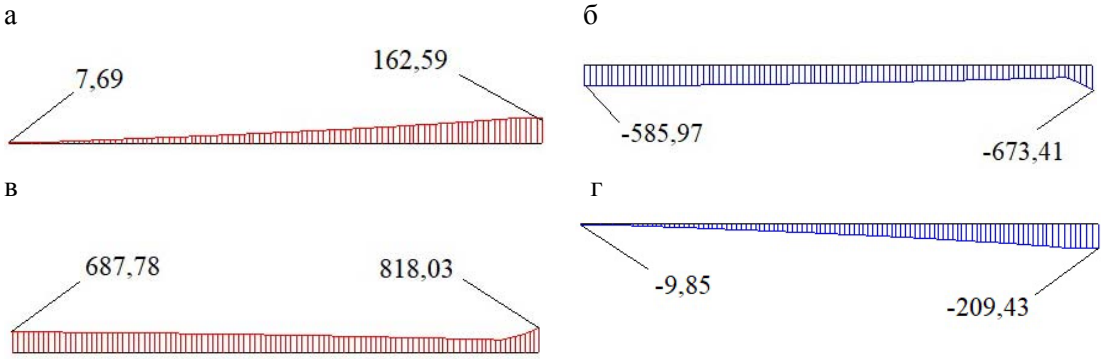


Рис.7. Эпюра напряжений по сечению ПВАЦ покрытия (ровная гладкая поверхность) (значения напряжений приведены в кН/м^2):
а, г – касательные напряжения; б, в – нормальные напряжения;
а, б – октябрь; в, г – март

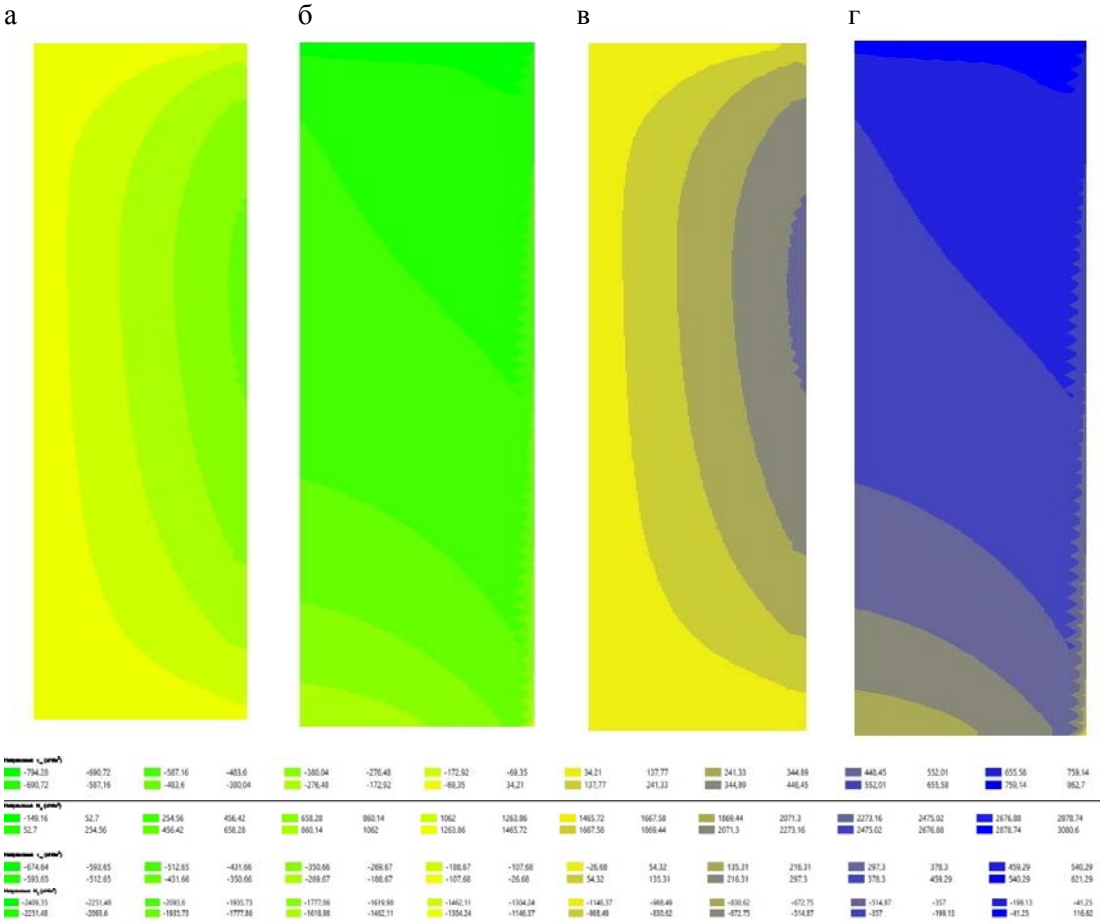


Рис. 8. Изополя распределения касательных (а, в) и нормальных (б, г) напряжений по сечению поливинилацетатцементного покрытия (при отсутствии шероховатости поверхности покрытия):
а, б – март; в, г – октябрь

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют, что ПВАЦ покрытие более склонно к растрескиванию, чем к отслаиванию. Следовательно,

в целях повышения стойкости ПВАЦ покрытий в процессе эксплуатации следует уделять внимание выбору способа нанесения краски и ее реологическим свойствам, способствующим получению покрытия с ровной гладкой поверхностью.

Список литературы

1. Завражин, Н.Н. Производство отделочных работ в строительстве. Зарубежный опыт / Н.Н. Завражин, Г.В. Северинова, Ю.Е. Громов. – М.: Стройиздат, 1987. – 310 с.

2. Loganina, V.I. Development of sol-silicate composition for decoration of building walls / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, Y.B. Mazhitov // Case Studies in Construction Materials. – 2018. – Vol. 9. – P.00173.

3. Логанина, В.И. Перспективы изготовления органо-минеральной добавки на основе отечественного сырья / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, В.Н. Горбунов, Т.Н. Дмитриева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 9 (609). – С. 36–39.

4. Ерофеев, В.Т. Влияние пластификаторов на изменение цветности ЛКМ под воздействием агрессивных сред / В.Т. Ерофеев, В.В. Афонин, М.М. Касимкина // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2011. – № 6. – С 38–41.

5. Логанина, В.И. Оценка декоративных свойств лакокрасочных покрытий / В.И. Логанина, В.А. Смирнов, С.Н. Кислицына, О.А. Захаров, В.Г. Христолюбов // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2004. – № 8. – С. 10–12.

6. Loganina, V.I. Maintenance of quality of paint and varnish coverings of building products and designs / V.I. Loganina //Contemporary Engineering Sciences. – 2014. – Vol. 7, № 33–36. – P. 1943–1947.

7. Шугуров, А.Р. Механизмы периодической деформации системы «пленка-подложка» под действием сжимающих напряжений / А.Р. Шугуров, А.В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 3. – С. 23–32.

8. Бартенев, Г.М. Прочность и разрушение высокоэластических материалов / Г.М. Бартенев, Ю.С. Зуев. – М., Ленинград: Химия, 1964. – 388 с.

9. Карякина, М.И. Физико-химические основы процессов формирования и старения покрытий / М.И. Карякина. – М.: Химия, 1980. – 216 с.

10. Сухарева, Л.А. Долговечность полимерных покрытий / Л.А. Сухарева. – М.: Химия, 1984. – 240 с.

11. Углов, А.А. Адгезионная способность пленок / А.А. Углов, Л.М. Анищенко, С.Е. Кузнецов. – М.: Радио и связь, 1987. – С. 28–32.

12. Панин, В.Е. Эффекты скейлинга в структурно-фазовой самоорганизации на интерфейсе «тонкая пленка – подложка» / В.Е. Панин, А.В. Панин, В.П. Сергеев, А.Р. Шугуров // Физическая мезомеханика – 2007. – Т. 10, №3. – С. 9–21.

13. Зиновьев, В.Е. Влияние микротрещин, скрытых дефектов и остаточных напряжений полимерного клеевого слоя на его разрушение / В.Е. Зиновьев, П.В. Харламов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12–1. – С. 37–42.

14. Зимон, А.Д. Адгезия пленок и покрытий / А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1977. – 352 с.

15. Loganina, V. Estimation of the Probability of Cracking of Facade Coatings / V. Loganina, R. Fediuk, D. Taranov and Y.H. Mugahed Amran // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1037. – P. 675–683.

16. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия: пер. с англ. / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.

17. Воронин, И.В. Долговечность полимерных связей / И.В. Воронин, Э.К. Кондрашов // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1991. – № 1.– С. 25–26.

18. Логанина, В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния лакокрасочного покрытия в зависимости от качества его внешнего вида / В.И. Логанина, И.В. Волков, В.В. Голубев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2008. – № 7 (595). – С. 26–30.

19. Волков, И.В. Применение голографии для оценки напряженно-деформированого состояния лакокрасочных покрытий цементных бетонов / И.В. Волков,

Л.П. Орентлихер, В.И. Логанина, В.В. Голубев, В.А. Монахов // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2007. – № 9. – С. 43–45.

References

1. Zavrazhin, N.N. Production of finishing works in construction. Foreign experience / N.N. Zavrazhin, G.V. Severinova, Yu.E. Gromov.– M.: Stroyizdat, 1987. – 310 p.

2. Loganina, V.I. Development of sol-silicate composition for decoration of building walls / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, Y.B. Mazhitov // Case Studies in Construction Materials. – 2018. – Vol. 9. – P.00173.

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

4. Erofeev, V.T. Influence of plasticizers on the change in the color of paintwork materials under the influence of aggressive media / V.T. Erofeev, V.V. Afonin, M.M. Kasimkina // Coating materials and their application. – 2011. – No. 6. – P. 38–41.

5. Loganina, V.I. Evaluation of the decorative properties of paint and varnish coatings / V.I. Loganina, V.A. Smirnov, S.N. Kislitsyna, O.A. Zakharov, V.G. Khristolyubov // Paint and varnish materials and their application. – 2004. – No. 8. – P. 10–12.

6. Loganina, V.I. Maintenance of quality of paint and varnish coverings of building products and designs / V.I. Loganina // Contemporary Engineering Sciences. – 2014. – Vol. 7, № 33–36. – P. 1943–1947.

7. Shugurov, A.R. Mechanisms of periodic deformation of the «film-substrate» system under the action of compressive stresses / A.R. Shugurov, A.V. Panin // Physical Mesomechanics. – 2009. – Vol. 12, No. 3. – P. 23–32.

8. Bartenev, G.M. Strength and fracture of highly elastic materials / G.M. Bartenev, Yu.S. Zuev. – M., Leningrad: Chemistry, 1964. – 388 p.

9. Karyakina, M.I. Physico-chemical foundations of the processes of formation and aging of coatings / M.I. Karyakina. – M.: Chemistry, 1980. – 216 p.

10. Sukhareva, L.A. Durability of polymer coatings / L.A. Sukhareva. – M.: Chemistry, 1984. – 240 p.

11. Uglov, A.A. Film adhesiveness / A.A. Uglov, L.M. Anishchenko, S.E. Kuznetsov. – M.: Radio and communication, 1987. – P. 28–32.

12. Panin, V.E. Scaling effects in structural-phase self-organization at the “thin film-substrate” interface / V.E. Panin, A.V. Panin, V.P. Sergeev, A.R. Shugurov // Physical Mesomechanics. – 2007. – Vol. 10, No. 3. – P. 9–21.

13. Zinoviev, V.E. Influence of microcracks, hidden defects and residual stresses of the polymer adhesive layer on its destruction / V.E. Zinoviev, P.V. Kharlamov // Fundam. Research. – 2015. – No. 12–1. – P. 37–42.

14. Zimon, A.D. Adhesion of films and coatings / A.D. Zimon. – M.: Chemistry, 1977. – 352 p.

15. Loganina, V. Estimation of the Probability of Cracking of Facade Coatings / V. Loganina, R. Fediuk, D. Taranov and Y.H. Mugahed Amran // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1037. – P. 675–683.

16. Johnson, K. Mechanics of contact interaction: per. from English / K. Johnson. – M.: Mir, 1989. – 510 p.

17. Voronin, I.V. Durability of polymer bonds / I.V. Voronin, E.K. Kondrashov // Paints and varnishes and their application. – 1991. – No. 1. – P. 25–26.

18. Loganina, V.I. Evaluation of the stress-strain state of the paint coating depending on the quality of its appearance / V.I. Loganina, I.V. Volkov, V.V. Golubev // News of higher educational institutions. Building. – 2008. – No. 7 (595). – P. 26–30.

19. Volkov, I.V. The use of holography to assess the stress-strain state of cement concrete paint coatings / I.V. Volkov, L.P. Orentlicher, V.I. Loganina, V.V. Golubev, V.A. Monakhov // Coating materials and their application. – 2007. – No. 9. – P. 43–45.

УДК 691.5 DOI 10.54734/20722958_2023_2_59

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

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

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТИ ОТСЛАИВАНИЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОРИСТОСТИ ПОДЛОЖКИ

В.И. Логанина

Приведены сведения о вероятности отслаивания в процессе эксплуатации отделочного покрытия в зависимости от пористости подложки. Рассмотрено соотношение адгезионной и когезионной прочности с учетом вариативности показателей. Проанализирована вероятность отслаивания покрытия в зависимости от пористости подложки.

Ключевые слова: отделочное покрытие, отслаивание, вероятность, пористость подложки

STATISTICAL ANALYSIS OF THE PROBABILITY OF PAINT COATINGS PEELING DEPENDING ON THE SUBSTRATE POROSITY

V.I. Loganina

Information on the probability of peeling during the operation of the finishing coating, depending on the porosity of the substrate is given. The ratio of adhesive and cohesive strength is considered, taking into account the variability of indicators. The probability of coating peeling is analyzed depending on the porosity of the substrate.

Keywords: finishing coating, peeling, probability, substrate porosity

Для декоративной отделки фасадов зданий широко используются лакокрасочные материалы и декоративные штукатурки [1–3]. Состояние декоративных и защитных свойств отделочных покрытий цементных бетонов в процессе эксплуатации зависит от интенсивности воздействия климатических факторов, рецептуры отделочного состава, толщины покрытия, пористости и шероховатости подложки и т.д. [4, 5]. В процессе эксплуатации отделочных покрытий наиболее частыми видами их разрушений являются отслаивание и растрескивание.

Проведем статистический анализ вероятности отслаивания отделочных покрытий в процессе воздействия климатических факторов в зависимости от пористости цементной подложки.

Условие адгезионного разрушения имеет вид [6]

$$R_а < R_к, \quad (1)$$

где $R_а$ – адгезионная прочность; $R_к$ – когезионная прочность.

Зависимость вероятности отслаивания $P_а$ от значения когезионной прочности $R_к$ имеет вид

$$P_а(R_к) = \int_{-\infty}^{R_к} f(R_а)dR_а \,. \qquad (2)$$

Адгезионная прочность $R_а$ является функцией пористости подложки и времени эксплуатации покрытия:

$$R_а = f(\Pi, t)\,, \qquad (3)$$

где П – пористость подложки; t – время эксплуатации.

Зависимость когезионной прочности отделочного покрытия от пористости проявляется в меньшей степени; принимаем $R_к = f(t)$.

Значения $R_а$ и $R_к$ являются случайными, распределёнными по нормальному закону, и будут определяться математическими ожиданиями и среднеквадратическими отклонениями: $M_{R_а}(\Pi, t)$, $\sigma_{R_а}(\Pi, t)$, $M_{R_к}(t)$, $\sigma_{R_к}(t)$.

Вероятность адгезионного разрушения покрытия будет определяться как значение функции распределения двумерной случайной величины $F(R_а, R_к)$, определяемое как

$$P(R_а < R_к) = \int_0^{\infty}\int_{R_а}^{\infty} f(R_к)\cdot f(R_а)dR_к dR_а \,, \qquad (4)$$

где

$$f(R_к) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{R_к}(t)}\cdot e^{-\frac{1}{2}\frac{(R_к - M_{R_к}(t))^2}{\sigma^2_{R_к}(t)}}\,; \qquad (5)$$

$$f(R_а) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{R_а}(\Pi, t)}\cdot e^{-\frac{1}{2}\frac{(R_а - M_{R_а}(\Pi, t))^2}{\sigma^2_{R_а}(\Pi, t)}}\,. \qquad (6)$$

Здесь $M_{R_а}(\Pi, t)$ – математическое ожидание адгезионной прочности покрытия (зависит от пористости подложки и времени эксплуатации); $\sigma_{R_а}(\Pi, t)$ – среднеквадратическое отклонение адгезионной прочности покрытия; $M_{R_к}(t)$ – математическое ожидание когезионной прочности покрытия (зависит от времени эксплуатации); $\sigma_{R_к}(t)$ – среднеквадратическое отклонение когезионной прочности покрытия.

Таким образом, вероятность отслаивания $P(R_а<R_к)$ будет являться функцией, зависящей от временного показателя и пористости подложки.

В качестве красочного состава в работе применяли поливинилацетатцементную ПВАЦ краску, в качестве подложек – образцы цементно-песчаного раствора с различной пористостью. Адгезионную прочность определяли методом отрыва шайб в соответствии с ГОСТ 32299-2013 «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва», когезионную прочность – испытанием на осевое растяжение в соответствии с ГОСТ 18299-72* «Материалы лакокрасочные. Метод определения предела прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве и модуля упругости». Были рассчитаны значения среднеквадратического отклонения величин $R_к$ и $R_а$ в процессе циклического испытания.

Изменение адгезионной и когезионной прочности покрытия приведены на рис. 1, 2. Была рассчитана вероятность отслаивания поливинилацетатцементного покрытия (рис. 3).

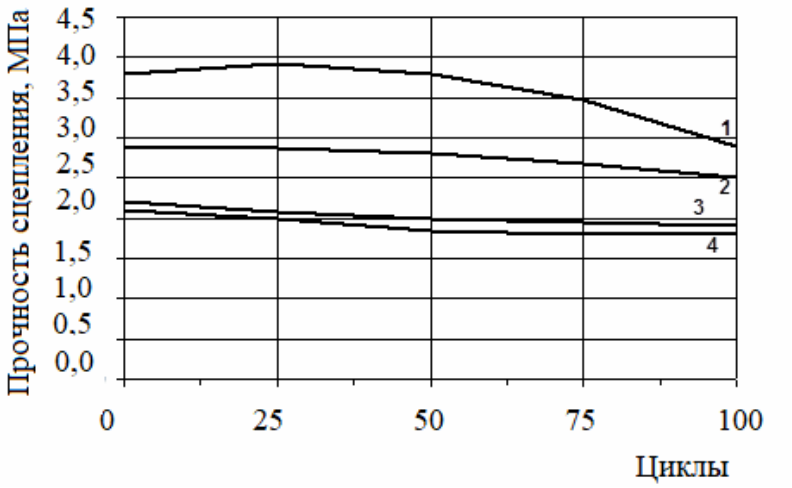


Рис. 1. Изменение прочности сцепления в процессе увлажнения-высушивания ПВАЦ покрытия на подложках с различной пористостью:
1 – пористость П=1,9 %; 2 – пористость П=2,7 %;
3 – пористость П=3,4 %; 4 – пористость П=5,9 %

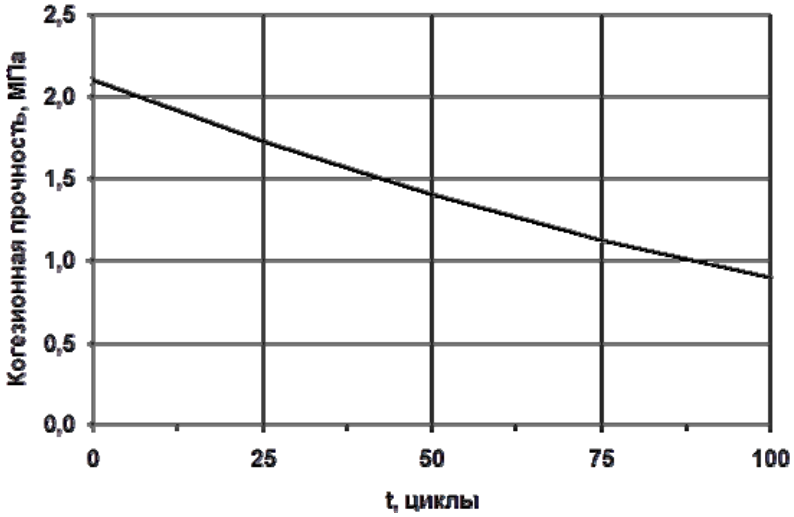


Рис. 2. Изменение когезионной прочности
в процессе увлажнения-высушивания ПВАЦ покрытия

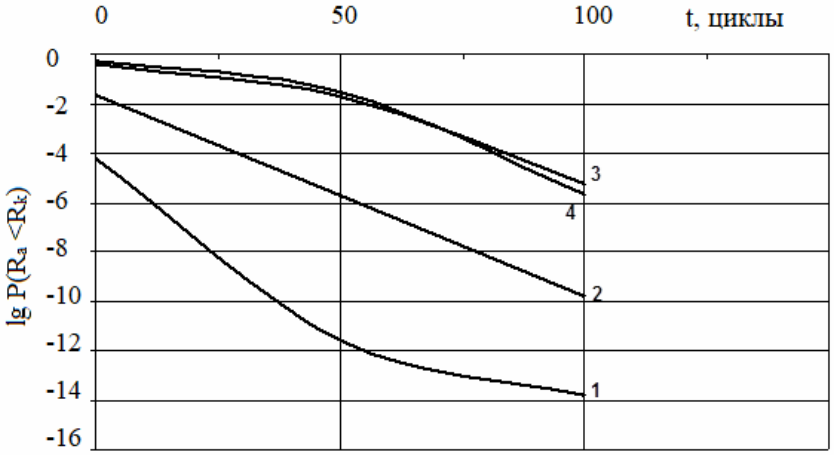


Рис. 3. Изменение вероятности адгезионного отказа
в зависимости от количества циклов увлажнения-высушивания:
1 – подложка с пористостью П=1,9 %; 2 – подложка с пористостью П=2,7 %;
3 – подложка с пористостью П=3,4 %; 4 – подложка с пористостью П=5,9 %

Полученные зависимости позволяют сделать следующие выводы. В начальный момент времени снижение пористости подложки с 3,4 % до 1,9 % ведёт к снижению вероятности адгезионного отказа, увеличение пористости с 3,4 % до 5,9 % величину вероятности практически не меняет.

Для покрытий на всех подложках наблюдается уменьшение вероятности адгезионного отказа при увеличении количества циклов, что говорит о более сильном влиянии увлажнения на снижение когезионной прочности покрытий. Процессы изменения прочностных характеристик покрытий на подложках с пористостью 3,4 % и 5,9 % можно считать идентичными, что позволяет выдвинуть гипотезу о существовании такого значения пористости подложки для ПВАЦ покрытий (например, 3,4 %), которое можно считать граничным, разделяющим области высокой и слабой чувствительности свойств к воздействию увлажнения. Из этого следует вывод о важности настройки технологического процесса подготовки поверхности перед окраской с целью последующего повышения стойкости покрытий в процессе эксплуатации [7].

Приведённая методика и пример могут быть использованы при разработке требований к защитным свойствам лакокрасочных покрытий для различных поверхностей и конкретных условий эксплуатации, а также для решения вопросов прогнозирования защитных свойств покрытий.

Список литературы

1. Логанина, В.И. Реологические свойства композиционного известкового вяжущего с применением синтетических цеолитов / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Л.В. Макарова, М.А. Садовникова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 4 (652). – С. 37–42.

2. Логанина, В.И. Разработка органоминеральной добавки для сухих строительных смесей / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, Э.Р. Акжигитова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 8–1.

3. Карякина, М.И. Физико-химические основы образования и старения покрытий / М.И. Карякина. – М.: Химия,1980. – 216 с.

4. Зубов, П.И. Структура и свойства полимерных покрытий / П.И. Зубов, Л.А. Сухарева.– М.: Химия, 1982. – 256 с.

5. Сухарева, Л.А. Прочность полимерных покрытий / Л.А.Сухарева.– М.: Химия, 1984. – 240 с.

6. Зимон, А.Д. Адгезия пленок и покрытий / А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1977. – 352 с.

7. 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.

References

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

2. Loganina, V.I. Development of an organomineral additive for dry building mixtures / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, E.R. Akzhigitova // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. – 2011. – No. 3. – P. 8–1.

3. Karyakina, M.I. Physical and chemical bases of formation and aging of coatings / M.I. Karyakina. – M.: Chemistry, 1980. – 216 p.

4. Zubov, P.I. Structure and properties of polymer coatings / P.I. Zubov, L.A. Sukharev. – M.: Chemistry, 1982. – 256 p.

5. Sukhareva, L.A. Strength of polymer coatings / L.A. Sukhareva. – M.: Chemistry, 1984. – 240 p.

6. Zimon, A.D. Adhesion of films and coatings / A.D. Zimon. – M.: Chemistry, 1977. – 352 p.

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

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 69.07, 69.04, 531.395 DOI 10.54734/20722958_2023_2_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

Шеин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Зайцев Михаил Борисович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Механика»

Чуманов Александр Васильевич,
старший преподаватель кафедры
«Механика»

Земцова Ольга Григорьевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Механика»

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

Shein Aleksandr Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Zaytsev Mihail Borisovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Mechanics»

Chumanov Aleksander Vasilyevich,
Senior Lecturer of the department «Mechanics»

Zemtsova Olga Grigorievna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Mechanics»

АКТИВНЫЕ ГАСИТЕЛИ КОЛЕБАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ, РАБОТАЮЩИЕ НА ПРИНЦИПЕ РЕАКТИВНОЙ СТРУИ*

А.И. Шеин, М.Б. Зайцев, А.В. Чуманов, О.Г. Земцова

Описывается управление динамикой колебательных движений с помощью активных гасителей, что позволяет существенно снижать уровень механических колебаний зданий и сооружений. Управляемый реактивный гаситель может рассматриваться как высокоэффективный способ гашения колебаний конструкций в условиях нестационарных (сейсмических) воздействий.

Показано, что процесс активизации реактивного гасителя осуществляется парой «перемещение – электропривод гасителя». Отслеживание перемещений выполняется специальными датчиками определения величин линейных и угловых перемещений.

Принцип работы реактивного гасителя состоит в создании знакопеременной реактивной силы, препятствующей относительным (изгибным) перемещениям (колебательным движениям) сооружения в нужные моменты времени.

Представлено несколько способов создания реактивной струи (реактивного силового воздействия на механическую систему): реактивная струя выбрасываемой под большим давлением жидкости; реактивная струя истечения под большим давлением

* Статья подготовлена при поддержке гранта РНФ № 23-29-00653 »Разработка способов гашения колебаний куполообразующих и прямоугольных каркасов зданий и сооружений».

газа; реактивная струя от сгорающего топлива. Приведены соотношения для подсчета этого воздействия.

Даны уравнения движения метода конечных элементов (МКЭ) узла сооружения с присоединенным реактивным гасителем при центрально-разностной аппроксимации производных и при использовании метода Ньюмарка.

Ключевые слова: активный гаситель, колебательное движение, сейсмическое воздействие, реактивный гаситель, аппроксимация производных, уравнения движения МКЭ

ACTIVE DAMPERS OF BUILDINGS AND STRUCTURES VIBRATION OPERATING ON THE PRINCIPLE OF A JET STREAM

A.I. Shein, M.B. Zaitsev, A.V. Chumanov, O.G. Zemtsova

The control of the dynamics of oscillatory movements with the help of active dampers is considered, which makes it possible to significantly reduce the level of mechanical vibrations of buildings and structures. A controlled reactive dampener can be considered as a highly effective method of damping vibrations of structures in conditions of non-stationary (seismic) impacts.

It is shown that the activation process of the reactive extinguisher is carried out by a pair of «displacement – electric drive of the extinguisher». Movement tracking is carried out using special sensors for determining the values of linear and angular movements.

The principle of operation of a reactive extinguisher is to create an alternating reactive force that prevents relative (bending) movements (oscillatory movements) of the structure at the right moments of time.

Several ways of creating a jet stream (reactive force action on a mechanical system) are shown and the relations for calculating this effect are given: a jet stream of liquid ejected under high pressure; a jet stream of gas flowing under high pressure; a jet from a burning fuel.

The equations of motion of the FEM of a construction node with an attached reactive extinguisher are given for the central difference approximation of derivatives and using the Newmark method.

Keywords: active dampener, oscillatory motion, seismic impact, reactive dampener, approximation of derivatives, equations of motion of the FEM

Для борьбы с развитием колебаний зданий и сооружений достаточно часто используют пассивные управляющие устройства – динамические, ударные или жидкостные (переливные) гасители колебаний [1…3]. Однако активное управление динамикой колебательных движений может существенно повысить эффективность работы гасителей. Реактивный гаситель может рассматриваться как высокоэффективный способ гашения колебаний конструкций в условиях нестационарных (сейсмических) воздействий. Принцип работы реактивного гасителя состоит в создании знакопеременной реактивной силы, препятствующей относительным (изгибным) перемещениям (колебательным движениям) сооружения в нужные моменты времени.

Рассмотрим задачу построения математической модели активного гашения колебаний сооружений при периодических нестационарных (сейсмических) воздействиях. Эта модель должна включать систему уравнений, описывающую напряженно-деформированное состояние сооружений, и систему эффективного управления их относительным движением.

Динамическая задача вынужденных колебаний механической системы основывается на дифференциальном уравнении движения МКЭ:

$$M\ddot{U} + KU = P \pm R,$$

где M – матрица масс; K – матрица жесткости упругой системы; U – вектор перемещений узлов системы; P – вектор внешних нагрузок; R – реактивная сила гасителя.

Будем полагать, что сейсмическое воздействие носит выраженный линейный или закручивающий характер, в связи с чем снижение размаха колебаний в данный момент времени обеспечивается знакопеременной реактивной силой. Основным управляющим воздействием будет реактивная сила газовой или жидкостной струи, вырывающейся из сопла гасителя под высоким давлением.

Рассмотрим несколько способов создания реактивной струи.

1. Реактивная струя выбрасываемой под большим давлением жидкости [6, 7].

Модуль силы, действующей на выбрасываемую жидкость, равен:

$$F = \rho A_0 v^2 , \tag{1}$$

где ρ – плотность жидкости, A_0 – площадь сечения сопла гасителя, v – скорость выбрасываемой жидкости.

При этом противоположная по направлению, но равная по модулю реактивная сила R_i будет действовать со стороны вытекающей жидкости на ёмкость и сооружение:

$$R_i = F . \tag{2}$$

В данном случае величину реактивной силы можно обеспечить скоростью выбрасывания струи

$$v = \left(\frac{2 p_{\text{н}}}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} , \tag{3}$$

которая, в свою очередь, определяется высоким давлением газа $p_н$ в баллоне с жидкостью.

2. Реактивная струя истечения под большим давлением газа.

Скорость истечения газа из сопла гасителя при условии ламинарного течения струи определяется соотношением Сен-Венана:

$$v = \left\{ \frac{2\chi}{\chi - 1} \frac{p_{\text{н}}}{\rho_{\text{н}}} \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_{\text{н}}} \right)^{\frac{\chi - 1}{\chi}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} , \tag{4}$$

где χ – показатель адиабаты, зависящий от природы газа (для воздуха он равен 1,42); $p_{\text{н}}$ – давление в рабочей емкости; p_0 – давление вне емкости; $\rho_{\text{н}}$ – плотность газа в емкости.

Значительную реактивную силу можно обеспечить большим давлением в рабочей емкости.

3. Реактивная струя от сгорающего топлива.

Реактивная сила от сгорающего топлива определяется соотношением

$$R = v_e \cdot \frac{dm}{dt} , \tag{5}$$

или

$$R = v_e \cdot \dot{m}. \tag{6}$$

Здесь v_e – скорость выбрасывания газовой струи, $\dot{m}$ – скорость расходования массы топлива.

Для узла сооружения с присоединенным реактивным гасителем уравнение движения МКЭ примет вид:

$$(M_i + m_i)\ddot{u}_i + \sum_{j=1}^{n} k_{ij} u_j = P_i \mp v_e \cdot \dot{m}_i , \tag{7}$$

где m_i – переменная масса реактивного гасителя.

При центрально-разностной аппроксимации производных в момент времени t конечно-разностный вид уравнения будет:

$$(M_i + m_{i,t})(u_{i,t-\Delta t} - 2u_{i,t} + u_{i,t+\Delta t})\frac{1}{(\Delta t)^2} + \sum_{j=1}^{n} k_{ij}u_{j,t} = P_{i,t} \mp v_e \cdot (m_{i,t} - m_{i,t-\Delta t})\frac{1}{\Delta t}. \quad (8)$$

Отсюда получим выражение для перемещения узла i в момент времени ($t + \Delta t$):

$$u_{i,t+\Delta t} = -u_{i,t-\Delta t} + 2u_{i,t} + (M_i + m_{i,t})^{-1}\left[(-\sum_{j=1}^{n} k_{ij}u_{j,t} + P_{i,t})(\Delta t)^2 \mp v_e \cdot (m_{i,t} - m_{i,t-\Delta t})(\Delta t)\right]. \quad (9)$$

При использовании метода Ньюмарка перемещение $U(t + \Delta t)$ определим из дифференциального уравнения движения, составленного для момента времени ($t + \Delta t$):

$$M\ddot{U}(t + \Delta t) + KU(t + \Delta t) = P(t + \Delta t), \quad (10)$$

где

$$M = \mathrm{diag}\left[M_1\ M_2 \ldots M_i + m_{i,t+\Delta t} \ldots M_n\right]; \quad (11)$$

$$P = \left[P_1\ P_2 \ldots P_i \mp v_e(m_{i,t+\Delta t} - m_{i,t}) \big/ (\Delta t) \ldots P_n\right]^T. \quad (12)$$

Получим следующие зависимости для кинематических параметров:

$$U(t + \Delta t) = \left[4M + K \cdot (\Delta t)^2\right]^{-1} \cdot \left\{M\left[4U(t) + 4\dot{U}(t) \cdot (\Delta t) + \ddot{U}(t) \cdot (\Delta t)^2\right] + \right.$$
$$\left. + P(t + \Delta t) \cdot (\Delta t)^2\right\} \quad (13)$$

$$\ddot{U}(t + \Delta t) = \frac{4U(t + \Delta t) - 4U(t) - 4\dot{U}(t) \cdot \Delta t}{(\Delta t)^2} - \ddot{U}(t). \quad (14)$$

$$\dot{U}(t + \Delta t) = \frac{2U(t + \Delta t) - 2U(t) - \dot{U}(t) \cdot \Delta t}{\Delta t}. \quad (15)$$

Примем скорость истечения газов из сопла гасителя постоянной:

$$v_e = \mathrm{const}, \quad (16)$$

а закон изменения массы горючей жидкости в виде одной из следующих убывающих функций:

$$m = m_0 e^{-\alpha t} \quad (17)$$

или

$$m = m_0(1 - \beta t). \quad (18)$$

При этом скорость изменения массы горючего будет выражаться соотношениями:

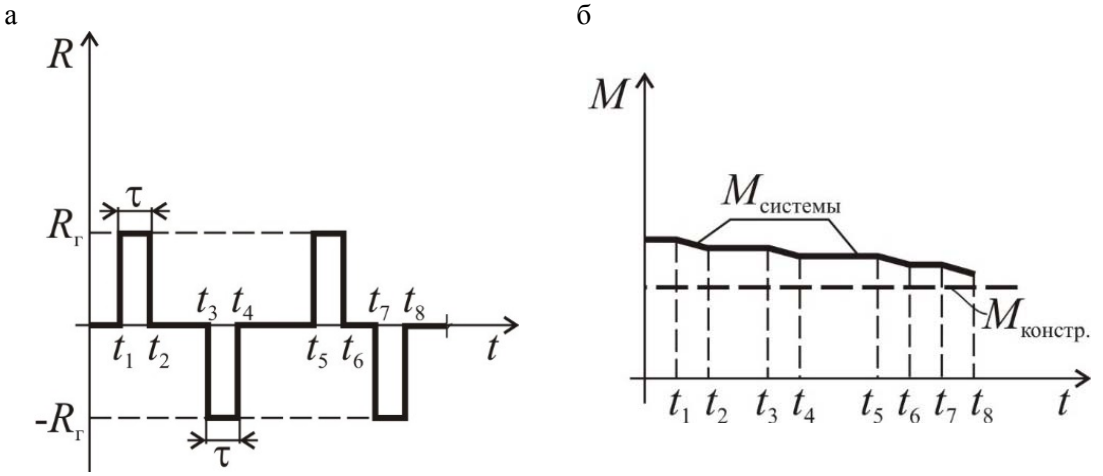
$$\dot{m} = -\alpha m_0 e^{-\alpha t} \quad (19)$$

или

$$\dot{m} = -\beta m_0. \quad (20)$$

Здесь α и β – коэффициенты размерностью c^{-1}.

На рисунке приведены схемы включения в работу реактивного гасителя (в зависимости от акселерограммы землетрясения) и изменения массы системы «конструкция – гаситель» во времени.



Схемы реактивных воздействий (а) и изменения массы системы (б)

При использовании реактивных гасителей необходима установка контроллеров включения – отключения реактивной струи. При этом время единоразового включения реактивной струи может состоять из срабатывания нескольких реактивных зарядов. В число управляемых параметров входят: скорость выбрасывания струи (она зависит от используемого топлива); масса единоразово сжигаемого горючего; время выбрасывания реактивной струи; величина предельно допустимого относительного отклонения точек защищаемой механической системы.

Процесс активизации реактивного гасителя предполагает срабатывание пары «перемещение – электропривод гасителя». Отслеживание перемещений осуществляется с помощью специальных датчиков определения величин линейных и угловых перемещений. Как только перемещение D контрольной точки превысит допустимое значение – электропривод подает сигнал на соответствующий реактивный гаситель. Гаситель включается в противодействие росту контролируемого относительного перемещения механической системы D.

Для устойчивой работы гасителя необходимо, чтобы точки наблюдения и управления были совмещены. Кроме того, требуется соблюдение условия быстрого включения гасителя для устранения фазового запаздывания реактивной силы по отношению к фазе колебаний.

Выводы:

1. Представлены способы генерации реактивной струи, и приведены зависимости для определения силового эквивалента этого воздействия.
2. Получены уравнения движения МКЭ узла сооружения с присоединенным реактивным гасителем при центрально-разностной аппроксимации производных и при использовании метода Ньюмарка.

Список литературы

1. Шеин, А.И. Гашение колебаний высотных сооружений. Ч. 1. Современное состояние проблемы / А.И. Шеин, С.В. Бакушев, М.Б. Зайцев, О.Г. Земцова. – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2011. – 234 с.
2. Шеин, А.И. Гашение колебаний высотных сооружений. Ч. 2. Математическое моделирование объектов с гасителями при ветровой нагрузке / А.И. Шеин, О.Г. Земцова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 131 с.
3. Шеин, А.И. Снижение уровня колебаний системы «упругое основание – высотное сооружение» с помощью нелинейного динамического гасителя / А.И. Шеин, О.Г. Земцова // Региональная архитектура и строительство. – 2011. — №2(11). – С. 83–91.

4. Уздин, А.М. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений / А.М. Уздин. – СПб.: Изд-во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1993. – 176 с.

5. Шеин, А.И. Выбор расчетной модели для динамических испытаний гасителей колебаний высотных сооружений / А.И. Шеин, Д.А. Романков // Сборник трудов международной конференции «Актуальные проблемы механики в современном строительстве». – Пенза, 2013. – С.185–194.

6. Шеин, А.И. Активный жидкостный гаситель колебаний высотных сооружений при сейсмических воздействиях / А.И. Шеин, О.Г. Земцова, Д.А. Шмелёв, Р.Х Рахматуллин // Сборник трудов международной конференции «Актуальные проблемы современного строительства». – Пенза, 2013. – С. 365–367.

7. Шеин, А.И. Оценка эффективности активного жидкостного гасителя колебаний высотных сооружений при нестационарных воздействиях / А.И. Шеин, Д.А. Шмелев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – №1.

8. Шеин, А.И. Сравнительная оценка работоспособности реактивного жидкостного гасителя колебаний при сейсмических колебаниях башен, заданных акселерограммами / А.И. Шеин, Д.А. Шмелев // Сборник трудов международной конференции «Актуальные проблемы механики в современном строительстве». – Пенза, 2013. – С.175–185.

9. Шеин, А.И. Метод смещенных разностей для решения дифференциальных уравнений движения механической системы / А.И. Шеин, М.Б. Зайцев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – №2. – С. 38–41.

References

1. Shein A.I. Damping of vibrations of high-rise structures. Part 1. The current state of the problem / A.I. Shein, S.V. Bakushev, M.B. Zaitsev, O.G. Zemtsova. – Penza: Publishing house of PGUAS, 2011. – 234 p.

2. Shein, A.I. Damping of vibrations of high-rise structures. Part 2. Mathematical modeling of objects with dampers under wind load / A.I. Shein, O.G. Zemtsova. – Penza: PGUAS, 2012. – 131 p.

3. Shein, A.I. Reduction of the vibration level of the «elastic base – high-rise structure» system using a nonlinear dynamic damper / A.I. Shein, O.G. Zemtsova // Regional architecture and construction. – 2011. – №2(11). – P. 83–91.

4. Uzdin, A.M. Fundamentals of the theory of seismic resistance and earthquake-resistant construction of buildings and structures / A.M. Uzdin. – St. Petersburg: VNIIG Publishing House named after B.E. Vedeneev, 1993. – 176 p.

5. Shein, A.I. The choice of a computational model for dynamic tests of vibration dampers of high-rise structures / A.I. Shein, D.A. Romankov // Proceedings of the international conference «Actual problems of mechanics in modern construction». – Penza, 2013. – P.185–194.

6. Shein, A.I. Active liquid vibration dampener of high-rise structures under seismic impacts / A.I. Shein, O.G. Zemtsova, D.A. Shmelev, R.H. Rakhmatullin // Proceedings of the international conference «Actual problems of modern construction». – Penza, 2013. – P. 365–367.

7. Shein, A.I. Evaluation of the effectiveness of an active liquid vibration dampener for high-rise structures under non-stationary impacts / A.I. Shein, D.A. Shmelev // Construction mechanics and calculation of structures. – 2014. – №1.

8. Shein, A.I. Comparative evaluation of the performance of a reactive liquid vibration dampener during seismic vibrations of towers set by accelerograms / A.I. Shein, D.A. Shmelev // Proceedings of the international conference «Actual problems of mechanics in modern construction». – Penza, 2013. – P.175–185.

9. Shein, A.I. The method of displaced differences for solving differential equations of motion of a mechanical system / A.I. Shein, M.B. Zaitsev // Construction mechanics and calculation of structures. – 2012. – No. 2. – P. 38–41.

УДК 699.841 DOI 10.54734/20722958_2023_2_69

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

Шеин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Чуманов Александр Васильевич,
старший преподаватель кафедры «Механика»

Земцова Ольга Григорьевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Механика»

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

Shein Aleksandr Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Chumanov Aleksander Vasilyevich,
Senior Lecturer of the department «Mechanics»

Zemtsova Olga Grigorievna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Mechanics»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛЕНТОЧНО-ТРОСОВОГО ГАСИТЕЛЯ С ТОРСИОНОМ ИЛИ ГИДРОЦИЛИНДРОМ ОДНОСТОРОННЕГО ДЕЙСТВИЯ*

А.И. Шеин, А.В. Чуманов, О.Г. Земцова

Предлагается новое устройство гашения колебаний – ленточно-тросовая система с гидроцилиндром одностороннего действия или торсионом. Устройство относится к гасителям колебаний и может быть применено на куполах, прямоугольных каркасах, локаторах и других объектах строительства, испытывающих динамические нагрузки от сейсмических воздействий. Описываются способы определения модулей внешних силовых воздействий через ленточно-тросовую систему на защищаемые узлы с целью подбора параметров гасителей, генерации внутренних сил противодействия колебательным движениям для гасителя с торсионом и гасителя с гидроцилиндром одностороннего действия. Аналитические выкладки приводят к формулам, позволяющим определить эффективное значение крутильной жесткости торсиона и жесткости пружины гидроцилиндра или коэффициента сопротивления движению жидкости гидроцилиндра.

Ключевые слова: сейсмическая защита, гаситель колебаний, ленточно-тросовая система, параметры, гидроцилиндр одностороннего действия, жесткость торсиона, купольные сооружения

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF A BELT-ROPE DAMPER WITH A TORSION BAR OR A SINGLE-ACTING HYDRAULIC CYLINDER

A.I. Shein, A.V. Chumanov, O.G. Zemtsova

A new vibration damping device is proposed – a belt-rope system with a single-acting hydraulic cylinder or a torsion bar. The device belongs to vibration dampers and can be used on domes, rectangular frames, locators and other construction objects experiencing the effect of dynamic loads from seismic impacts. The methods of determining the modules of external force influences through a belt-cable system on the protected nodes are described in order to select the parameters of the dampers, to create internal forces to counteract oscillatory movements for a torsion extinguisher and a one-way hydraulic cylinder damper. Analytical calculations lead to formulas that allow us to determine the effective value of torsion stiffness of the torsion bar and the stiffness of the spring of

* Статья подготовлена при поддержке гранта РНФ № 23-29-00653 «Разработка способов гашения колебаний куполообразующих и прямоугольных каркасов зданий и сооружений».

the hydraulic cylinder or the coefficient of resistance to the movement of the fluid of the hydraulic cylinder.

Keywords: seismic protection, vibration dampener, band-rope system, parameters,single-acting hydraulic cylinder, torsion stiffness, dome structure

Введение. Для создания условий механической безопасности зданий и сооружений с последующим построением теории и разработкой аналитических и вычислительных методов расчёта систем безопасности конструкций и конструктивных систем зданий и сооружений необходимы новые решения устройств, обеспечивающих приемлемые параметры перемещений при динамических воздействиях. Эти новые устройства – гасители колебаний – должны обеспечивать живучесть сооружений, снижать риски аварий, повышать надёжность и срок службы строительных конструкций, в том числе при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях.

Совершенствование способов гашения колебаний механических систем при природных и техногенных воздействиях связано с построением и развитием теории и методов расчёта механической безопасности конструкций и конструктивных систем зданий и сооружений. В свою очередь, развитие теории и методов оценки напряжённого состояния и живучести строительных конструкций, зданий и сооружений, в том числе при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях, способствует принятию эффективных приемов гашения колебаний и правильной настройке гасителей.

В работах [1–4] описаны существующие гасители, близкие по системам гашения. В работах [5–7] рассматривается работа ленточно-тросового гасителя колебаний с программной и практической точек зрения. В [8] представлено определение наиболее эффективного направления силы, действующей в тросе на защищаемый узел. В данной работе оцениваются оптимальные по величине внешние силовые воздействия через ленточно-тросовую систему на защищаемые узлы с целью подбора параметров гасителей, для генерации внутренних сил противодействия колебательным движениям.

Предлагается новое устройство гашения колебаний – ленточно-тросовая система с гидроцилиндром одностороннего действия или торсионом. Устройство относится к гасителям колебаний и может быть применено на куполах, прямоугольных каркасах, локаторах и других объектах строительства, испытывающих динамические нагрузки от сейсмических воздействий, технологического оборудования, ветра и др. Ленточно-тросовый способ предлагается в данном случае использовать с гидроцилиндрами одностороннего действия или торсионами для создания дополнительных односторонних силовых воздействий на защищаемые узлы несущих конструкций, препятствующих колебательным движениям этих узлов. Важной особенностью ленточных систем является возможность создавать (при необходимости) многоугольные конфигурации путем установки промежуточных роликовых опор.

Существующий уровень развития гасителей. Известно устройство для осуществления гашения вертикальных колебаний транспортных средств [1]. Устройство содержит резинокордную оболочку с крышкой, образующие основную рабочую емкость, дополнительную емкость, расположенную между ними перегородку с отверстием, которое связывает обе емкости и в котором установлен электромагнитный клапан с возможностью перекрытия на ходе отбоя. Электромагнитный клапан подключен к системе управления. На дне дополнительной емкости размещен динамический гаситель колебаний, включающий электродвигатель, имеющий на валу барабан с намотанным на него тросом, устройство натяга троса, размещенное внутри дополнительной емкости на перегородке, причем один конец троса закреплен в устройстве натяга троса, второй конец троса проходит через отверстие с уплотнением в перегородке и закреплен на крышке рабочей емкости, а электродвигатель подсоединен к системе управления. Устройство натяга троса содержит цилиндрический корпус, размещенную в нем пружину и фиксатор конца троса.

К основным недостаткам устройства относится то, что при вынужденных колебаниях амортизированного объекта происходит включение в работу целого ряда промежуточных устройств, что приводит к затягиванию во времени включения в действие динамического гасителя колебаний и снижению эффективности данной системы гашения колебаний.

Известен блок промышленного сооружения [2] для повышения несущей способности каркаса за счет уменьшения динамической нагрузки от технологического оборудования. Блок установлен на свайный фундамент с высоким ростверком и состоит из плиты пола и несущих элементов каркаса и их узлов соединения. Внутри блока на плите пола прикреплено оборудование и размещены гибкие связи наклонно и симметрично относительно вертикальной центральной продольной плоскости блока. Связи прикреплены одним концом к плите пола в местах крепления оборудования, а другим – к узлам соединения несущих элементов каркаса, расположенных в его верхней части. Связи снабжены устройствами регулирования натяжения (предлагаются талрепы).

К основным недостаткам данного блока относится то, что стержневые связи, препятствуя колебанию узла блока в направлении растяжения связей, одновременно накапливают потенциальную энергию деформации, что приводит к движению узла в направлении сжатия стержня и отрицательно влияет на процесс гашения колебаний, уменьшая эффект снижения значений динамической нагрузки.

Известен металлический каркас многоэтажного сейсмостойкого здания [3] для повышения жесткости и обеспечения возможности регулирования параметров предельных состояний зданий при сейсмических воздействиях, а также создания жесткой пространственной оболочки, воспринимающей сдвигающие усилия. Металлический каркас сейсмостойкого многоэтажного здания включает колонны, ригели, опертые на них, и связи. Связи с целью повышения жесткости и обеспечения возможности регулирования параметров предельных состояний здания при сейсмических воздействиях и создания жесткой пространственной оболочки, воспринимающей сдвигающие усилия, выполнены в виде лент, снабженных элементами жесткости и обвивающих сверху вниз по спирали наружные грани колонн, размещенных по периметру здания и прикрепленных натяжными приспособлениями, установленными в узлах опирания ригелей на колонны.

К основным недостаткам данного каркаса относится то, что при колебаниях и неверной настройке натяжения связей могут возникнуть опасные крутильные формы колебаний.

Известно устройство для регулировки ремня безопасности [4]. Устройство содержит пару поддерживающих поворотных стержней, состоящую из первого поворотного стержня и второго поворотного стержня. Соседние концы первого и второго поворотных стержней соединены друг с другом шарнирно и образуют прилежащий угол между поворотными стержнями. Один из несоседних концов первого и второго поворотных стержней зафиксирован неподвижно, а другой несоседний конец первого и второго поворотных стержней выполнен с возможностью перемещения при изменении прилежащего угла между поворотными стержнями. Привод меняет прилежащий угол между поворотными стержнями, прилагая силу к первому поворотному стержню, и/или ко второму поворотному стержню, и/или к точке шарнира поворотных стержней, тем самым непосредственно прилагает изменяющуюся силу к ремню безопасности через другой несоседний конец.

К основным недостаткам устройства регулировки ремня безопасности при гашении колебаний относится то, что при повышении заданного уровня натяжения ремня безопасности его разматывание прекращается, что создает ударную нагрузку на защищаемый узел конструкции, совершающей колебания, а растягивающие усилия ленты, способствующие обратному движению узла крепления, могут увеличить амплитуду колебаний конструкции в направлении сматывания.

Ленточно-тросовый способ гашения колебаний с гидроцилиндром одностороннего действия. Задачей предлагаемого устройства является полуактивное гашение

пространственных колебаний защищаемой механической системы. Объектом данной системы является гашение колебаний механических систем. Предметом изобретения является способ гашения колебаний.

Ленточно-тросовый способ гашения (рис. 1) заключается в том, что к опорам прикреплены преднатяжители (2), а в узлах крепления лент (тросов) (1) (в том числе в промежуточных точках крепления (3) лент) к защищаемой конструкции (4) действуют силы натяжения, работающие как односторонние связи. Преднатяжители сматывают и натягивают ленту (трос) до тех пор, пока продольная сила в ленте (тросе) не примет заданного значения *N*. Таким образом данная система гашения позволяет осуществлять разматывание ленты (троса) только при действии силы сопротивления в гидроцилиндре (5), большей, чем *N*, что и создает эффект гашения колебаний.

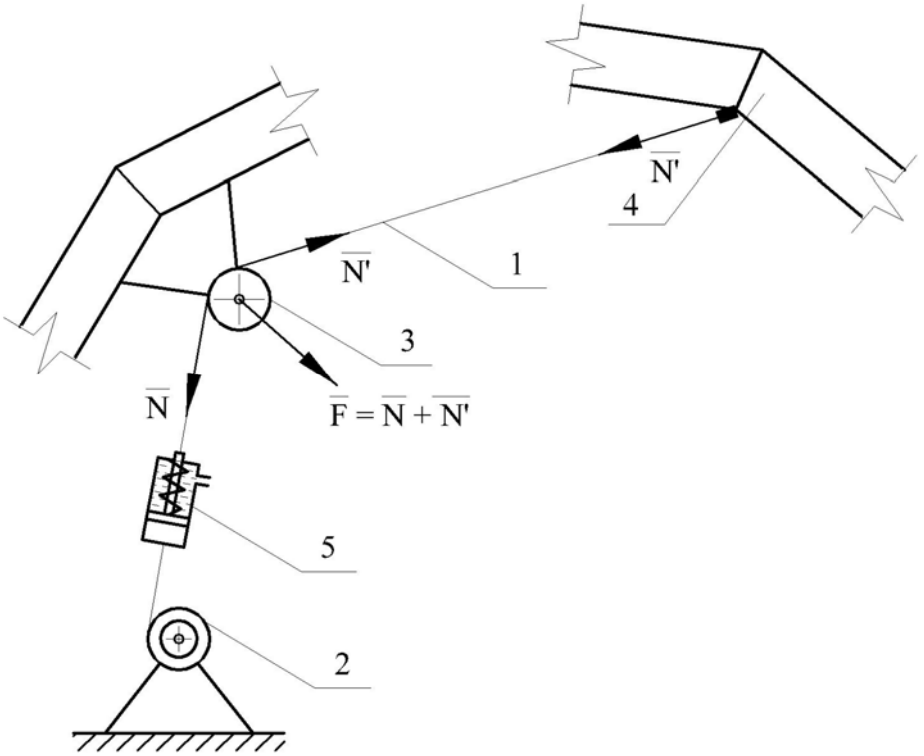


Рис. 1. Гаситель с гидроцилиндром одностороннего действия (5) и промежуточной точкой крепления

Работа гасителя колебаний сооружений. Ленточно-тросовая система с гидроцилиндрами одностороннего действия для гашения колебаний сооружений работает как система односторонних силовых воздействий на защищаемые узлы несущих конструкций, образованная ленточно-тросовыми элементами, оснащенными преднатяжителями и гидроцилиндрами одностороннего действия, закрепленная к защищаемым узлам и опорам. Данная система создает совокупные односторонние силовые воздействия на защищаемые узлы несущих конструкций, препятствующие колебательным движениям этих узлов.

Вывод соотношений для определения параметров гасителей. Предметом исследования являются демпфирующие свойства конструктивной системы «сооружение – гаситель» с ленточно-тросовым демпфером, изучаемые на динамических расчетных моделях с целью наиболее эффективного их использования. Рассматриваются два варианта натяжения ленточно-тросовой системы с эффектом тормозящей и удерживающей связи – гидроцилиндр одностороннего действия с преднатяжителем (см. рис. 1) и торсион с преднатяжителем (рис. 2).

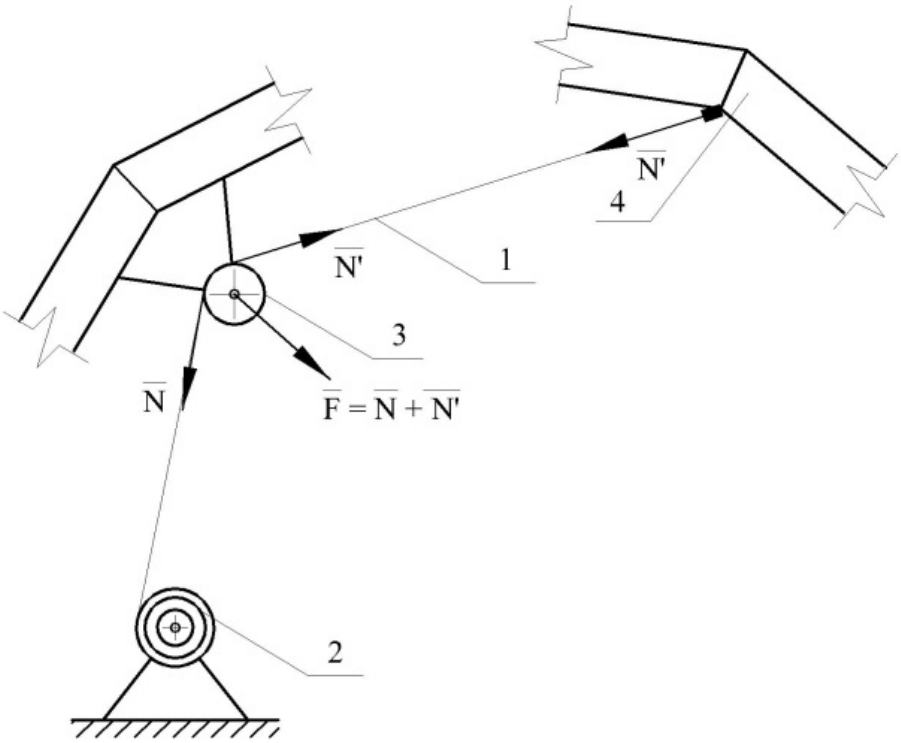


Рис. 2. Гаситель с торсионом (2) и промежуточной точкой крепления

Для минимизации влияния сейсмической нагрузки на колебательное движение механической системы (конструкции) необходимо, чтобы вектор силы, препятствующей перемещению защищаемого узла, численно равнялся величине силы инерции переносного движения или переносной силе сейсмического воздействия на защищаемый узел:

$$N = M_i \cdot \sqrt{(\ddot{\Delta}_{ix})^2 + (\ddot{\Delta}_{iy})^2 + (\ddot{\Delta}_{iz})^2}, \quad (1)$$

где M_i – обобщенная масса i узла, в котором закреплен трос гасителя; $\ddot{\Delta}_{ix}$, $\ddot{\Delta}_{iy}$, $\ddot{\Delta}_{iz}$ – ускорения движения грунта вдоль осей x, y и z, соответственно.

Наиболее опасным может считаться состояние движения механической системы, в котором все массы двигаются в одном направлении, как бы помогая друг другу, т.е. движение по первой форме собственных колебаний. При этом эквивалентную массу защищаемого узла приравняем обобщенной массе первой формы собственных колебаний механической системы:

$$M_i = V_1^T M\, V_1, \quad (2)$$

где M_i – обобщенная масса 1-й формы колебаний; M – матрица масс механической системы; V_1 – собственный вектор первой формы колебаний.

При использовании торсиона сила натяжения троса N будет создавать крутящий момент

$$N \cdot r = c \cdot \varphi, \quad (3)$$

где r – радиус (длина рычага) торсиона; c – крутильная или угловая жесткость торсиона; φ – угол закручивания.

Учитывая, что угол закручивания торсиона связан с перемещением i узла в направлении силы натяжения троса соотношением

$$\varphi = U_i^0 / r, \quad (4)$$

получаем величину натяжения троса в виде:

$$N = \frac{c \cdot U_i^0}{r^2}. \tag{5}$$

При использовании гидроцилиндра сила натяжения троса N будет зависеть и от величины перемещения и от скорости перемещения узла:

$$N = c_1 \cdot U_i^0 + \alpha \cdot \dot{U}_i^0, \tag{6}$$

где c_1 – жесткость пружины, обеспечивающей необходимую силу сопротивления движению и возвратное движение поршня; α – коэффициент сопротивления движению жидкости гидроцилиндра; U_i^0, $\dot{U}_i^0$ – перемещение и скорость движения узла в направлении силы натяжения троса.

Расчет гасителя будем производить на действие сейсмической нагрузки, заданной пространственной акселерограммой землетрясения. При этом предварительно надо определить максимальное значение ускорения или максимум функции суммы квадратов проекций переносного ускорения в некоторый момент времени ($t + \Delta t$):

$$\max f(t) = (\ddot{\Delta}_{ix})^2_{t+\Delta t} + (\ddot{\Delta}_{iy})^2_{t+\Delta t} + (\ddot{\Delta}_{iz})^2_{t+\Delta t}\ . \tag{7}$$

Это значение может быть легко подсчитано как экстремальное значение ускорения по числовой акселерограмме землетрясения.

Приравнивая соотношения (5) и (6) выражению (1) с учетом (7) для момента времени ($t + \Delta t$), получаем:

$$\frac{c \cdot U_{i,\text{доп}}^0}{r^2} = M_i \cdot \sqrt{(\ddot{\Delta}_{ix})^2_{t+\Delta t} + (\ddot{\Delta}_{iy})^2_{t+\Delta t} + (\ddot{\Delta}_{iz})^2_{t+\Delta t}}, \tag{8}$$

$$c_1 \cdot U_{i,\text{доп}}^0 + \alpha \cdot \frac{\dot{U}_{i,\text{доп}}^0}{\Delta t} = M_i \cdot \sqrt{(\ddot{\Delta}_{ix})^2_{t+\Delta t} + (\ddot{\Delta}_{iy})^2_{t+\Delta t} + (\ddot{\Delta}_{iz})^2_{t+\Delta t}} \tag{9}$$

для торсиона и гидроцилиндра, соответственно. Здесь $U_{i,\text{доп}}^0$ и $\dot{U}_{i,\text{доп}}^0$ – предельно допустимые перемещение и скорость защищаемого узла в направлении N, соответственно.

Данные соотношения позволяют определить эффективные значения крутильной жесткости торсиона и жесткости пружины гидроцилиндра или коэффициента сопротивления движению жидкости гидроцилиндра:

$$c = M_i \cdot r^2 \sqrt{(\ddot{\Delta}_{ix})^2_{t+\Delta t} + (\ddot{\Delta}_{iy})^2_{t+\Delta t} + (\ddot{\Delta}_{iz})^2_{t+\Delta t}} \Big/ U_{i,\text{доп}}^0, \tag{10}$$

$$c_1 = \left(M_i \cdot \sqrt{(\ddot{\Delta}_{ix})^2_{t+\Delta t} + (\ddot{\Delta}_{iy})^2_{t+\Delta t} + (\ddot{\Delta}_{iz})^2_{t+\Delta t}} - \alpha \cdot \frac{\dot{U}_{i,\text{доп}}^0}{\Delta t} \right) \Big/ U_{i,\text{доп}}^0. \tag{11}$$

Данные соотношения могут как непосредственно использоваться для определения жесткостных параметров, так и стать отправным пунктом определения оптимальных параметров ленточно-тросового гасителя.

Выводы. Предлагается новое устройство гашения колебаний – ленточно-тросовая система с гидроцилиндром одностороннего действия или торсионом.

На основе результатов аналитического исследования определены соотношения для вычисления модулей внешних силовых воздействий через ленточно-тросовую систему на защищаемые узлы конструкции с целью подбора параметров гасителей, для генерации внутренних сил противодействия колебательным движениям для гасителя с торсионом и гасителя с гидроцилиндром одностороннего действия. Аналитические

выкладки приводят к формулам, позволяющим находить эффективное значение крутильной жесткости торсиона и жесткости пружины гидроцилиндра или коэффициента сопротивления движению жидкости гидроцилиндра.

Список литературы

1. Электропневматическая подвеска: пат. 2443573 Рос. Федерация : МПК B 60 G 11/27, F 16 F 9/04, F 16 F 15/03 / Хамитов Р.Н., Аверьянов Г.С., Ковалев А.Ю.; заявитель и патентообладатель НОУ ВПО «Академический институт прикладной энергетики». – N 2010117793/11; заявл. 04.05.10; опубл. 27.02.12, Бюл. N 6.

2. Блок промышленного сооружения: пат. 1333756 СССР: МПК E 04 H 5/00 / Арабский А.К., Люнгрин Д.Д., Ройтер М.С., Ротштейн Д.М.; заявитель и патентообладатель Сибирский научно-исследовательский и проектный институт газонефтепромыслового строительства. – N 4008413/29-33; заявл. 18.11.85; опубл. 30.08.87, Бюл. N 32.

3. Металлический каркас многоэтажного сейсмостойкого здания: пат. 703640 СССР: МПК E 04 H 9/02, E 04 B 1/18 / Килимник Л.Ш.; заявитель и патентообладатель ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – N 2518931/29-33; заявл. 19.08.77; опубл. 15.12.79, Бюл. N 46.

4. Устройство для регулировки ремня безопасности : пат. 2527585 Рос. Федерация : МПК B 60 R 22/34 / Сунь Иньгуй ; заявитель и патентообладатель Сунь Иньгуй. – N 2013113584/11 ; заявл. 26.08.11 ; опубл. 10.09.14, Бюл. N 25.

5. Шеин, А.И. Инерционно-преднатяжительная полиэстерноленточная система гашения колебаний циклически симметричных конструкций купольного типа / А.И. Шеин, А.В. Чуманов // Моделирование и механика конструкций. – 2019. – № 10. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no-10-nov-2019/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/10.1/view

6. Шеин, А.И. Ленточная система гашения колебаний для закрытых куполов / А.И. Шеин, А.В. Чуманов, В.А. Монахов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 122–129.

7. Шеин, А.И. Колебания закрытых куполов с ленточной системой гашения колебаний / А.И. Шеин, А.В. Чуманов // Моделирование и механика конструкций. – 2020. – №12. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no12-noyabr-2020/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/12.1/view

8. Шеин, А.И. Эффективное расположение ленточно-тросового гасителя колебаний / А.И. Шеин, А.В. Чуманов // Моделирование и механика конструкций. – 2021. – №14. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no14-dekabr-2021/stroitelnaya-mehanika/14.2/view

References

1. Electropneumatic suspension: pat. 2443573 Russian Federation : IPC B 60 G 11/27, F 16 F 9/04, F 16 F 15/03 / Hamitov R.N., Averyanov G.S., Kovalev A.YU.; applicant and patentee NOU VPO «Akademicheskij institut prikladnoj energetiki». – No. 2010117793/11; request 04.05.10 ; publication 27.02.12, Byul. No. 6.

2. Industrial building block : pat. 1333756 SU: IPC E 04 H 5/00 / Arabskij A.K., Lyungrin D.D., Rojter M.S., Rotshtejn D.M.; applicant and patentee Sibirskij nauchno-issledovatel'skij i proektnyj institut gazonefteprom yslovogo stroitel'stva. – No. 4008413/29-33 ; request 18.11.85 ; publication 30.08.87, Byul. No. 32.

3. Metal frame of a multi-storey earthquake-resistant building: pat. 703640 SU: IPC E 04 H 9/02, E 04 B 1/18 / Kilimnik L.SH.; applicant and patentee CNIISK im. V.A. Kucherenko. – No. 2518931/29-33 ; request 19.08.77; publication 15.12.79, Byul. No. 46.

4. Device for adjusting the seat belt : pat. 2527585 Russian Federation: IPC B 60 R 22/34 / Sun Inguj ; applicant and patentee Sun Inguj. – No. 2013113584/11; request 26.08.11; publication 10.09.14, Byul. No. 25.

5. Shein, A.I. Inertial pre-tensioning polyester-tape vibration damping system of cyclically symmetric dome-type structures / A.I. Shein, A.V. Chumanov // Modeling and structural mechanics. – 2019. – No. 10. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no-10-nov-2019/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/10.1/view

6. Shein, A.I. Tape vibration damping system for closed domes / A.I. Shein, A.V. Chumanov, V.A. Monakhov // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1 (46). – P. 122–129.

7. Shein, A.I. Oscillations of closed domes with a tape damping system / A.I. Shein, A.V. Chumanov // Modeling and structural mechanics. – 2020. – No. 12. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no12-noyabr-2020/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/12.1/view

8. Shein, A.I. Effective location of the tape-cable vibration damper / A.I. Shein, A.V. Chumanov // Modeling and structural mechanics. – 2021. – No. 14. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no14-dekabr-2021/stroitelnaya-mehanika/14.2/view

УДК 624.046.5 DOI 10.54734/20722958_2023_2_77

Вологодский государственный университет
Россия, 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15
Соловьев Сергей Александрович,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство»
E-mail: solovevsa@vogu35.ru
Инькова Юлия Александровна,
аспирант, ассистент кафедры «Промышленное и гражданское строительство»
E-mail: gubinaiua@vogu35.ru
Соловьева Анастасия Андреевна,
аспирант, преподаватель кафедры «Промышленное и гражданское строительство»
E-mail: solovevaaa@vogu35.ru

Vologda State University
Russia, 16000, Vologda, ul. Lenina, 15
Solovev Sergey Aleksandrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the Department «Industrial and Civil Engineering»
E-mail: solovevsa@vogu35.ru
Inkova Yulia Aleksandrovna,
Postgraduate Student, Assistant of the Department «Industrial and Civil Engineering»
E-mail: gubinaiua@vogu35.ru
Soloveva Anastasia Andreevna,
Postgraduate Student, Lecturer of the Department «Industrial and Civil Engineering»
E-mail: solovevaaa@vogu35.ru

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ДЕРЕВЯННЫХ СТРОПИЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НЕПОЛНОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

С.А. Соловьев, Ю.А. Инькова, А.А. Соловьева

Представлены подходы к количественной оценке надежности элементов деревянных стропильных конструкций на стадии их эксплуатации. В связи с недостатком статистической информации во многих практических задачах представленные алгоритмы построены на основе положений теории возможностей и теории нечетких множеств. Данные теории анализа данных позволяют получить математически достоверное решение при недостатке статистических данных для использования известных вероятностно-статистических подходов. Представлены различные расчетные ситуации с разным количеством случайных величин и нечетких переменных. Количественная оценка надежности в виде вероятности безотказной работы позволяет выявить наиболее ненадежные элементы в стропильных конструкциях, а также отранжировать несущие элементы по критерию уровня безопасности эксплуатации. В разработанных подходах надежность представлена в виде интервала, размах которого может быть уменьшен путем сбора дополнительной статистической информации.

Ключевые слова: надежность, деревянные конструкции, вероятность отказа, обследование, случайные величины, нечеткие переменные, безопасность

PROBABILISTIC ASSESSMENT OF WOODEN RAFTERS STRUCTURAL RELIABILITY WITH INCOMPLETE STATISTICAL DATA

S.A. Solovev, Yu.A. Inkova, A.A. Soloveva

The article presents approaches to quantifying the reliability of structural elements of existing wooden rafters. Due to the lack of statistical data in many practical engineering tasks, the presented algorithms are based on the provisions of the theory of possibilities and the theory of fuzzy sets. These theories of data analysis propose a mathematically accurate solution with a lack of statistical data for the use of well-known probabilistic-statistical approaches. Various design cases with different numbers of random variables and fuzzy variables are presented. A quantitative assessment of reliability in the form of the non-failure probability makes it possible to identify the most unreliable

elements in rafter structures, as well as to rank the load-bearing elements according to the criterion of the level of operational safety. In the developed approaches, reliability is presented in the form of an interval, the span of which can be reduced by collecting additional statistical data.

Keywords: reliability, wooden structures, probability of failure, inspection, random variables, fuzzy variables, safety

Обеспечение требуемого уровня надежности строительного объекта является ключевой целью при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений. На текущий момент в РФ надежность обеспечивается за счет проверки требований предельных состояний первой и второй групп при наиболее неблагоприятных комбинациях нагрузок и воздействий. В качестве регуляторов надежности выступают коэффициенты надежности. Такой подход иногда называют «полувероятностным». Серьезным недостатком данного подхода является отсутствие количественной оценки уровня надежности. Как отмечает д.т.н., проф. Мкртычев О.В. [1], «данный метод имеет ряд недостатков, например, невозможно сказать, какой уровень надежности в количественном измерении формируется в результате применения норм проектирования, одинаков ли этот уровень надежности для зданий и сооружений различных конструктивных схем и выполненных из различных материалов». Одним из направлений развития «полувероятноснтых» методов расчета и проектирования строительных конструкций является использование полных вероятностных методов конструкций с количественной оценкой уровня надежности.

Исследование и разработка методов вероятностной оценки надежности строительных конструкций ведется в нашей стране еще с первой половины XX века. На текущий момент имеется фундаментальная работа по использованию положений теории вероятностей и математической статистики для обоснования уровня надежности строительных конструкций [2]. В ГОСТ 27751-2014 включено следующее требование: «Вероятностно-статистические методы рекомендуется применять для обоснования нормативных и расчетных характеристик материалов и оснований, нагрузок и коэффициентов сочетаний. Использование указанных методов допускается при наличии достаточных данных об изменчивости основных параметров в случае, если длина ряда данных позволяет проводить их статистический анализ». Однако достаточности данных по количеству в практических инженерных задачах может не быть вследствие ряда причин: невозможности отбора большого числа контрольных образцов для испытаний, высокой стоимости отдельных испытаний, временных затрат на проведение испытаний и т.д. Для данных расчетных случаев необходимы методы оценки и анализа надежности при неполной статистической информации. Одним из направлений развития теории надежности строительных конструкций в данной сфере является использование положений теории возможностей и теории нечетких множеств [3].

В настоящее время для контроля надежности деревянных конструкций на стадии эксплуатации разрабатываются новые методики. Так, в работе [4] приведены алгоритмы анализа надежности деревянных конструкций с использованием неразрушающих методов. В работах [5–7] отражены аспекты вероятностного мониторинга уровня надежности различных деревянных конструкций, которые учитывают факторы деградации свойств древесины.

Пусть необходимо выполнить анализ надежности стропильной ноги для системы с расчетной схемой, представленной на рис. 1.

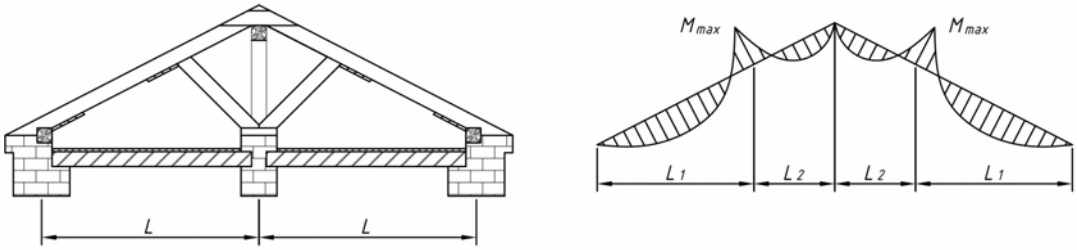


Рис. 1. Общий вид (а) и расчетная схема (б) деревянной стропильной системы

Математическую модель предельного состояния по критерию прочности нормальных сечений стропильной ноги можно записать в виде

$$M_{\max} = \frac{q \cdot \left(L_1^3 + L_2^3\right)}{8 \cdot \left(L_1 + L_2\right)} \le M_{ult} = W_x R_и, \quad (1)$$

где q – равномерно распределенная нагрузка на стропильную ногу; L_1 и L_2 – геометрические параметры расчетной схемы (см. рис. 1); W_x – момент сопротивления сечения стропильной ноги; $R_и$ – расчетное сопротивление стропильной ноги при изгибе.

Введем обозначение $k = \frac{\left(L_1^3 + L_2^3\right)}{8 \cdot \left(L_1 + L_2\right)}$. Рассмотрим прямоугольное сечение стропильной ноги, тогда момент сопротивления составит $W_x = bh^2 / 6$, где h – высота сечения стропильной ноги; b – ширина сечения стропильной ноги. Т.к. $R_и$ является конкретным значением случайной величины с заданной обеспеченностью, то для анализа надежности будем использовать случайную величину в виде предела прочности древесины при изгибе $\tilde{\sigma}_и$. С учетом вышеизложенного математическую модель предельного состояния (1) можно записать в виде

$$q \le \frac{bh^2 \tilde{\sigma}_и}{6k}. \quad (2)$$

С учетом собственного веса конструкций стропильной ноги математическая модель (2) может быть преобразована к виду функции предельного состояния:

$$g = \frac{bh^2 \tilde{\sigma}_и}{6k} - \tilde{\rho} bh - \sum_{i=1}^{n} \tilde{q}_i \ge 0, \quad (3)$$

где $\sum_{i=1}^{n} \tilde{q}_i$ – сумма случайных равномерно распределенных нагрузок на стропильную ногу в виде собственного веса слоев покрытия, снеговой нагрузки и других видов проектной нагрузки.

Одной из самых распространенных функций распределения возможностей в инженерно-строительной практике является экспоненциальная функция с аналитическим видом

$$\pi_x(x) = \exp\left[-\left(\frac{a_x - x}{b_x}\right)^2\right], \quad (4)$$

где $a_x = 0,5 \cdot (X_{\max} + X_{\min})$ – условное «среднее»; $b_x = 0,5(X_{\max} - X_{\min}) / \sqrt{-\ln \alpha}$ – мера «рассеяния»; здесь $X_{\max}$ и $X_{\min}$ – наибольшее и наименьшее значение во множестве значения $\{x\}$ нечеткой переменной X, полученных из результатов измерений (испытаний); $\alpha \in [0;\ 1]$ – уровень среза (риска), значением которого задаются.

Функция (4) использовалась в анализе надежности гидротехнических сооружений [8], балок и плит на устойчивость [9], свай в условиях вечной мерзлоты [10] и ряде других задач. На основе данной функции могут быть получены граничные функции распределения [10].

Как видно из математической модели предельного состояния (3), проблема анализа надежности заключается в вычитании ряда нечетких переменных нагрузки из нечеткой переменной прочности. При вычитании нечеткой переменной X из нечеткой переменной

Y действует следующее правило [11]: новая нечеткая переменная Z имеет граничные функции распределения, а ее параметры определяются как $a_z = a_y - a_x$, $b_z = b_y - b_x$.

Уровень среза (риска) $\alpha \in [0;\ 1]$ в (4) задается, что вносит некоторую субъективность в результат расчета. Для его более объективного назначения может быть использован следующий алгоритм: строятся граничные функции распределения $\underline{F}_{K-S}(x)$ и $\overline{F}_{K-S}(x)$ по имеющейся выборке на основе статистики Колмогорова – Смирнова (рис. 2, а). Способ их построения описан в [12]; после их построения подбирается минимальное значение уровня среза α, при котором перекрываются все скачки граничных функций распределения по статистике Колмогорова – Смирнова (рис. 2, б). С ростом числа испытаний/измерений область между функциями $\underline{F}_{K-S}(x)$ и $\overline{F}_{K-S}(x)$ уменьшается, и, следовательно, уменьшается значение параметра α. Данный факт отражает уменьшение эпистемологической неопределенности данных вследствие роста статистической информации.

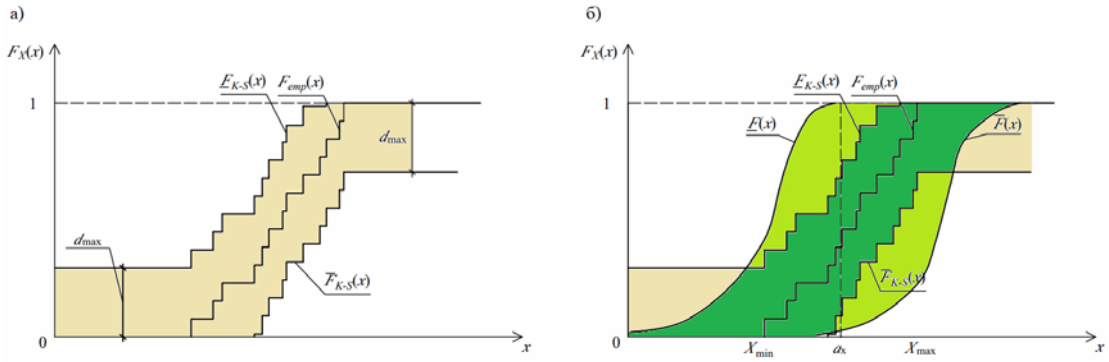


Рис. 2. Способ определения параметра для функций (5)-(6)

Алгоритм анализа надежности деревянной стропильной ноги рассмотрим на примере.

Пример 1. Пусть при обследовании деревянной стропильной системы необходимо получить оценку вероятности безотказной работы стропильной ноги по критерию прочности нормальных сечений. Размеры стропильной ноги: b=100 мм; h=150 мм. По результатам лабораторных испытаний установлено: $\max(\tilde{\sigma}_u) = 15$ МПа; $\min(\tilde{\sigma}_и) = 11$ МПа; $\max(\tilde{\rho}) = 6$ кН/м^3; $\min(\tilde{\rho}) = 5$ кН/м^3 (уровни среза $\alpha_\sigma = 0{,}10$ и $\alpha_\rho = 0{,}06$). Параметр k=1,5 м^2. Параметры снеговой нагрузки на стропильную ногу: $a_{q,snow} = 1{,}200$ кН/м, $b_{q,snow} = 0{,}300$ кН/м. Параметры нагрузки от собственного веса слоев вышележащих конструкций (настил, утеплитель, металлочерепица): $a_{q,str} = 0{,}300$ кН/м, $b_{q,snow} = 0{,}025$ кН/м.

Условное среднее значение функции предельного состояния как нечеткой переменной можно записать в виде

$$a_g = \frac{bh^2}{6k}\left(\frac{\max(\tilde{\sigma}_и) + \min(\tilde{\sigma}_и)}{2}\right) - \left(\frac{\max(\tilde{\rho}) + \min(\tilde{\rho})}{2}\right)bh - a_{q,snow} - a_{q,str},$$

а мера рассеяния может быть выражена как

$$b_g = \frac{bh^2}{6k}\left(\frac{\max(\tilde{\sigma}_и) - \min(\tilde{\sigma}_и)}{2\sqrt{-\ln\alpha_\sigma}}\right) + \left(\frac{\max(\tilde{\rho}) - \min(\tilde{\rho})}{2\sqrt{-\ln\alpha_\rho}}\right)bh + b_{q,snow} + b_{q,str}.$$

При выполнении условия $a_g \geq 0$ возможность безотказной работы принимается R=1. Возможность отказа вычисляется как $Q = \exp\left[-\left(\frac{a_g}{b_g}\right)^2\right]$. Вероятность безотказной работы может быть представлена в интервальной форме [1 – Q; R].

По вышеуказанным данным $a_g = 0,949$ кН/м, $b_g = 0,515$ кН/м. Тогда вероятность безотказной работы составит [0,967; 1,000].

Если интервал надежности получается слишком широким (неинформативным) для принятия решения о дальнейшей эксплуатации элементов стропильной системы, можно получить более точную статистическую информацию. Например, увеличив число контрольных образцов древесины, получим новый уровень среза для прочности древесины $\alpha_\sigma = 0,02$. В этом случае интервал надежности составит [0,983; 1,000].

Снеговая нагрузка $\tilde{q}_{snow}$ может быть выражена точным вероятностным распределением при наличии большого объема статистических данных о снегосъемках для рассматриваемой местности. Зачастую для моделирования снеговой нагрузки используется закон распределения Гумбеля [13] с аналитическим видом

$$F_X(x) = \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha - x}{\beta}\right)\right], \tag{5}$$

где α – параметр центра распределения; β – параметр сдвига распределения.

Параметры закона распределения Гумбеля могут быть вычислены по статистической выборке следующим образом:

$$\beta = \left(0,78 + 1,54N^{-0,75}\right)\cdot S_x,\ \alpha = m_x - \left[0,45 + 0,34N^{-0,69}\right]\cdot S_x, \tag{6}$$

где N – количество значений в выборке; m_x – математическое ожидание случайной величины $\tilde{x}$; S_x – среднеквадратическое отклонение случайной величины $\tilde{x}$.

Преобразуем математическую модель предельного состояния (3) к виду

$$\tilde{q}_{snow} \leq \frac{bh^2\tilde{\sigma}_и}{6k} - \tilde{\rho}bh - \sum_{i=1}^{n-1}\tilde{q}_i, \tag{7}$$

где $\tilde{q}_{snow}$ – снеговая нагрузка.

При введении обозначений $\tilde{q}_{snow} = X$ и $\frac{bh^2\tilde{\sigma}_и}{6k} - \tilde{\rho}bh - \sum_{i=1}^{n-1}\tilde{q}_i = Y$ математическая модель предельного состояния примет классический вид

$$X \leq Y. \tag{8}$$

Вероятность безотказной работы для математической модели вида (8) можно вычислить по формуле

$$P = \int_0^{+\infty} f_y(x)\cdot F_x(x)dx, \tag{9}$$

где $f_y(x)$ – плотность распределения случайной величины Y; $F_x(x)$ – функция распределения случайной величины X.

С учетом принятых выше законов распределения для модели (8) можно записать выражение (9) в виде

$$\underline{P} = \int_0^{+\infty} \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha - x}{\beta}\right)\right]\cdot\left(\frac{d\underline{F}(x)}{dx}\right)dx, \tag{10}$$

$$\overline{P}=\int_{0}^{+\infty}\exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha-x}{\beta}\right)\right]\cdot\left(\frac{d\overline{F}(x)}{dx}\right)dx\,, \qquad (11)$$

где $\underline{F}(x)$ и $\overline{F}(x)$ – функции распределения возможностей;

$$\frac{d\underline{F}(x)}{dx}=\underline{f}_x(x)=\begin{cases}\exp\left[-\left(\dfrac{a_x-x}{b_x^2}\right)^2\right]\cdot\dfrac{(2a_x-2x)}{b_x^2}, & \text{если } x<a_x\\ 0, & \text{если } x\ge a_x\end{cases}, \qquad (12)$$

$$\frac{d\overline{F}(x)}{dx}=\overline{f}_x(x)=\begin{cases}0, & \text{если } x<a_x\\ -\exp\left[-\left(\dfrac{a_x-x}{b_x^2}\right)^2\right]\cdot\dfrac{(2a_x-2x)}{b_x^2}, & \text{если } x\ge a_x\end{cases}. \qquad (13)$$

Рассмотрим алгоритм расчета надежности на примере.

Пример 2. Пусть заданы все данные примера 1 за исключением снеговой нагрузки. Снеговая нагрузка описывается распределением Гумбеля с параметрами $\alpha=1,200$ кН/м, $\beta=0,200$ кН/м. Условное среднее значение параметра $Y=\dfrac{bh^2\tilde{\sigma}_{\text{и}}}{6k}-\tilde{\rho}bh-\sum_{i=1}^{n-1}\tilde{q}_i$.

Значения параметров равны $a_y=2,149$ кН/м; $b_y=0,215$ кН/м.

$$\underline{P}=\int_{0}^{a_y}\exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha-x}{\beta}\right)\right]\cdot\left(\frac{d}{dx}\left[\exp\left[-\left(\frac{a_y-x}{b_y}\right)^2\right]\right]\right)dx+\int_{a_y}^{\infty}\exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha-x}{\beta}\right)\right]\cdot 0dx\,, \qquad (14)$$

$$\overline{P}=\int_{0}^{a_y}\exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha-x}{\beta}\right)\right]\cdot 0dx+\int_{a_y}^{\infty}\exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha-x}{\beta}\right)\right]\cdot\left(1-\exp\left[-\left(\frac{a_y-x}{b_y}\right)^2\right]\right)dx\,. \qquad (15)$$

Подставив значения в вышеуказанные выражения, получим интервал надежности в виде: $P\in\left[\underline{P};\ \overline{P}\right]=\left[0,975;\ 0,996\right]$.

Рассмотрим третий вариант анализа надежности, в котором геометрические размеры поперечного сечения также являются случайными величинами (нечеткими переменными). Математическая модель предельного состояния примет вид

$$g=\frac{\tilde{b}\tilde{h}^2\tilde{\sigma}_{\text{и}}}{6k}-\tilde{\rho}\tilde{b}\tilde{h}-\sum_{i=1}^{n}\tilde{q}_i\ge 0\,. \qquad (16)$$

В связи с тем, что вместо простой линейной модели предельного состояния требуется выполнить анализ нелинейной модели, необходимо использовать принцип обобщения Л. Заде. Остановимся на прикладном аспекте использования данного подхода. Требуемая ветвь нечеткой функции g может быть записана в виде

$$g=\frac{(a_b-\beta\cdot b_b)(a_h-\beta\cdot b_h)^2(a_\sigma-\beta\cdot b_\sigma)}{6k}-(a_\rho+\beta\cdot b_\rho)(a_b+\beta\cdot b_b)(a_h+\beta\cdot b_h)-$$
$$-\sum_{i=1}^{n}\left(a_{q,i}+\beta\cdot b_{q,i}\right)\ge 0, \qquad (17)$$

где a_b и a_h – средние размеры ширины и высоты сечения; b_b и b_h – меры рассеяния ширины и высоты сечения; $\beta = \sqrt{-\ln \pi_g(g)} = \sqrt{-\ln \alpha_*}$.

Пример 3. Пусть заданы все данные примера 1. Дополнительно известны параметры нечетких переменных размеров поперечного сечения элемента $a_b = 100$ мм, $a_h = 150$ мм, $b_b = 1$ мм, $b_h = 2$ мм.

Значение возможности отказа составит $Q = \exp(-\beta_{\min}^2) \to 0,080$. Тогда надежность будет характеризоваться интервалом [0,920; 1,000]. Как видно из сравнения результатов расчета с примером 1, интервал стал шире, что произошло вследствие роста неопределенности данных по геометрическим размерам поперечного сечения.

Выводы:

В практических задачах анализа надежности деревянных стропильных систем возникает проблема недостатка статистической информации для использования вероятностно-статистических методов расчета. Использование положений теории возможностей и теории нечетких множеств позволяет выполнить эффективный анализ надежности элементов стропильных систем в случаях неполной статистической информации для всех или для отдельных случайных величин.

Список литературы

1. Мкртычев, О.В. Определение коэффициентов надежности по ответственности для отдельных несущих элементов на основе вероятностного анализа / О.В. Мкртычев, О.С. Щедрин, Е.М. Лохова // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, вып. 10. – С. 1331–1346. – DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1331-1346.

2. Мкртычев, О.В. Теория надежности в проектировании строительных конструкций: монография / О.В. Мкртычев, В. Д. Райзер. – М.: АСВ, 2016. – 906 с. – ISBN 978-5-4323-0189-5.

3. Leichsenring, F. Numerical simulation of wooden structures with polymorphic uncertainty in material properties / F. Leichsenring, C. Jenkel, W. Graf, & M. Kaliske // International Journal of Reliability and Safety. – 2018. – Vol. 12, № 1–2. – P. 24–45.

4. Sousa, H.S. On the use of NDT data for reliability-based assessment of existing timber structures / H.S. Sousa, J.D. Sørensen, P.H. Kirkegaard [et al.] // Engineering Structures. – 2013. – № 56. – P. 298–311.

5. Moore, J.C. Regional timber bridge girder reliability: Structural health monitoring and reliability strategies / J.C. Moore, R. Glenncross-Grant, S.S. Mahini, R. Patterson // Advances in structural engineering. – 2012. – Vol. 15, № 5. – P. 793–806.

6. Tran, T.B. A Dynamic Bayesian Network framework for spatial deterioration modelling and reliability updating of timber structures subjected to decay / T.B. Tran, E. Bastidas-Arteaga, Y. Aoues // Engineering Structures. – 2020. – Vol. 209. – P. 110301.

7. Lourenço, P.B. In situ measured cross section geometry of old timber structures and its influence on structural safety / P.B. Lourenço, H.S. Sousa, R.D. Brites, L.C. Neves // Materials and Structures. – 2013. – Vol. 46, № 7. – P. 1193–1208.

8. Соловьев, С.А. Вероятностный анализ надежности деревянной стойки по критерию устойчивости при центральном сжатии / С.А. Соловьев, Ю.А. Инькова, А.А. Соловьева // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, вып. 12. – С. 1653–1663. – DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1653-1663.

9. Юделевич, А.М. Оценка надежности гравитационных бетонных плотин на скальных основаниях / А.М. Юделевич // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. БЕ Веденеева. – 2017. – Т. 283. – С. 30–36.

10. Skobtsov, I.G. Method of estimation of cusp catastrophe occurrence possibility based on limited statistical information / I.G. Skobtsov, V.N. Shilovskiy // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 574, №. 1. – P. 012073.

11. Utkin, V.S. The reliability analysis of existing reinforced concrete piles in permafrost regions / V.S. Utkin, L.A. Sushev // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – Vol. 13, №. 2. – P. 64–72.

12. Utkin, V.S. Safety analysis of the soil beds of foundations based on bearing-capacity criterion / V.S. Utkin // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2014. – Vol. 51, issue 1. – P. 9–16. – DOI: 10.1007/s11204-014-9247-y.

13. Qiang, S. Research on reliability of steel roof structures subjected to snow loads at representative sites in China / S. Qiang, X. Zhou, M. Gu //Cold Regions Science and Technology. – 2018. – Vol. 150. – P. 62–69.

References

1. Mkrtychev, O.V. Determination of individual coeffi cients on the basis of probabilistic analysis / O.V. Mkrtychev, O.S. Shchedrin, E.M. Lokhova // Vestnik MGSU. – 2022. – Vol.17, iss.10. – P.1331–1346. – DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1331-1346.

2. Mkrtychev, O.V. Teoriya nadezhnosti v proektirovanii stroitel`ny`x konstrukcij: monografiya / O.V. Mkrtychev, V.D. Rajzer. – M.: ASV, 2016. – 906 p. – ISBN 978-5-4323-0189-5.

3. Leichsenring, F. Numerical simulation of wooden structures with polymorphic uncertainty in material properties / F. Leichsenring, C. Jenkel, W. Graf, & M. Kaliske // International Journal of Reliability and Safety. – 2018. – Vol. 12, № 1–2. – P. 24–45.

4. Sousa, H.S. On the use of NDT data for reliability-based assessment of existing timber structures / H.S. Sousa, J.D. Sørensen, P.H. Kirkegaard [et al.] // Engineering Structures. – 2013. – № 56. – P. 298–311.

5. Moore, J.C. Regional timber bridge girder reliability: Structural health monitoring and reliability strategies / J.C. Moore, R. Glenncross-Grant, S.S. Mahini, R. Patterson // Advances in structural engineering. – 2012. – Vol. 15, № 5. – P. 793–806.

6. Tran, T.B. A Dynamic Bayesian Network framework for spatial deterioration modelling and reliability updating of timber structures subjected to decay / T.B. Tran, E. Bastidas-Arteaga, Y. Aoues // Engineering Structures. – 2020. – Vol. 209. – P. 110301.

7. Lourenço, P.B. In situ measured cross section geometry of old timber structures and its influence on structural safety / P.B. Lourenço, H.S. Sousa, R.D. Brites, L.C. Neves // Materials and Structures. – 2013. – Vol. 46, № 7. – P. 1193–1208.

8. Solovyov, S.A. Fidelity analysis of the reliability of woodworking racks by the criterion of installation at central unloading / S.A. Solovyov, Yu.A. Inkova, A.A. Solovyova // Bulletin of MGSU. – 2022. – Vol. 17, iss. 12. – P. 1653–1663. – DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1653-1663.

9. Yudelevich A.M. Ocenka nadezhnosti gravitacionnyx betonnyx plotin na skalnyx osnovaniyax / Yudelevich A.M. // Izvestiya Vserossijskogo nauchno-issledovatelskogo instituta gidrotexniki im. BE Vedeneeva. – 2017. – Vol. 283. – P. 30–36.

10. Skobtsov, I.G. Method of estimation of cusp catastrophe occurrence possibility based on limited statistical information / I.G. Skobtsov, V.N. Shilovskiy // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 574, №. 1. – P. 012073.

11. Utkin, V.S. The reliability analysis of existing reinforced concrete piles in permafrost regions / V.S. Utkin, L.A. Sushev // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – Vol. 13, №. 2. – P. 64–72.

12. Utkin, V.S. Safety analysis of the soil beds of foundations based on bearing-capacity criterion / V.S. Utkin // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2014. – Vol. 51, issue 1. – P. 9–16. – DOI: 10.1007/s11204-014-9247-y.

13. Qiang, S. Research on reliability of steel roof structures subjected to snow loads at representative sites in China / S. Qiang, X. Zhou, M. Gu // Cold Regions Science and Technology. – 2018. – Vol. 150. – P. 62–69.

УДК 699.844.1 DOI 10.54734/20722958_2023_2_85

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)
Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26, тел.: +7 (495) 781-80-07
Салтыков Иван Петрович, старший преподаватель
E-mail: vincesalt@mail.ru.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)
Russia, 129337, Moscow, 26, Yaroslavskoye Shosse, tel.: +7 (495) 781-80-07
Saltykov Ivan Petrovich, Senior lecturer
E-mail: vincesalt@mail.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ЛЁГКИХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА «СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ»

И.П. Салтыков

Рассматриваются вопросы теории звукоизоляции на основе применения физических моделей распространения воздушного шума, учитывающих свойства дискретности воздушной среды. Разработанный теоретический подход к процессу прохождения звука через звукоизолирующие преграды позволяет создать практический метод расчёта изоляции воздушного шума для лёгких однослойных однородных строительных ограждений.

Ключевые слова: лёгкие строительные ограждения, сосредоточенные параметры, приведённая масса, сосредоточенная масса, воздушный шум

THEORETICAL AND PRACTICAL RESEARCH OF SOUND INSULATION OF LIGHT ENCLOSING STRUCTURES USING THE METHOD OF “CONCENTRATED PARAMETERS”

I.P. Saltykov

The issues of the theory of sound insulation are considered on the basis of the application of physical models of propagation of air noise, taking into account the properties of the discreteness of the air environment. The developed theoretical approach to the process of sound passing through sound-proofing barriers makes it possible to create a practical method for calculating the isolation of air noise for lightweight single-layer homogeneous building plates.

Keywords: light construction plates, concentrated parameters, reduced mass, concentrated mass, air noise

Введение

Традиционно звукоизолирующие строительные конструкции делятся на лёгкие с поверхностной плотностью до 100 кг/м^2 и массивные с поверхностной плотностью, превышающей это значение. Современная методика расчёта звукоизоляции строительных конструкций, представленная в действующих нормативных документах, основана на теории звукоизоляции строительных конструкций, сформировавшейся в конце 70-х годов прошлого века. Труды Л. Кремера, В.И. Заборова, И.Н. Клюкина [1, 2, 3] позволили теоретически обосновать основные закономерности прохождения звука через ограждения и получить алгоритмы практического расчёта, что легло в основу современных нормативных документов. Вместе с тем ряд явлений, связанных с прохождением звука через однослойные ограждения, как массивные, так и лёгкие, в достаточной мере объяснён не был. Это касается, например, таких явлений, как существование пространственно-частотного резонанса и зависимости звукоизоляции от

угла падения звуковых волн на изоляционную преграду. Приводимый в российских сводах правил (СП) графоаналитический метод расчёта лёгких ограждений позволяет строить частотные кривые только для изолирующих преград из определённых однородных строительных материалов (силикатное стекло, органическое стекло, сталь и др.). Таким образом, методика СП основана на результатах обработки значительного массива измерений, а не на строгой физической теории. Современные отечественные [4, 5, 6, 7] и зарубежные исследования [8, 9] продолжают уточнять существующую теорию звукоизоляции и предлагать новые варианты практических и теоретических подходов к изучению распространения воздушного звука через тонкие однослойные преграды. В данной связи следует особо отметить теорию «самосогласования звуковых полей» профессора М.С. Седова и его последователей [4, 5], как глубоко разработанную и наиболее полно объясняющую процессы, происходящие при падении звука на пластины под разными углами на различных частотах стандартного частотного диапазона. В то же время необходимо указать на относительную трудоёмкость вычислений по данной методике [5], а также на отсутствие учёта влияния условий закрепления пластин при построении частотных кривых.

Одним из теоретических методов, позволяющих объяснить явления, происходящие при падении воздушного звука на изолирующую пластину, является метод «сосредоточенных параметров», созданный в конце XX в. профессором А.В. Захаровым [10, 11, 12]. В основу теории данного метода положена аналогия между взаимодействием шарообразных тел, математически описанным И. Бернулли, и процессом взаимодействия фрагментов сред распространения звука, которые характеризуются «сосредоточенными» параметрами: массой, скоростью и координатами центра тяжести. Используя законы сохранения количества движения и сохранения кинетической энергии, удаётся получить уравнения для звукоизоляции однородных пластин. В рамках данной статьи представляется интересным рассмотреть основные теоретические положения метода «сосредоточенных параметров», а также сравнить результаты вычислений по предлагаемому методу с результатами измерений и вычислений, проведённых по методам СП и «самосогласования звуковых полей».

Теоретический анализ и методика расчёта

В соответствии с методикой расчёта СП стандартный частотный диапазон для лёгких ограждений условно делится на два участка: до частоты волнового совпадения (*fL*) с наклоном в 4,5 дБ на октаву и после неё с наклоном 7,5 дБ на октаву (рис. 1). В то время как, согласно полученному Л. Кремером закону масс (1), наклон должен соответствовать приблизительно 6 дБ на одну октаву (что отмечается при осреднении наблюдений для массивных перегородок, кривая на рис. 2). Теоретические исследования на основе метода сосредоточенных параметров позволяют объяснить представленный в СП вид стандартной частотной кривой для лёгких ограждений.

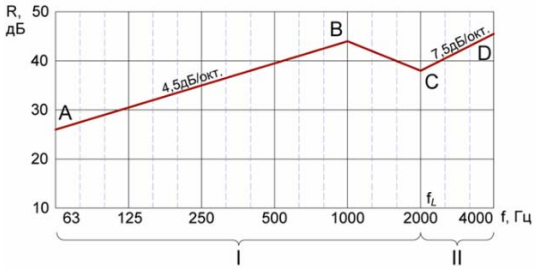


Рис. 1. Стандартный вид частотной кривой для лёгких строительных перегородок

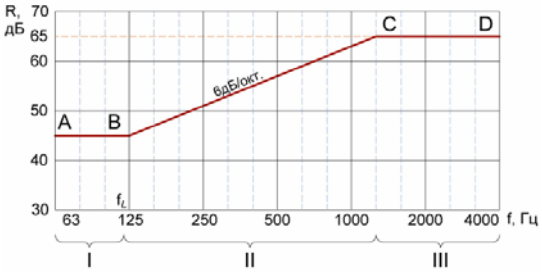


Рис. 2. Стандартный вид частотной кривой для массивных строительных перегородок

В работах [10, 12] показывается, что воздух, являясь упругоинерционной средой распространения звуковых волн, в некоторых задачах может рассматриваться как среда, проявляющая свойства «дискретности». В качестве дискретных элементов среды распространения звука выступают фрагменты объёма этой среды, ограниченные

площадью S поперечного сечения волнового луча и длиной гармонической волны λ. Подобный фрагмент объёма среды может быть представлен материальной точкой, эквивалентной материальной точке, представляющей тело. В физических моделях распространения звука он называется «приведённой массой» μ, кг [10]. Значение приведённой массы вычисляется через волновое число k по формуле

$$\mu = \rho S k = \frac{\rho S \lambda}{2\pi} = \frac{\rho c S}{2\pi f} = \frac{\rho c S}{\omega} = \frac{\rho c T S}{2\pi}, \text{ [kg]}, \tag{1}$$

где λ – длина гармонической волны, м; ρ – плотность материала пластины, кг/м^3; S – площадь поперечного сечения волнового луча, м; c – скорость распространения волны, м/с; f – частота колебаний, с$^{-1}$; T – период колебаний, с; ω – круговая частота колебаний, рад/с; ρc – волновое сопротивление.

В работе [10] показано, что фрагменты твёрдых физических тел принимаются как приведённые массы, когда их размер L на рассматриваемой частоте, вдоль которого распространяется волна, превышает величину $k=\lambda/2\pi$. Частота, выше которой в рассматриваемом размере тела может наблюдаться волновое движение, называется предельной частотой f_{ult}:

$$f_{ult.} \geq \frac{c}{2\pi L}, \text{ с}^{-1}. \tag{2}$$

Объект, который является физически несжимаемым на данной частоте, то есть волновое движение в котором отсутствует, называется сосредоточенной массой m.

Движение гармонической волны в однородной среде можно представить как последовательные упругие соударения приведенных масс, в результате которых передается эффективное значение колебательной скорости v. Тогда количество движения приведенной массы принимается как μv, а её кинетическая энергия – $\mu v^2/2$.

В работе [12] показывается, что при существовании неразрывности передачи звуковой энергии на границах «воздушная среда – материал пластины» и «материал пластины – воздушная среда» изолирующая пластина на выбранной единице площади рассматривается как дискретное тело. Среды до и за пластиной принимаются в качестве приведённых масс, а пластина в пределах, ограниченных единичной площадью, представляется материальной точкой. Физическая модель прохождения звука через пластину (рис. 3) будет выражена двумя уравнениями: закона сохранения количества движения (4), (5) и закона сохранения кинетической энергии (3).

$$\frac{(\mu \cdot \cos\theta) \cdot v^2}{2} = \frac{(\mu \cdot \cos\theta) \cdot (v\beta)^2}{2} + \frac{(\mu \cdot \cos\theta + m) \cdot (v\alpha)^2}{2}; \tag{3}$$

$$\frac{(\mu \cdot \cos\theta) \cdot v}{\cos\theta} = \frac{(\mu \cdot \cos\theta) \cdot (v\beta)}{\cos\theta} + \frac{(\mu \cdot \cos\theta + m) \cdot (v\alpha)}{\cos\theta}; \tag{4}$$

$$\mu \cdot v = \mu \cdot (v\beta) + (\mu + m / \cos\theta) \cdot (v\alpha), \tag{5}$$

где v – единичная скорость движения фрагмента среды; β – коэффициент отражения колебательной скорости; α – коэффициент прохождения колебательной скорости; m – сосредоточенная масса звукоизолирующей пластины; θ – угол падения звуковых лучей на перегородку.

Уравнения (3) и (4) соответствуют схеме на рис. 3, c. Уравнение (5) является частным случаем уравнения (4) при нормальном падении звуковых волн на пластину (рис. 3, a). Схема на рис. 3, b показывает нарушение условия неразрывности передачи звуковой энергии на границах сред при отсутствии изменения ширин падающего и прошедшего звуковых лучей за счёт косинусов углов падения.

Совместным решением уравнений (3) и (4) является формула коэффициента прохождения колебательной скорости α:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \dfrac{m}{2\mu \cdot \cos\theta}}. \tag{6}$$

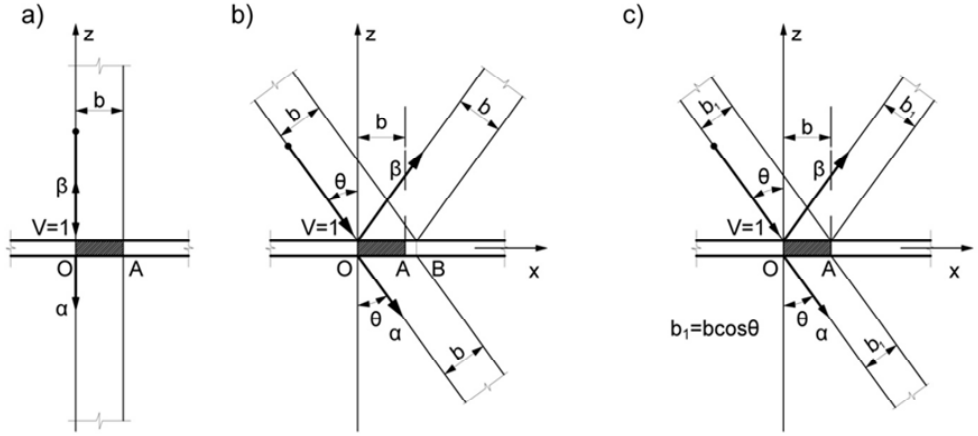


Рис. 3. Схема прохождения звукового луча через звукоизолирующую пластину:
a – при нормальном падении луча; b – при косом падении луча с разрывом массивного слоя и несоблюдением условия неразрывности; c – при косом падении луча с соблюдением условия неразрывности, с шириной следа луча, совпадающей с шириной участка пластины

При нормальном падении звука на пластину, при θ, равном 0, значение коэффициента α будет максимальным, а звукоизоляции – минимальным. Именно такой, самый неблагоприятный случай целесообразно рассматривать в инженерных расчётах. По определению звукоизоляции, для первого участка стандартного частотного спектра, когда пластина с точки зрения метода «сосредоточенных параметров» рассматривается как твёрдый, несжимаемый объект, можно записать формулу

$$R_1 = 10\lg\frac{1}{\alpha^2} = 10\lg\left(1 + \frac{m}{2\mu_a\cos\theta}\right)^2 = \\ = 10\lg\left(1 + \frac{\pi m}{\rho_0\lambda_0\cos\theta}\right)^2 = 10\lg\left(1 + \frac{\pi m f}{\rho_0 c_0\cos\theta}\right)^2, \tag{7}$$

где μ_a – приведённая масса рассматриваемого фрагмента воздуха, кг; λ_0 – длина волны в воздухе, м.

После частоты волнового совпадения пластина (ограждающая конструкция) будет представлять собой среду распространения звуковых волн и обозначаться в аналогичных уравнениях приведённой массой $\mu_{pl.}$ Тогда формула звукоизоляции на втором участке стандартного частотного спектра будет иметь следующий вид:

$$R_2 = 10\lg\frac{1}{\alpha^2} = 10\lg\left(1 + \frac{\mu_{pl.}}{2\mu_a\cos\theta}\right)^2 = \\ = 10\lg\left(1 + \frac{m}{2\rho_0\lambda_0\cos\theta}\right)^2 = 10\lg\left(1 + \frac{mf}{2\rho_0 c_0\cos\theta}\right)^2, \tag{8}$$

где $\mu_{pl.}$ – приведённая масса рассматриваемой перегородки, кг.

После упрощения и вычитания поправок на резонансные явления в пластине на первом частотном диапазоне ($\Delta R_{res.}$≈6 дБ) для случая нормального падения формулы (7) и (8) будут иметь вид:

$$R_{tot.1} = 20\lg fm - 48; \tag{9}$$

$$R_{tot.2} = 20\lg fm - 58. \tag{10}$$

Формула для нахождения звукоизоляции на первом частотном диапазоне, соответствующая традиционной записи «закона масс» для нормального падения звука (1), частично не совпадает с формулой (7) [13]. Численно значения суммы квадратов и квадрата суммы будут различаться (11). Особенно это будет выражено для лёгких перегородок на низких частотах: разница составит от 20 до 40 %, что может объяснить более пологий наклон прямой звукоизоляции на первом участке для лёгких перегородок по сравнению с графиком массивных ограждений (см. рис. 1, 2).

$$1+\left(\frac{\pi mf}{\rho_0 c_0}\right)^2 < \left(1+\frac{\pi mf}{\rho_0 c_0}\right)^2 = 1+\frac{2\pi mf}{\rho_0 c_0}+\left(\frac{\pi mf}{\rho_0 c_0}\right)^2. \tag{11}$$

Одним из объяснений более пологого наклона расчётной кривой для первого частотного диапазона лёгких ограждений является повышение звукоизоляции за счёт прилегающего с двух сторон воздуха [13]. Приведённые массы воздуха μ_a с двух сторон пластины, выражаемой сосредоточенной массой m_{pl} до частоты волнового совпадения и приведённой массой μ_{pl} после частоты волнового совпадения, оказывают демпфирующее действие. Через законы сохранения количества движения и кинетической энергии это записывается в виде уравнений

$$m_{pl.} \cdot v = m_{pl.} \cdot v \cdot \beta + (2\mu_a) \cdot v \cdot \alpha_1; \tag{12}$$

$$\frac{m_{pl.} \cdot v^2}{2} = \frac{m_{pl.} \cdot (\beta v)^2}{2} + \frac{(2\mu_a) \cdot (\alpha_1 v)^2}{2}. \tag{13}$$

Решением данной системы являются выражения коэффициентов прохождения колебательной скорости из пластины в воздух до волнового совпадения (14) и после волнового совпадения (15).

$$\alpha_1 = \frac{m_{pl.}}{2\mu_a + m_{pl.}}; \tag{14}$$

$$\alpha_2 = \frac{\mu_{pl.}}{2\mu_a + \mu_{pl.}}. \tag{15}$$

Тогда формулы для поправок к звукоизоляции на первом и втором условных частотных диапазонах будут выглядеть следующим образом:

$$\Delta R_{\alpha 1} = 10\lg(\alpha_1^2) = 10\lg\left(\frac{m_{pl.}}{2\mu_a + m_{pl.}}\right)^2, f < f_{L.}, \text{ дБ}; \tag{16}$$

$$\Delta R_{\alpha 2} = 10\lg(\alpha_2^2) = 10\lg\left(\frac{\mu_{pl.}}{2\mu_a + \mu_{pl.}}\right)^2, f > f_{L.}, \text{ дБ}, \tag{17}$$

где $f_{L.}$ – частота волнового совпадения, Гц.

В закреплённой пластине конечных размеров возникают наложения амплитуд возникающих и отражённых от торцов изгибных волн [13, 14]. Передача энергии колебаний от пластины к примыкающим конструкциям также описывается через упругое взаимодействие дискретных объектов: приведённых масс пластины и контура (конструкции) закрепления. Через закон сохранения количества движения и закон сохранения кинетической энергии можно записать следующие уравнения:

$$\mu_{pl.} \cdot v = \mu_{pl.} \cdot v \cdot \beta + \mu_{w.} \cdot v \cdot \alpha; \tag{18}$$

$$\frac{\mu_{pl.} \cdot v^2}{2} = \frac{\mu_{pl.} \cdot (\beta v)^2}{2} + \frac{\mu_w \cdot (\alpha v)^2}{2}, \tag{19}$$

где μ_w – приведённая масса примыкающей стены акустической камеры, кг, при изгибных волнах.

Из совместного решения уравнений (18) и (19) находятся коэффициенты отражения колебательной скорости β_1 и β_2 при двухстороннем закреплении пластины (при линейной постановке задачи).

$$\beta_1 = \beta_2 = \frac{\mu_{pl.} - \mu_{w.}}{\mu_{pl.} + \mu_{w.}}. \tag{20}$$

Поправка на резонансы с учётом потерь на внутреннее трение может быть найдена по следующей формуле [14, 15]:

$$\Delta R_{res.} = 10\lg\left[1 \cdot \left[n_{hw.}\right]^{-1} \cdot \left[\frac{\left(1 + a^{n_{hw.}} \cdot \beta_2\right)}{\left(1 - a^{2n_{hw.}} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2\right)^{-1}}\right] \cdot \left[\frac{\left(1 - a^{n_{hw.} \cdot 2^{-1}}\right)}{\left(1 - a^{0,5}\right)^{-1}}\right]\right]; \tag{21}$$

здесь $n_{hw.}$ – количество полуволн, укладывающихся по длине элемента на рассматриваемой частоте резонанса; β_1, β_2 – коэффициенты отражения колебательной скорости от краёв элемента ограждения; $a=e^{-\pi\Sigma\eta m+\eta e}$ – затухание на одну длину волны упругих колебаний при коэффициентах потерь в материале η_m и на излучение η_e.

Следует отметить, что на вид частотной кривой оказывает влияние характер закрепления (жёсткий или упругий) лёгкой пластины в прилегающих конструкциях. В данной статье рассматривается наиболее часто встречающийся вариант неупругого шарнирного закрепления. Подробно данный вопрос освещается в работе В.М. Разживина [15].

Итогом данного теоретического подхода являются два уравнения для построения частотной кривой до частоты волнового совпадения и после неё:

$$R_{tot.1} = R_1 - \Delta R_{res.} + \Delta R_{a1}; f < f_{L.}; \tag{22}$$

$$R_{tot.2} = R_2 - \Delta R_{res.} + \Delta R_{a2}; f > f_{L.}. \tag{23}$$

Экспериментальные исследования

В целях получения экспериментального материала натурные измерения были выполнены автором в реверберационных камерах НИИСФ. Камеры разделены на два помещения: изолированную камеру низкого уровня (КНУ) с объёмом 112 м^3 и камеру с источником звука, камеру высокого уровня (КВУ), имеющую объём 200 м^3 (рис. 4). Для монтажа испытываемых образцов лёгких ограждений из различных материалов в проёме между камерами высокого уровня (КВУ) и низкого уровня (КНУ) была возведена стенка из каркаса и пяти гипсокартонных листов “Gyproc Strong Acustic” толщиной 15 мм, плотностью 733 кг/м^3. В стенке выполнялся монтажный проём шириной 0,74 м, высотой 1.0 м. Стены, пол, двери и перекрытие КНУ обладают

высокой звукоизоляцией за счёт массивности и многослойности конструкций. Стены камер кирпичные, средней толщиной 600 мм, перекрытия – железобетонные плиты толщиной 200 мм.

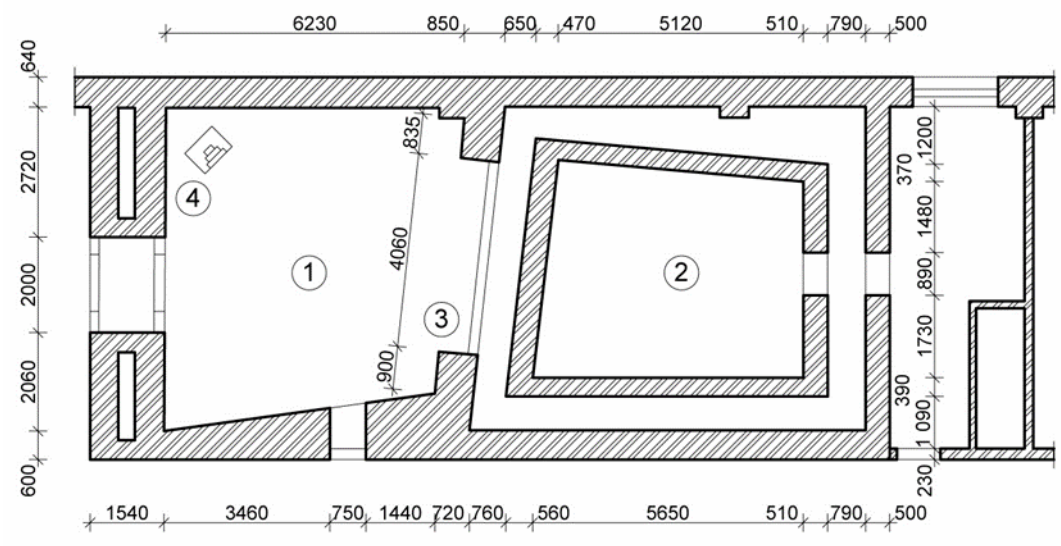


Рис. 4. Схема устройства реверберационных камер (план):
1 – камера высокого уровня (V= 200 м^3); 2 – камера низкого уровня (V= 112 м^3);
3 – испытываемая конструкция; 4 –источник звука типа 4224

Были проведены измерения звукоизоляции пяти лёгких однослойных перегородок из гипсокартона, стали, асбестоцемента, оргстекла, силикатного стекла, конструкции №1-5 (см. таблицу). Примеры построенных частотных кривых для лёгких однослойных перегородок №1, 4, 5 представлены на рис. 5, 6, 7. Экспериментальные данные для конструкций 6-8 были взяты из [5], для конструкций 9, 10 – из [15].

Результаты

Средние значения отклонений от эксперимента на среднегеометрических частотах октавных полос, вычисленные по методу сосредоточенных параметров, полному и упрощённому (по формулам (9), (10)) для 10 лёгких строительных ограждений, приблизительно соответствуют полученным по методике СП и методике самосогласования звуковых полей.

Оценка точности измерения используемых методов расчёта звукоизоляции для лёгких однослойных строительных перегородок

№ п/п	Состав конструкции стены	Состав примыкающей конструкции	Габаритные размеры перегородки	Среднее арифметическое отклонение от эксперимента			
				Метод СП	Метод самосогласования звуковых полей	Упрощённый метод сосредоточенных параметров	Полный метод сосредоточенных параметров
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Гипсокартонный лист – 9,5 мм	5 слоёв акустического гипсокартона по 12,5 мм на стальном каркасе	0,995×0,745	3,0	2,1	4,6	3,9

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8
2	Стальной лист – 2 мм	5 слоёв акустического гипсокартона по 12,5 мм на стальном каркасе	0,995×0,74	2,2	5,3	2,9	1,9
3	Асбестоцемент-ный лист – 10 мм	5 слоёв акустического гипсокартона по 12,5 мм на стальном каркасе	0,995×0,74	1,7	5 ,2	2,8	1,9
4	Оргстекло – 2 мм	5 слоёв акустического гипсокартона по 12,5 мм на стальном каркасе	1,0×0,74	2,8	2,3	3,6	1,8
5	Стекло силикат-ное – 4 мм	5 слоёв акустического гипсокартона по 12,5 мм на стальном каркасе	1,0×0,74	2,8	3,2	5,1	4,0
6	Гипсоволокнистый лист – 12,5 мм	Железобетон – 150 мм	1,0×0,5	3,5	2,3	4,4	4,4
7	Древесно-стружеч-ная плита – 23 мм	Кирпичные стены – 380 мм	1,20×1,08	2,8	2,0	4,5	3,8
8	Оргстекло – 15 мм	Кирпичные стены – 380 мм	1,20×1,08	3,0	2,7	3,4	3,2
9	Алюминиевый лист – 1,5 мм	Кирпичные стены – 380 мм	1,02×0,48	0,9	1,7	2,0	3,2
10	Дюралюминиевый лист – 5 мм	Кирпичные стены – 380 мм	1,00×0,50	3,4	3,6	4,1	2,3
			Итого:	2,6	3,0	3,7	3,0

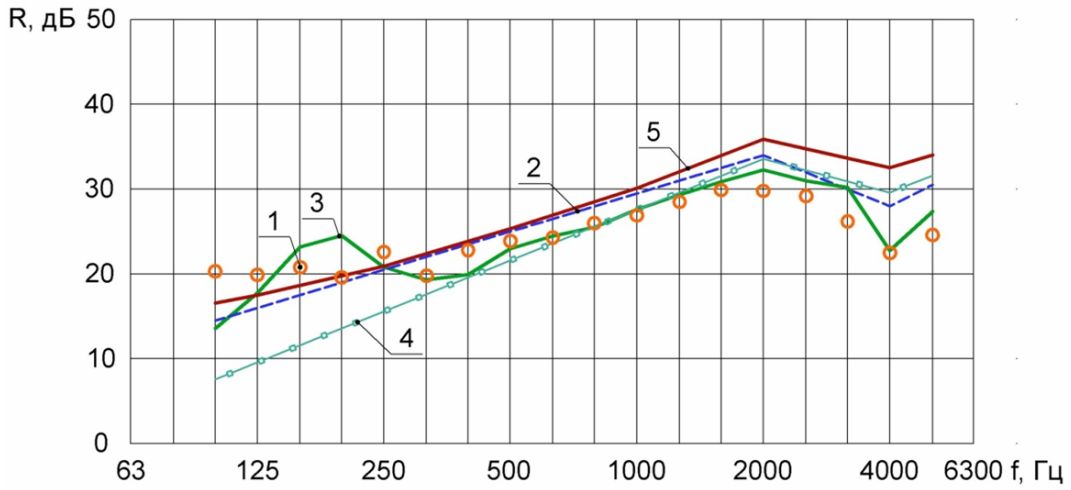


Рис. 5. Кривые звукоизоляции для гипсокартонного листа, *h*=9,5 мм:
1 – натурные измерения; 2 – по методике СП; 3 – по методу теории самосогласования звуковых полей; 4 – по упрощённому методу сосредоточенных параметров, по формулам (9), (10); 5 – по методу сосредоточенных параметров, формулы (22) и (23)

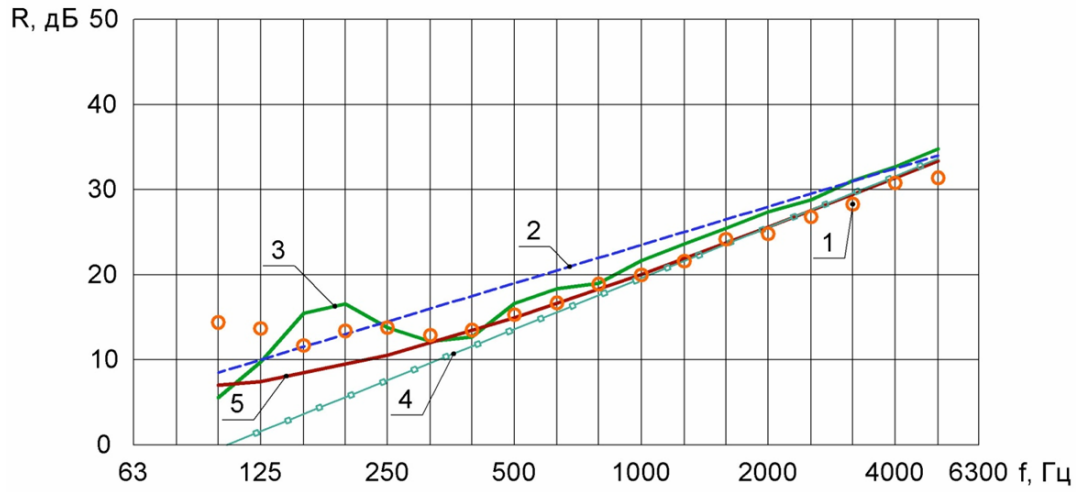


Рис. 6. Кривые звукоизоляции для оргстекла, *h*=2 мм:
1 – натурные измерения; 2 – по методике СП; 3 – по методу теории самосогласования звуковых полей; 4 – по упрощённому методу сосредоточенных параметров, по формулам (9), (10); 5 – по методу сосредоточенных параметров, формулы (22) и (23)

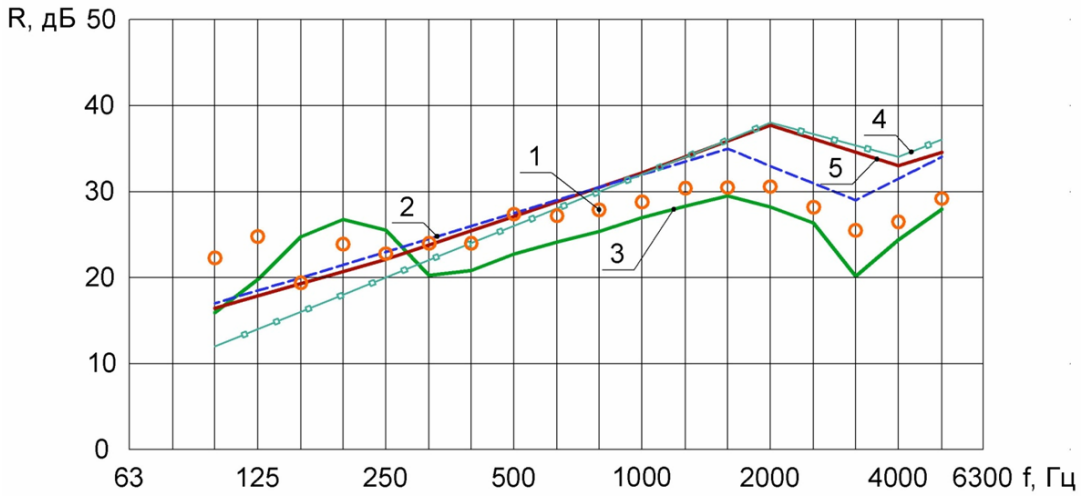


Рис. 7. Кривые звукоизоляции для силикатного стекла, *h*=4 мм:
1 – натурные измерения; 2 –по методике СП; 3 – по методу теории самосогласования звуковых полей; 4 –по упрощённому методу сосредоточенных параметров, по формулам (9), (10); 5 – по методу сосредоточенных параметров, формулы (22) и (23)

Выводы

1. Законы сохранения количества движения и кинетической энергии, применяемые для рассмотрения процесса передачи звуковой энергии в материальных средах при соблюдении условий неразрывности на границах сред, позволяют получить непротиворечивую физическую модель, ложащуюся в основу метода «сосредоточенных параметров».

2. Применение метода «сосредоточенных параметров» для вычисления звукоизоляции тонких лёгких ограждений позволяет получить и теоретически объяснить вид стандартной частотной кривой СП, учитывая резонансные явления в пластине и демпфирующее действие воздуха с двух её сторон.

3. Сравнение результатов вычислений звукоизоляции для образцов лёгких пластин с экспериментальными данными, полученными автором и взятыми из открытых источников, позволяет заключить, что «метод сосредоточенных параметров» по точности сопоставим с методами СП и методом на основе теории «самосогласования звуковых полей».

Вместе с тем представленные в статье физическая модель и расчётный метод требуют дальнейшего совершенствования и дополнения в целях повышения точности расчётов и учёта ряда акустических явлений.

Автор выражает благодарность директору НИИСФ РААСН, д.т.н. Шубину И.Л. и младшему научному сотруднику Тихомирову Л.А. за помощь в проведении экспериментальных измерений.

Список литературы

1. Cremer, L. Die wissen schaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band III. Wellentheorie Raumakustik / L. Cremer. – Leipzig: Published by S. Hirzel, 1950. – 355 p.

2. Заборов, В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций / В.И. Заборов. – М.: Изд. лит. по строит, 1969. – 186 с.

3. Клюкин, И.Н. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах / И.Н. Клюкин. – Л.: Судостроение, 1971. – 416 с.

4. Седов, М.С. Звукоизоляция / М.С. Седов // Техническая акустика транспортных машин: справочник / под ред. д-ра техн. наук, профессора Н.И. Иванова. – СПб.: Политехника, 1992. – Гл. 4. – С.68–106.

5. Бобылев, В.Н. Резервы повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций: монография. / В.Н. Бобылев, Д.В. Монич, В.А. Тишков, П.А. Гребнев. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2014. – 118 с.

6. Овсянников, С.Н. Развитие теории статистического энергетического анализа для расчета звукоизоляции в гражданских зданиях / С.Н. Овсянников // Вестник ТГАСУ. – Томск: Изд-во Томского ГАСУ, 2000. – № 1. – С. 72–83.

7. Ovsyannikov, S.N. Calculation Model of Sound and Vibration Propagation in a Building Fragment Based on the Method of Statistical Energy Analysis / S.N. Ovsyannikov, O.V. Leliuga, V.A. Gradov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – №753(4). – P. 042006. – URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/753/4/042006 (Дата обращения: 07.01.23).

8. Zdražilova, N. Analysis of Predictive Calculation Methods of Airborne Sound Insulation. / N. Zdražilova, D. Donova, I. Skotnicova // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 2016. – Vol. 835 – P. 573-578. – URL: doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.835, 573 (Дата обращения: 07.01.23)

9. Huang, X.F. Prediction on Sound Insulation to a Single-Leaf Wall. / X.F. Huang, Z.X. Yang, Y. Yang // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 2824. – P. 594–597. – URL://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.594-597.2824 (Дата обращения: 07.01.23).

10. Захаров, А.В. Дискретные модели прохождения волн при расчетах звукоизоляции в зданиях / А.В. Захаров // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 11. – С. 50–54.

11. Zakharov, Arkadiy. Discrete models upon calculation of soundproofing by solid / Arkadiy Zakharov // International Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2018. – Vol. 119, No. 10 (2108). – P. 439–443. – URL: acadpubl.eu/jsi/2018-119-10/articles/10c/54.pdf (Дата обращения: 07.01.23).

12. Захаров, А.В. О правильных коэффициентах отражения и преломления волн при косом распространении звука через границу сред / А.В. Захаров // Инновации и инвестиции. – 2021. – №6. – С. 103–105.

13. Салтыков, И.П. Расчет звукоизоляции тонких перегородок на основе модели с сосредоточенными параметрами. / И.П. Салтыков // Вестник МГСУ. – 2020. – Т.15, №3. – С. 353–367.

14. Zakharov, A.V. The Influence of Wave Resonance Phenomena on the Sound Insulation of a Single-layer Building Partition in the Application of Calculation Models with the Concentrated Parameters / A.V. Zakharov, I.P. Saltykov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079. – P. 032068. – URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1079/3/032068 (Дата обращения: 07.01.23).

15. Разживин, В.М. Изоляция воздушного шума легкими ограждающими конструкциями зданий с учетом их закрепления: монография / В.М. Разживин. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 120 с.

References

1. Cremer, L. Die wissen schaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band III. Wellentheorie Raumakustik / L. Cremer. – Leipzig: Published by S. Hirzel, 1950. – 355 p.

2. Zaborov, V.I. The Theory of Sound Insulation of Enclosing Structures / V.I. Zaborov. – M.: Construction Literature Publishing, 1969. – 186 p.

3. Kl'ukin, I.N. The Noise and Sound Vibration Abatement on the Ships / I.N. Kl'ukin. – Leningrad: Sudostroyeniye Publishing, 1971. – 416 p.

4. Sedov, M.S. Sound insulation / M.S. Sedov // Technical acoustics of transport vehicles: handbook / Edited by Dr. of Sciences, Professor N. I. Ivanov. – St. Petersburg: Polytechnic, 1992. – Chapter 4. – P. 68–106.

5. Bobylyov, V.N. Reserves for increasing the sound insulation of single-layer enclosing structures. Monography / V.N. Bobylyov, V.A. Tishkov, D.V. Monich, P.A. Grebnev. – Nizhniy Novgorod: NNGASU. – 2014. – 118 p.

6. Ovsyannikov, S.N. Development of the theory of statistical energy analysis for the calculation of sound insulation in civil buildings / S.N. Ovsyannikov // Vestnik TGASU. – Tomsk: TGASU Publishing. – 2000. – №1. – P. 72–83.

7. Ovsyannikov, S.N. Calculation Model of Sound and Vibration Propagation in a Building Fragment Based on the Method of Statistical Energy Analysis / S.N. Ovsyannikov, O.V. Leliuga, V.A. Gradov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – №753(4). – P. 042006. – URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/753/4/042006 (Дата обращения: 07.01.23).

8. Zdražilova, N. Analysis of Predictive Calculation Methods of Airborne Sound Insulation / N. Zdražilova, D. Donova, I. Skotnicova // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 2016. – Vol. 835 – P. 573-578. – URL: doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.835, 573 (Дата обращения: 07.01.23)

9. Huang, X.F. Prediction on Sound Insulation to a Single-Leaf Wall / X.F. Huang, Z.X. Yang, Y. Yang // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 2824. – P. 594–597. – URL://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.594-597.2824 (Дата обращения: 07.01.23).

10. Zakharov, A.V. Discrete models of passage of waves for calculation of sound insulation in buildings / A.V. Zakharov // Promyshlennoye I grazhdanskoye stroitel'stvo. – 2012. – №11. – P. 50–54.

11. Zakharov, Arkadiy. Discrete models upon calculation of soundproofing by solid / Arkadiy Zakharov // International Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2018. – Vol. 119, No. 10 (2108). – P. 439–443. – URL: acadpubl.eu/jsi/2018-119-10/articles/10c/54.pdf (Дата обращения: 07.01.23).

12. Zakharov, A.V. On the correct coefficients of reflection and refraction of waves during oblique propagation of sound through the boundary of media / A.V. Zakharov // Innovacii i investicii. – 2021. – №6. – P. 103–105.

13. Saltykov, I.P. Sound insulation design of the thin partitions on the base of concentrated parameters model / I.P. Saltykov // Vestnik MGSU. – 2020. – Vol.15, №3. – P. 353–367.

14. Zakharov, A.V. The Influence of Wave Resonance Phenomena on the Sound Insulation of a Single-layer Building Partition in the Application of Calculation Models with the Concentrated Parameters / A.V. Zakharov, I.P. Saltykov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079. – P. 032068. – URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1079/3/032068 (Дата обращения: 07.01.23).

15. Razzhivin, V.M. The air noise insulation by the use of lightweight enclosing structures of the buildings, subject to their fastening: monograph / V.M. Razzhivin. – Penza: PGUAS, 2014. – 120 p.

УДК 624.01 DOI 10.54734/20722958_2023_2_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

Ласьков Сергей Николаевич,
ассистент кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: laskovsn@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

Laskov Sergey Nikolaevich,
Assistant of the Department «Building Structures»
E-mail: laskovsn@yandex.ru

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОПОРНОЙ ЗОНЫ БАЛОК СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ УЗЛОВ СО СКРЫТОЙ КОНСОЛЬЮ

С.Н. Ласьков

Анализируется напряженное состояние опорных зон балок сборно-монолитных узлов со скрытой консолью. Сложное напряженное состояние опорных зон сборно-монолитных узлов сведено к эквивалентному одноосному. Для получения качественной картины распределения напряжений выполнено компьютерное моделирование, которое позволило оценить сопротивление разрушению сжатого бетона при разрыве от действия растягивающих напряжений и сдвиге от действия касательных напряжений.

Ключевые слова: сборно-монолитные узлы, скрытая консоль, опорная зона балок, схемы распределения напряжений

STRESS STATE OF THE SUPPORT ZONE OF BEAMS OF PREFABRICATED MONOLITHIC UNITS WITH A HIDDEN CONSOLE

S.N. Laskov

The stress state of the support zones of beams of prefabricated monolithic units with a hidden console is analyzed. The complex stress state of the support zones of prefabricated monolithic units is reduced to an equivalent uniaxial one. To obtain a qualitative picture of the stress distribution, computer modeling was performed, which made it possible to estimate the fracture resistance of compressed concrete at rupture from the action of tensile stresses and shear from the action of tangential stresses.

Keywords: prefabricated monolithic units, hidden console, support zone of beams, stress distribution schemes

Обобщенные характеристики прочности бетона по работам Т.И. Барановой и В.А. Комарова принято представлять в виде предельных поверхностей разрушения, для построения которых требуется проведение большого количества сложных экспериментов. Поэтому на практике используются критерии прочности, полученные по упрощенной гипотезе разрушения при сложном напряженном состоянии [1, 2]. При этом при принятых критериях прочности любое сложное напряженное состояние сводится к эквивалентному одноосному напряжению.

Детальная оценка напряженного состояния при испытании натурных образцов опорных зон балок сборно-монолитных узлов практически невозможна ввиду сложности определения величины напряжений в каждой точке пространственного элемента; поэтому для решения данной задачи в этой работе принято использовать компьютерные модели образцов.

Моделирование работы сборно-монолитных узлов балок выполнялось конечными элементами в ПК Лира 9.6. При моделировании применялись физически нелинейные

четырехугольные конечные элементы плоской задачи КЭ-230 в ПК Лира 9.6 (рис. 1). Характеристики бетона принимались с начальным модулем упругости $E_b = 30000$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,2$. Арматура моделировалась заданием процента армирования конечных элементов вдоль соответствующих осей.

В расчетных схемах приняты следующие допущения:

- бетон в приопорной части балки находится в условиях плоского напряженного состояния;
- фактическая схема армирования в расчетной схеме описывается с применением двух материалов со своими модулями деформации.

а

б

в

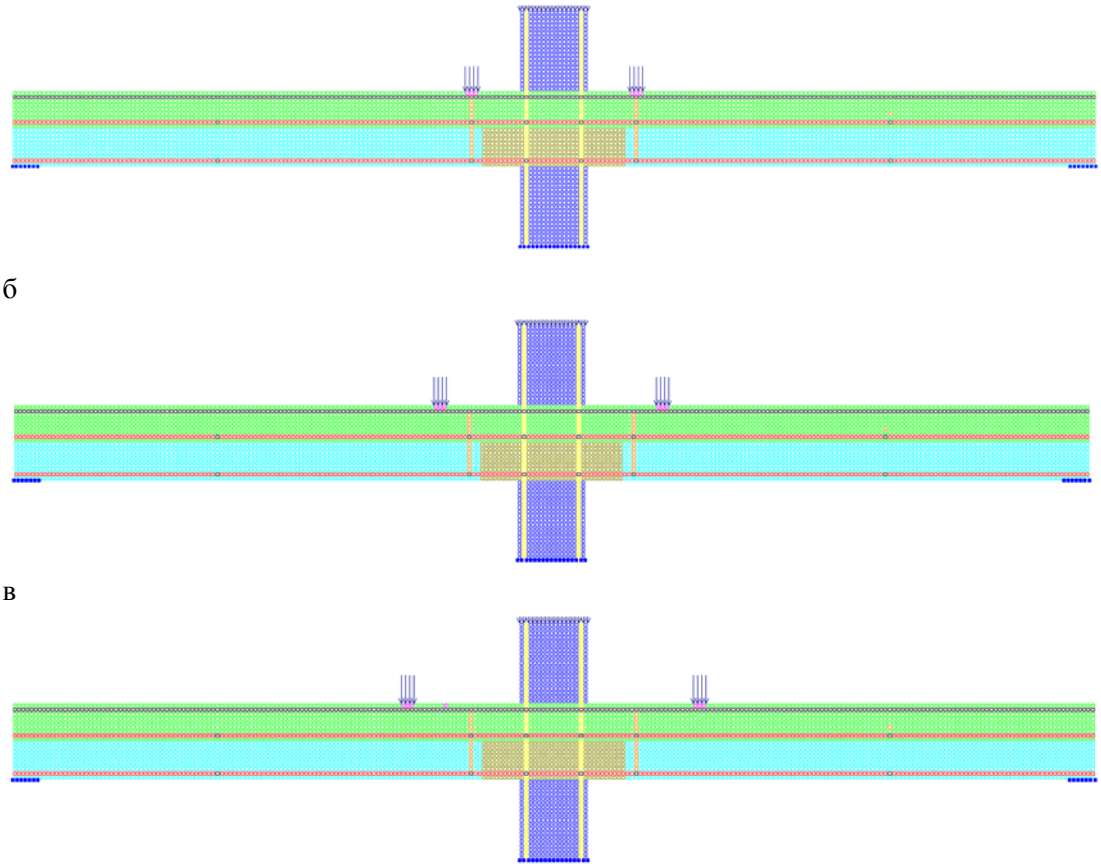


Рис. 1. Компьютерные расчетные модели образцов в ПК Лира 9.6 при расстоянии от оси действия расчетной силы до оси опоры скрытой консоли узла:
а – $0,9 \cdot h_{01}$; б – $1,5 \cdot h_{01}$; в – $2,5 \cdot h_{01}$

Нагружение образцов производилось симметрично сосредоточенными силами с пролетами среза $a = 0,9 \cdot h_{01}$; $a = 1,5 \cdot h_{01}$; $a = 2,5 \cdot h_{01}$, где h_{01} – рабочая высота балки над скрытой консолью.

При анализе результатов компьютерного моделирования основное внимание уделялось оценке качественной картины напряженного состояния.

В исследованиях изучалось напряженное состояние приопорного участка сопряжения балки с колонной при соотношении $a/h_{01} = 0,9;1,5;2,5$ (a – расстояние от оси действия расчетной силы до оси опоры скрытой консоли узла, h_{01} – расчетная высота монолитной части балки). В опытных образцах высота сборно-монолитной балки 450 мм, ширина 200 мм. Сечение составной колонны 400×200 мм. Высота сборной балки – 225 мм, длина и высота скрытой консоли принята 225 мм. Бетон сборных и монолитных элементов принят класса В25, арматура – класса А400.

Приопорные части балки армированы замкнутыми сосредоточенными хомутами на всю высоту сборно-монолитной балки. Для обеспечения совместной работы сборно-монолитных элементов узла в балках предусмотрены выпуски продольной и поперечной арматуры.

При сборке узла элементы балок и колонн устанавливались на поддерживающие конструкции, затем выполнялось армирование и бетонирование скрытой консоли колонны, объединяющей две сборные балки, и далее – армирование и бетонирование монолитных частей балок. На рис. 2 показаны сборно-монолитный узел и монтаж узла из сборных элементов.

Компьютерные модели принимались подобно опытным образцам.

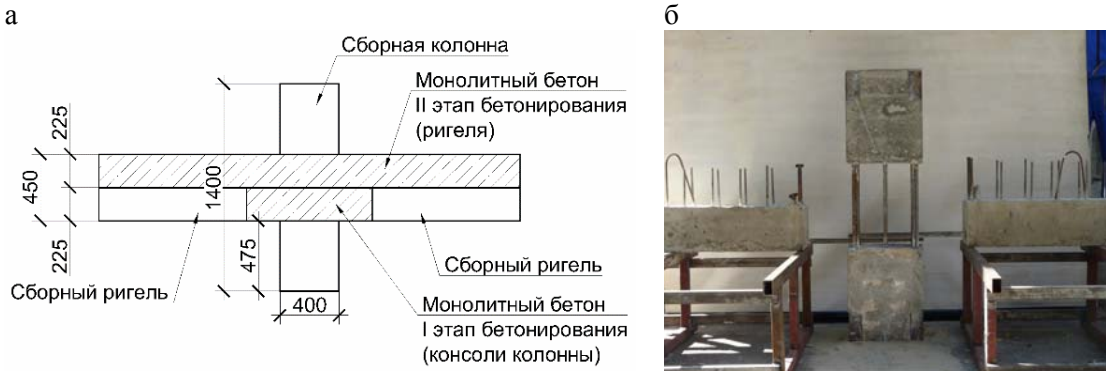


Рис. 2. Сборно-монолитный узел:
а – опалубочный чертеж; б – монтаж узла из сборных элементов

Анализ напряженного состояния. Характер распределения нормальных σ_x и σ_y, главных сжимающих σ_1 и касательных τ_{xy} напряжений показан на рис. 3-14 с выделением характерных зон. Усиление интенсивности цвета зон характеризует увеличение численных значений соответствующих напряжений.

Установлено, что при небольших пролетах среза ($a/h_0 \le 0,9$) происходит концентрация главных сжимающих напряжений σ_1 в нижнем углу сопряжения балки с колонной и под грузовой площадкой. В результате возникают два сжатых участка бетона, расположенные между грузовой площадкой и узлом сопряжения балки с колонной. При переходе в глубь колонны происходит концентрация напряжений в месте пересечения продольной арматуры балки и вертикальной арматуры колонны (см. рис. 6).

Анализ распределения траекторий главных сжимающих напряжений σ_1 показывает, что с ростом пролета среза a/h_0 от 0,9 до 2,5 изменяется их угол наклона в наклонной полосе бетона, которая располагается между грузовой площадкой и нижним углом сопряжения балки с колонной. При этом в их распределении наблюдается Х-образный характер расположения наклонных полос, в пределах которых концентрируются главные сжимающие напряжения до образования трещин (см. рис. 6, 10, 14).

В результате анализа изополей распределения касательных напряжений τ_{xy} установлено, что имеется их концентрация в местах концентраций главных сжимающих напряжений σ_1, т.е. под грузовой площадкой и под нижним углом сопряжения балки с колонной. Траектории касательных напряжений τ_{xy} в начале и в конце сжатых концентрированных наклонных полос бетона имеют вертикальное направление, а затем траектории концентрации касательных напряжений совпадают с направлением главных сжимающих напряжений (см. рис. 5, 9, 13).

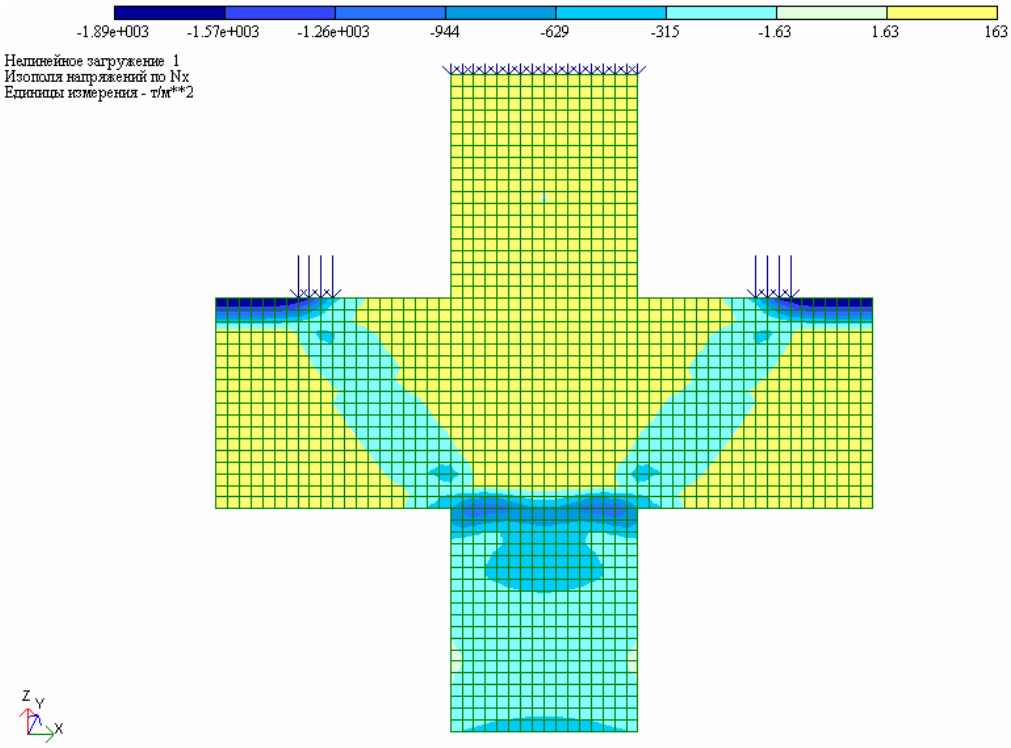


Рис. 3. Характер распределения нормальных напряжений σ_x при $a/h_0 = 0,9$

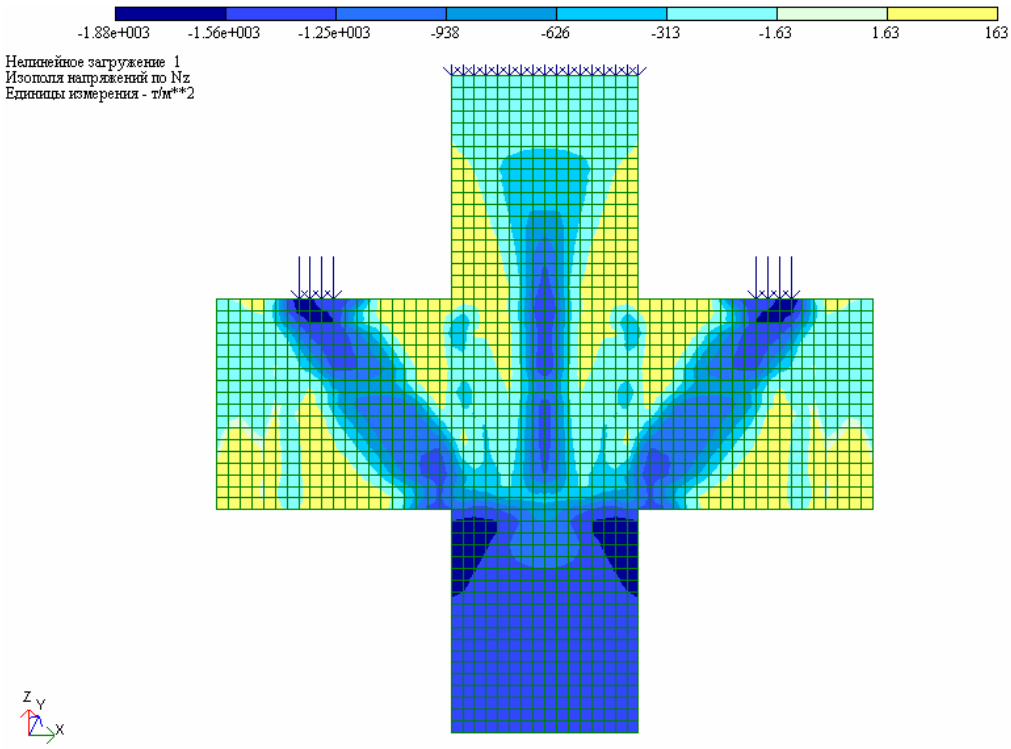


Рис. 4. Характер распределения нормальных напряжений σ_y при $a/h_0 = 0,9$

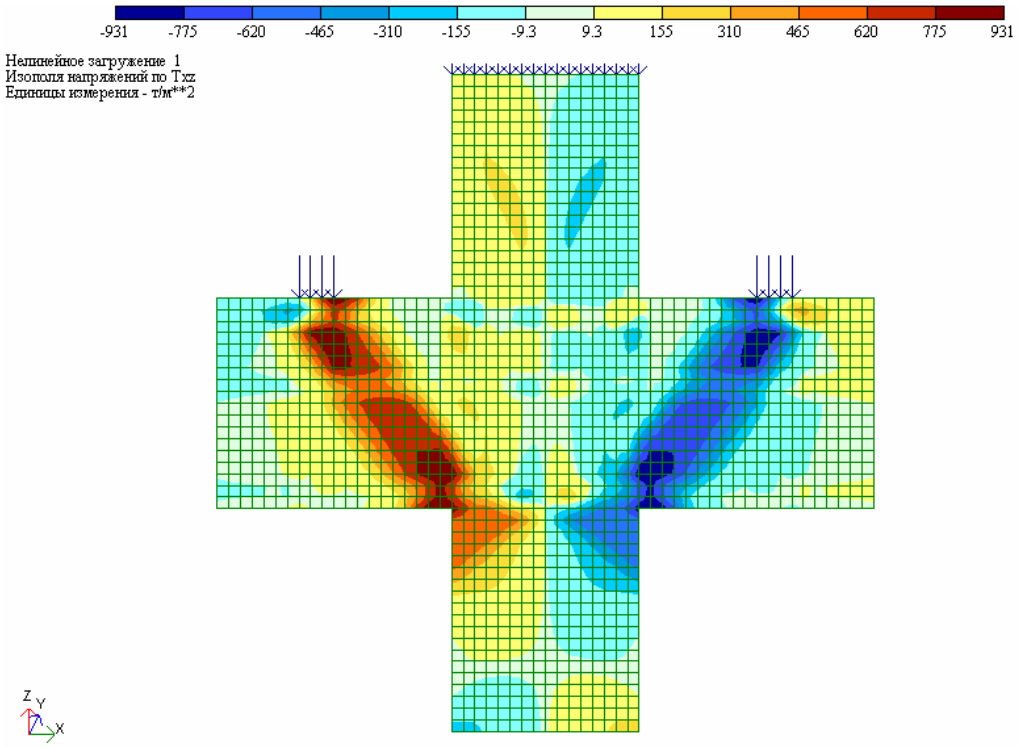


Рис. 5. Характер распределения касательных напряжений τ_{xy} при $a/h_0 = 0,9$

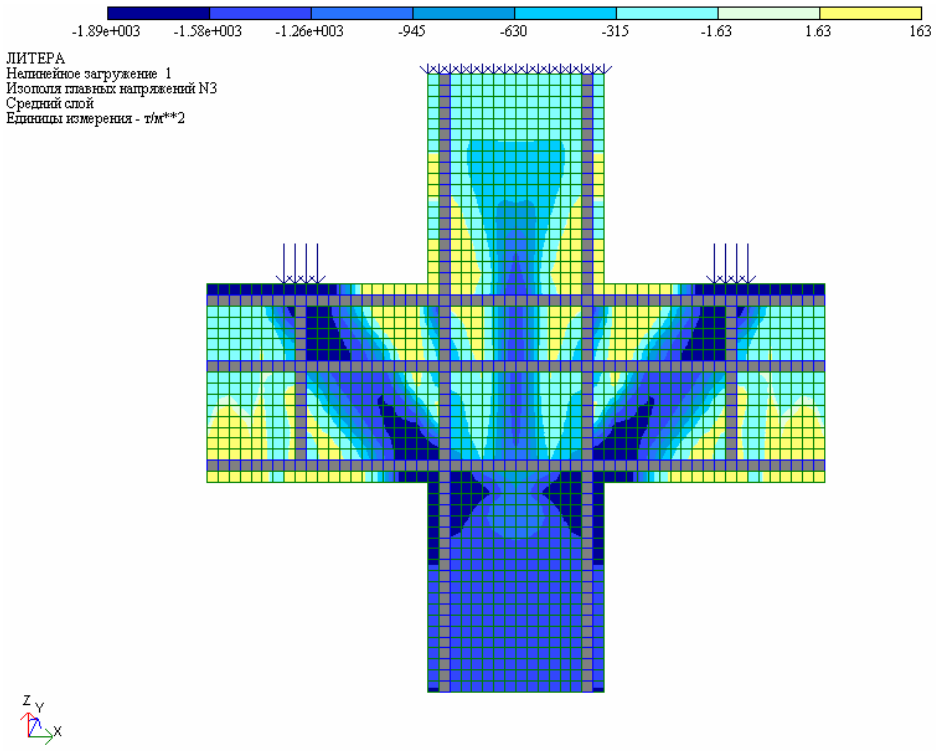


Рис. 6. Характер распределения главных напряжений σ_1 при $a/h_0 = 0,9$

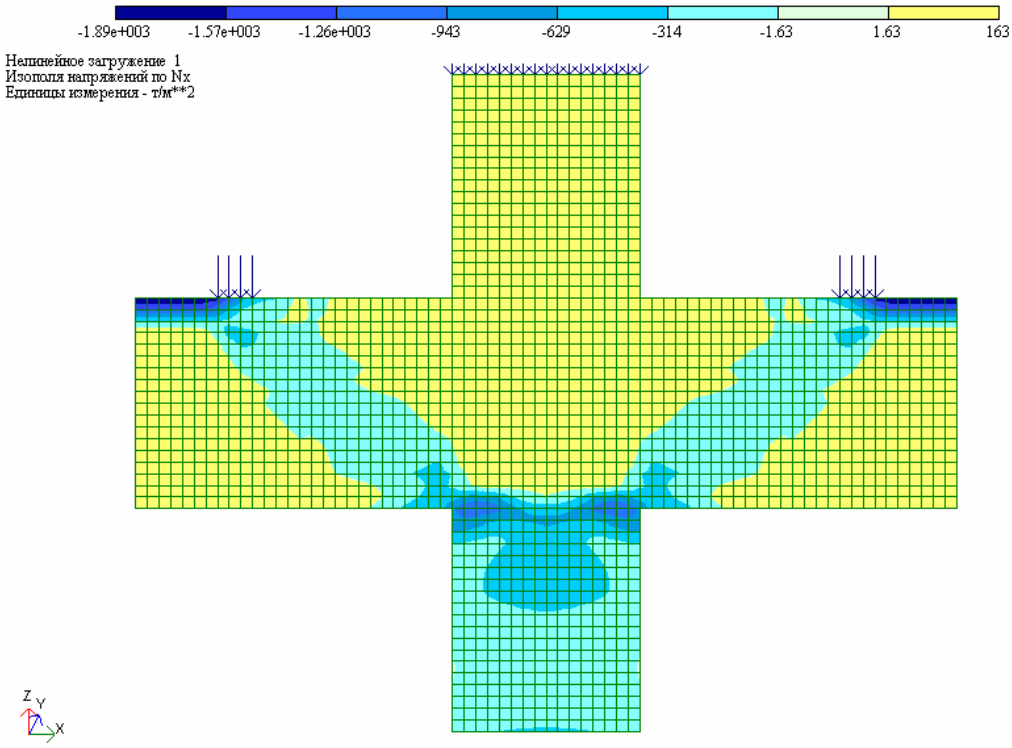


Рис. 7. Характер распределения нормальных напряжений σ_x при $a/h_0 = 1,5$

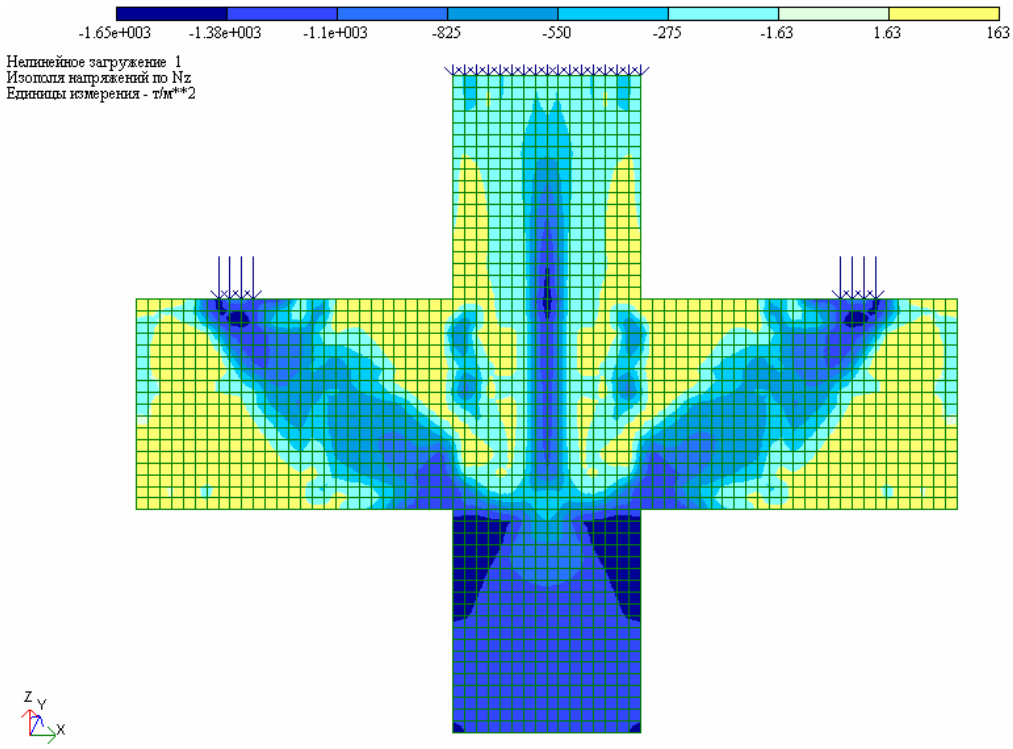


Рис. 8. Характер распределения нормальных напряжений σ_y при $a/h_0 = 1,5$

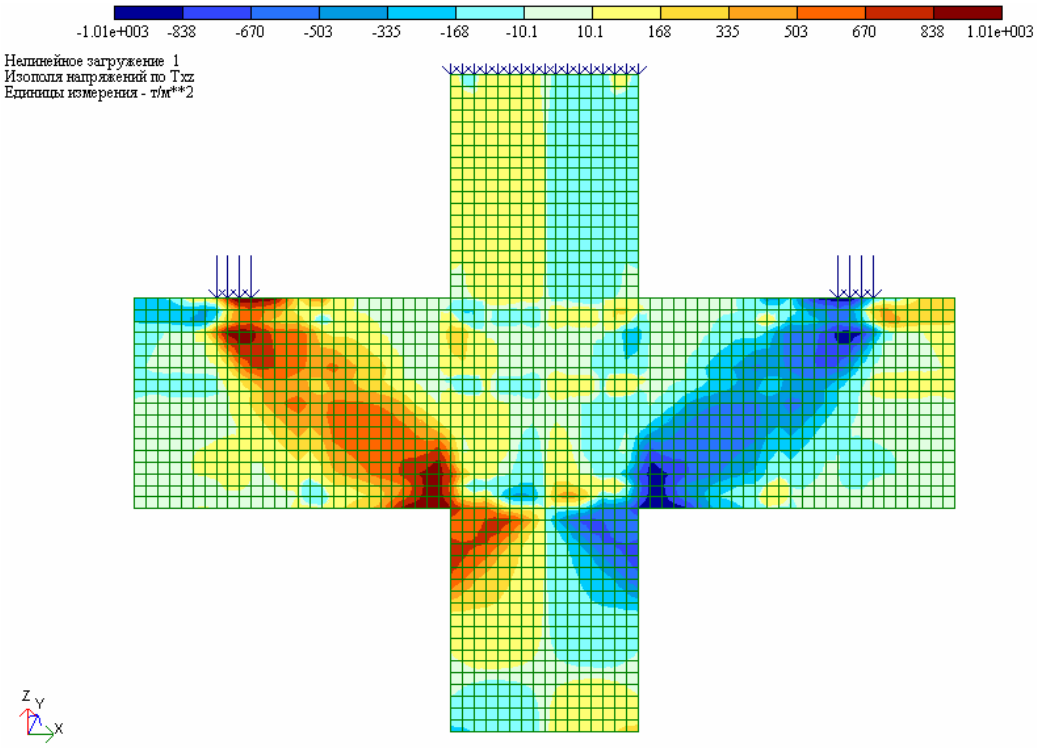


Рис. 9. Характер распределения касательных напряжений τ_{xy} при $a/h_0 = 1,5$

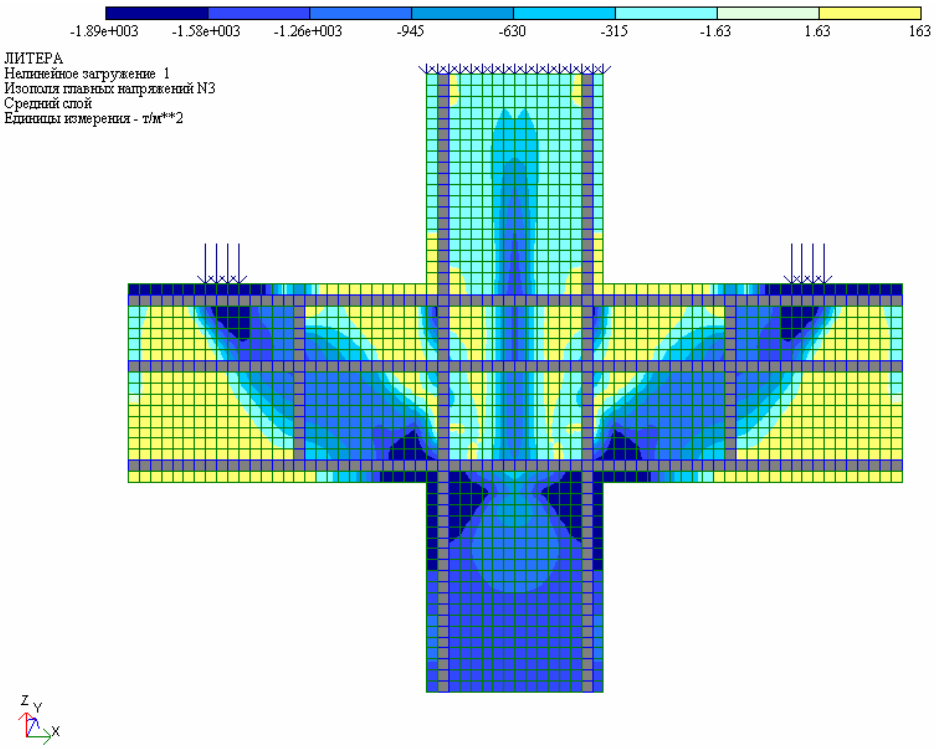


Рис. 10. Характер распределения главных напряжений σ_1 при $a/h_0 = 1,5$

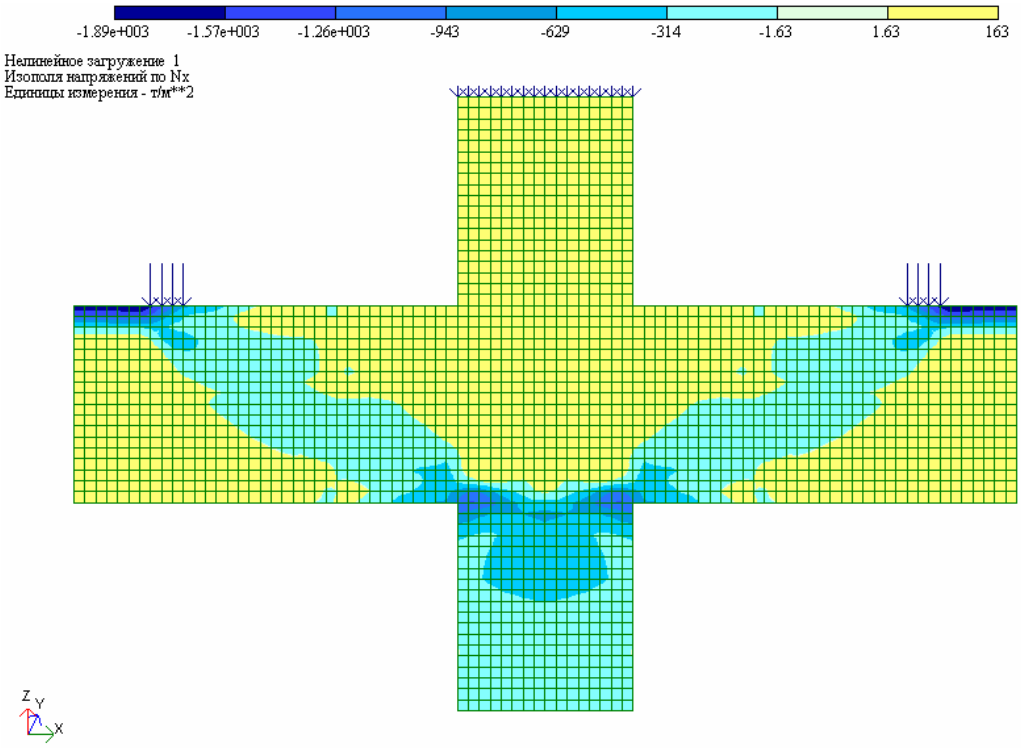


Рис. 11. Характер распределения нормальных напряжений σ_x при $a/h_0 = 2,5$

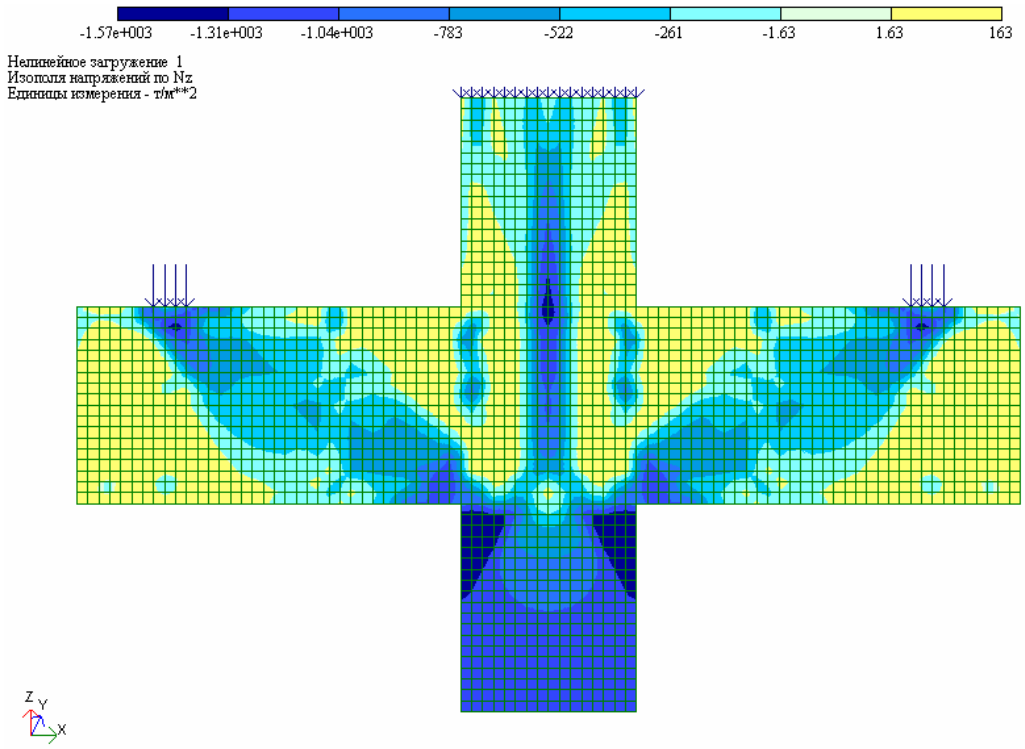


Рис. 12. Характер распределения нормальных напряжений σ_y при $a/h_0 = 2,5$

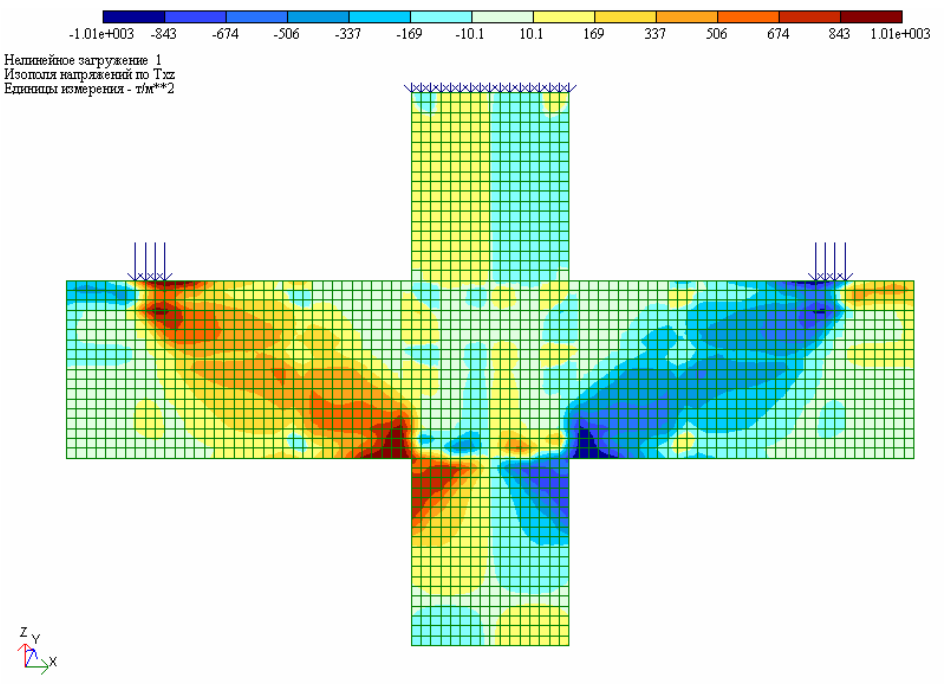


Рис. 13. Характер распределения касательных напряжений τ_{xy} при $a/h_0 = 2,5$

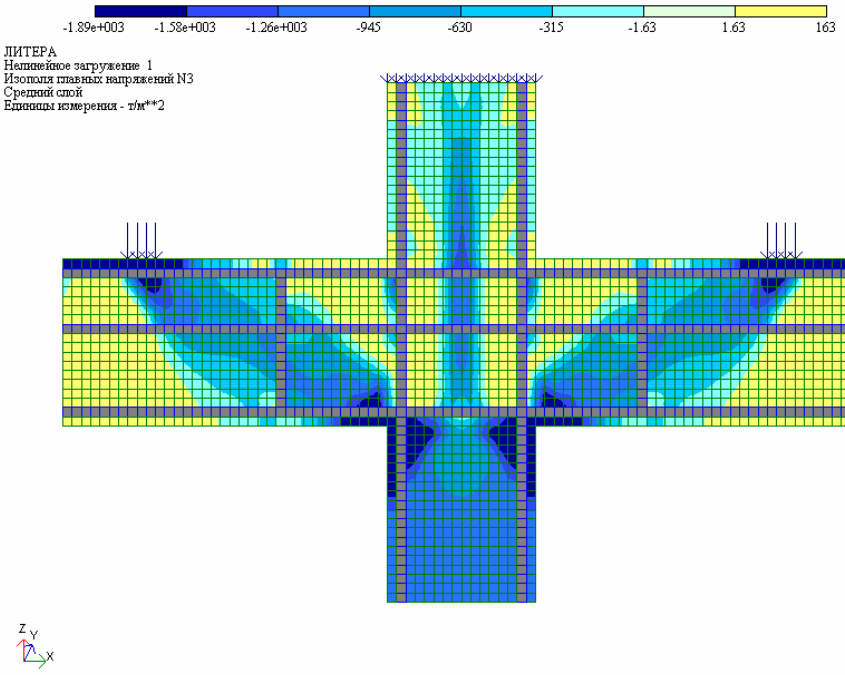


Рис. 14. Характер распределения главных напряжений σ_1 при $a/h_0 = 2,5$

Выводы

1. На прочность сжатых полос бетона приопорных зон балок определяющее влияние оказывают главные сжимающие $\sigma_{1\,max}$ и касательные $\tau_{xy\,max}$ напряжения.

2. Концентрация распределения главных сжимающих напряжений σ_1 при небольших пролетах среза ($a/h_0 \le 0,9$) происходит в нижнем углу сопряжения балки с колонной и под грузовой площадкой, а в колонне – в месте пересечения продольной арматуры балки и вертикальной арматуры колонны.

3. С ростом пролета среза a/h_0 от 0,9 до 2,5 изменяется угол наклона траекторий главных сжимающих напряжений σ_1. При этом в их распределении наблюдается Х-образный характер расположения наклонных полос.

4. Траектории концентрации касательных напряжений τ_{xy} в пределах сжатых концентрированных наклонных полос бетона совпадают с направлением главных сжимающих напряжений.

Список литературы

1. Комаров, В.А. Оценка прочности бетона ригелей с подрезкой многоэтажных каркасов / В.А. Комаров, О.В. Болдырева // Строительная механика и расчет сооружений. – 2016. – №4. – С. 6–9.

2. Комаров, В.А. Напряженно-деформированное состояние консольных опор балок с подрезкой / В.А. Комаров, О.В. Болдырева, А.Ю. Трегуб // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №1. – С. 95–102.

References

1. Komarov, V.A. Assessment of the strength of concrete crossbars with cutting of multi-storey frames / V.A. Komarov, O.V. Boldyreva // Construction mechanics and calculation of structures. – 2016. – No. 4. – P. 6–9.

2. Komarov, V.A. Stressed-deformed state of cantilever supports of beams with cutting / V.A. Komarov, O.V. Boldyreva, A.Yu. Tregub // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1. – P. 95–102.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 66.071.6 DOI 10.54734/20722958_2023_2_106

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

Андреев Сергей Юрьевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Лебединский Константин Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортные машины»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

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

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

Andreev Sergey Yuryevich,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Water Supply, Sewerage and Hydraulic Engineering»
E-mail:andreev3007@rambler.ru

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

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

ПРИНЦИПЫ ВИХРЕВОЙ МИКРОФЛЮИДИКИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В ВЫСОКОГРАДИЕНТНОМ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ

С.Ю. Андреев, К.В. Лебединский, В.А. Князев

Приведены результаты теоретического анализа возможности интенсификации процесса разделения воздуха на кислород и азот в высокоградиентном центробежном поле. Показано, что использование принципов вихревой микрофлюидики, предусматривающих уменьшение размеров камеры сепарации центробежного аппарата до некоторой критической величины, может позволить проявиться новым свойствам потока газовой смеси, при которых величина критерия Рейнольдса становится ниже значения $Re_{кр}$=2300 и обеспечивается полная ламинарность течения, в результате чего устраняется эффект турбулентного перемешивания ее компонентов. Разработана методика расчета центробежных аппаратов с неподвижной камерой сепарации – микроциклонов. Использование предложенной методики расчета позволит оптимизировать технологический процесс разделения воздуха на кислород и азот в высокоградиентном центробежном поле микроциклона.

Ключевые слова: роторная центрифуга, микроциклон, вихревая микрофлюидика, коэффициент разделения, критерий Рейнольдса, критерий Фруда, динамическое подобие, геометрическое подобие

PRINCIPLES OF VORTEX MICROFLUIDICS FOR INTENSIFICATION OF SEPARATION OF GAS MIXTURES IN A HIGH-GRADIENT CENTRIFUGAL FIELD

S.Y. Andreev, K.V. Lebedinskiy, V.A. Knyazev

The results of a theoretical analysis of the possibility of intensifying the process of air separation into oxygen and nitrogen in a high-gradient centrifugal field are presented. It is shown that the use of the principles of vortex microfluidics, providing size reduction of the separation chamber of the centrifugal apparatus to a certain critical value, can give new properties to the gas mixture flow to manifest, at which the value of the Reynolds criterion becomes lower than the value of $Re_{кр}$=2300 and full laminarity of the flow is ensured, as a result the effect of turbulent mixing of its components is eliminated. A method for calculating centrifugal apparatuses with a fixed separation chamber – microcyclones – has been developed. The use of the proposed calculation method will optimize the technological process of air separation into oxygen and nitrogen in the highly gradient centrifugal field of microcyclone.

Keywords: rotary centrifuge, microcyclone, vortex microfluidics, separation coefficient, Reynolds criterion, Froude criterion, dynamic similarity, geometric simila

Описание кинетики процесса разделения воздуха на кислород и азот в центробежном поле впервые было представлено в статье Ю.Б. Харитона «К вопросу о разделении газов центрифугированием», вышедшей в 1937 году.

Харитон Ю.Б. вывел уравнение, позволяющее получить оценочное значение величины массового расхода отделяемого в центрифуге кислорода воздуха Q_m, кг/с:

$$Q_m = \frac{2\pi l_\mu D_к \upsilon_T^2}{RT} C_0 \left(\mu_к - \mu_{см}\right), \text{ кг/с}, \quad (1)$$

где l_μ – длина ротора центрифуги, l_μ = 1 м; $D_к$ – величина коэффициента молекулярной диффузии кислорода воздуха (при T=300 К и P_0=1·10^5 Па, $D_к$=2,07·10^{-5} м^2/с); υ_T – линейная (тангенциальная) скорость вращения ротора центрифуги (для цилиндрического стального ротора с пределом прочности 100 кгс/мм^2 была принята величина скорости =350 м/с); C_o – концентрация кислорода в газовой смеси на оси центрифуги (было принято допущение о том, что концентрация кислорода на оси центрифуги C_o при малой величине коэффициента разделения $K_р$ равна концентрации кислорода в атмосферном воздухе $C_к$; $C_o \approx C_к$=0,270 кг/м^3); R = 8,31 Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; T=300 К – абсолютная температура газовой смеси (воздуха); $\mu_к$ и $\mu_{см}$ – соответственно молекулярные массы кислорода и самой газовой смеси (воздуха), $\mu_к$=0,032 кг/моль; $\mu_{см}$=0,0288 кг/моль.

Таким образом, по расчетам Ю.Б. Харитона, величина производительности ротора центрифуги длиной $l_\mu = 1м$ должна иметь значение

$$Q_m = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 1 \cdot 2{,}07 \cdot 10^{-5} \cdot 350^2}{8{,}31 \cdot 300} 0{,}27\left(0{,}032 - 0{,}0288\right) = 5 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с} = 0{,}005 \text{ г/с}. \quad (2)$$

В соответствии с формулой (1) интенсивность процесса сепарации компонентов газовой смеси в центробежном аппарате не зависит от его основной геометрической характеристики – величины радиуса r_0 – и определяется лишь значением квадрата тангенциальной скорости движения газовой смеси υ_T^2 на расстоянии r_0 от его оси.

Поскольку в формуле (1) присутствует разность молекулярных масс более тяжелого компонента $\mu_к$, кг/моль, и массы газовой смеси $\mu_{см}$, кг/моль, то при анализе процесса разделения газовой смеси необходимо рассматривать центробежный аппарат объемом, равным объему одного моля W_μ. Аппарат имеет радиус $r_0 = r_\mu$, длину $l_ц$=l_μ, м, и обеспечивает скорость движения газовой смеси на его периферии $\upsilon_{T\mu}$ (см. рисунок).

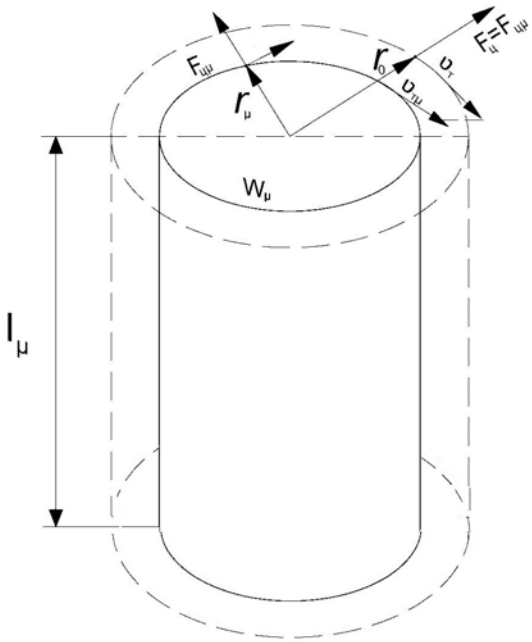


Схема к описанию процесса протекания принудительной молекулярной диффузии тяжелого компонента газовой смеси под действием центробежного поля

На газовую смесь в пристеночном слое центробежного аппарата объемом один моль, имеющего площадь поверхности

$$A_{\mu} = 2\pi r_{\mu} l_{\mu},\ \text{м}^2/\text{моль}, \tag{3}$$

действует центробежная сила, которая повышает парциальное давление тяжелого компонента газовой смеси до значения $P_{r\mu}$ и величина которой может быть определена по формуле

$$F_{\text{ц}\mu} = a_{\text{ц}}\left(\mu_{\text{к}} - \mu_{\text{см}}\right) = \frac{\upsilon_{T\mu}^2}{r_{\mu}}\left(\mu_{\text{к}} - \mu_{\text{см}}\right),\ \text{Н/моль}, \tag{4}$$

где $a_{\text{ц}}$ – ускорение центробежной силы, действующей на тяжелый компонент газовой смеси, м/с^2.

На стенки цилиндра, имеющего площадь поверхности A_{μ}, м^2/моль, также будет действовать сила давления теплового движения молекул газовой смеси. величина которой может быть определена по формуле

$$F_{T\mu} = P \cdot A_{\text{ц}},\ \text{Н/моль}, \tag{5}$$

где P – величина давления теплового движения молекул газовой смеси, Па.

Из уравнения Менделеева – Клайперона имеем

$$RT = P \cdot W_{\mu},\ \text{Дж/моль}. \tag{6}$$

Откуда, с учетом $P = \dfrac{RT}{W_{\mu}}$ и $W_{\mu} = \pi r_{\mu}^2 l_{\mu}$, получим:

$$F_{T\mu} = \frac{RT}{W_{\mu}} \cdot A_{\text{ц}} = \frac{RT}{\pi r_{\mu}^2 l_{\mu}} 2\pi r_{\mu} l_{\mu} = \frac{2RT}{r_{\mu}},\ \text{Н/моль}. \tag{7}$$

Величина давления на стенки цилиндра площадью $A_ц$ центробежной силы $F_ц$, действующей на более тяжелый компонент газовой смеси (с учетом $W_\mu = \pi r_\mu^2 l_\mu$ и $W_\mu = \frac{RT}{P}$) будет иметь значение

$$P_ц = \frac{F_{цм}}{A_\mu} = \frac{a_ц(\mu_к - \mu_{см})}{2\pi r_\mu l_ц}\frac{W_\mu}{W_\mu} = \frac{a_ц(\mu_к - \mu_{см})}{2\pi r_\mu l_\mu}\frac{P}{RT}\pi r_\mu^2 l_\mu = \frac{(\mu_к - \mu_{см})a_ц P}{2RT} r_\mu, \text{Па}. \quad (8)$$

При изменении радиуса на величину dr давление центробежной силы $F_ц$ изменится в соответствии с формулой (8) на значение

$$dP = \frac{P(\mu_к - \mu_{см})a_ц}{2RT}dr, \text{ Па}. \quad (9)$$

Разделяя переменные и интегрируя (9), получаем:

$$\int_{P_0}^{P_{r_\mu}} \frac{dP}{P} = \int_0^{r_\mu} \frac{(\mu_к - \mu_{см})a_ц}{2RT}dr \quad \text{и} \quad \ln\frac{P_{r_0}}{P_0} = \frac{(\mu_к - \mu_{см})a_ц}{2RT} r_\mu, \quad (10)$$

откуда величина коэффициента разделения может быть определена как

$$K_p = \frac{P_{r_0}}{P_0} = \frac{C_{r_0}}{C_0} = e^{\frac{(\mu_к - \mu_{см})a_r}{2RT} r_\mu}, \quad (11)$$

где P_{r_0} и P_0 – соответственно величины парциального давления тяжелого компонента газовой смеси на оси и в пристеночной области аппарата, возникающего при действии центробежной силы $F_{цм}$, Па; C_{r_0} и C_0 – соответственно концентрации тяжелого компонента газовой смеси на оси и в пристеночной области аппарата в состоянии установившегося динамического равновесия, когда величина массового расхода отделяемого компонента равна нулю ($Q_m=0$).

Здесь следует отметить, что распределение парциальных давлений $\frac{P_{r_0}}{P_0}$ по объему газовой смеси в центробежном поле устанавливается в соответствии с потенциалом центробежной силы и разницей молекулярных весов $\Delta\mu$ почти мгновенно, точнее за время, имеющее порядок величины, равной отношению радиуса r_μ и скорости распространения звука в газовой смеси $\upsilon_{зв}$ [1… 3].

Для установления распределения концентрации $\frac{C_{r_\mu}}{C_0}$ требуется более продолжительное время $t_ц$, в течение которого будет достигнуто состояние динамического равновесия и процесс принудительной молекулярной диффузии компонентов газовой смеси под действием центробежного поля прекратится.

В соответствии с формулами (4), (7) и (11) величина коэффициента разделения может быть определена как

$$K_p = e^{\overline{F}}, \quad (12)$$

где $\overline{F}$ – безразмерный критериальный комплекс, определяемый как отношение величины центробежной силы $F_{Цμ}$, повышающей значение парциального давления тяжелого компонента в пристеночной области центробежного аппарата, к силе давления

теплового движения молекул газовой смеси на цилиндрическую стенку центробежного аппарата $F_{T\mu}$,

$$\overline{F} = \frac{F_{\text{Ц}\mu}}{F_{T\mu}} = \left(\mu_{\text{к}} - \mu_{\text{см}}\right) a_{\text{ц}} \frac{r_{\mu}}{2RT}. \tag{13}$$

При величине радиуса центробежного аппарата $r_0 = r_{\mu}$ объемом один моль величина ускорения центробежной силы, действующей на тяжелый компонент газовой смеси в пристеночной области, определяется как

$$a_{\text{ц}} = \frac{\upsilon_{\text{ц}\mu}^2}{r_{\mu}} = \frac{\upsilon_T^2}{r_0}, \text{ м/с}^2, \tag{14}$$

тогда формула (11) может быть записана в виде

$$K_p = e^{\overline{F}} = e^{\frac{F_{\text{Ц}\mu}}{F_{T\mu}}} = e^{\frac{(\mu_{\text{к}} - \mu_{\text{см}}) a_{\text{ц}}}{2RT} r_{\mu}} = e^{\frac{(\mu_{\text{к}} - \mu_{\text{см}}) \upsilon_T^2}{2RT} \frac{r_{\mu}}{r_0}} = e^{\frac{(\mu_{\text{к}} - \mu_{\text{см}}) \upsilon_T^2}{2RT} \overline{r}}, \tag{15}$$

где $\overline{r} = \dfrac{r_{\mu}}{r_0}$ – безразмерный коэффициент, устанавливающий динамическое подобие центробежных аппаратов.

Движущей силой процесса сепарации компонентов газовой смеси является центробежная сила $F_{\text{Ц}\mu}$, Н/моль, величина которой определяется по формуле (4) и зависит от значения ускорения $a_{\text{ц}}$, м/с^2 [4, 5].

Для центробежных аппаратов, имеющих одинаковую производительность по отделяемому компоненту газовой смеси $Q_{\text{м}}$, кг/с, радиусы r_0 и r_{μ} ($r_0 \neq r_{\mu}$), величины ускорения центробежной силы $a_{\text{ц}}$, разделяющей компоненты газовой смеси, должны иметь одинаковые значения ($F_{\text{ц}} = F_{\text{Ц}\mu}$, см. рисунок). В этом случае действующее значение квадрата тангенциальной скорости $\upsilon_{T\mu}^2$ определяется по формуле

$$\upsilon_{T\mu}^2 = \upsilon_T^2 \cdot \overline{r} = a_{\text{ц}} \cdot r_{\mu}, \text{ м}^2/\text{с}^2, \tag{16}$$

и оно не зависит от величины радиуса центробежного аппарата r_0. В противном случае при достаточно большом радиусе центробежного аппарата r_0 малая величина центробежной силы $F_{ц}$ (центробежного ускорения) обеспечит существенный эффект разделения газовой смеси, что противоречит физическим основам процесса сепарации газовых смесей в центробежном поле. Действующее значение квадрата тангенциальной скорости $\upsilon_{T\mu}^2$ зависит от величины радиуса r_{μ}, величина которого определяется значением длины аппарата $l_{\text{ц}}$ в соответствии с формулой

$$r_{\mu} = \sqrt{\frac{W_{\mu}}{\pi l_{\text{ц}}}}, \text{ м}. \tag{17}$$

При величине удельной производительности ротора центрифуги $Q_m = 5 \cdot 10^{-6}$ кг/с, имеющего объем, равный объему одного моля газовой смеси при температуре $T = 300$ К, $W_{\text{м}} = 0{,}0246$ м^3 и длину $l_{\text{ц}} = 1$ м, величина его радиуса будет иметь значение $r_{\mu} = 0{,}0885$ м.

Разделение газовой смеси под действием центробежной силы $F_{\text{Цμ}}$ в роторе центрифуги будет происходить при величине критериального комплекса $\overline{F}$, определяемой по формуле (13), $\overline{F} = 0,0786$. Величина коэффициента разделения газовой смеси K_p в этом случае будет иметь значение $K_p = e^{\overline{F}} = e^{0,0786} = 1,0818$.

Величина массового расхода отделяемого в роторе центрифуги тяжелого компонента газовой смеси (кислорода) также может быть вычислена по формуле

$$Q_m = Q_W\left(C_{r_0} - C_0\right) = \left(Q_{\text{к}} + C_p\right)\left(C_{r_0} - C_0\right), \text{ кг/с}, \tag{18}$$

где Q_W, $Q_{\text{к}}$, Q_p – соответственно объемные расходы: пропускаемой через ротор центрифуги газовой смеси; обогащенной тяжелым компонентом отводимой с ротора центрифуги газовой смеси; обедненной газовой смеси, отводимой с ротора центрифуги, м^3/с.

Поскольку массовый расход кислорода, поступающего в центробежном аппарате в обогащенный поток газовой смеси, равен массовому расходу кислорода, отводимого из обедненного потока, то можем записать

$$Q_{\text{к}}\left(C_{r_0} - C_{\text{к}}\right) = Q_p\left(Q_{\text{к}} + C_0\right) = \frac{1}{2}Q_W\left(C_{r_0} + C_0\right), \text{ кг/с}, \tag{19}$$

откуда с учетом $C_{r_0} = K_p C_0$ и $\overline{Q} = \dfrac{Q_p}{Q_m}$ получим:

$$C_{r_0} - C_{\text{к}} = K_p C_0 - C_{\text{к}} = \frac{Q_p}{Q_{\text{к}}}\left(C_{\text{к}} - C_0\right) = \overline{Q}C_{\text{к}} - \overline{Q}C_0, \text{ кг/м}^3, \tag{20}$$

$$C_0 = C_{\text{к}}\frac{1+\overline{Q}}{Q+K_p}, \text{кг/м}^3 \text{ и } C_{r_0} = C_{\text{к}}\frac{K_p\left(1+\overline{Q}\right)}{\overline{Q}+K_p}, \text{ кг/м}^3, \tag{21}$$

где $\overline{Q} = \dfrac{Q_p}{Q_m}$ – относительный расход газовой смеси, обработанной в роторе центрифуги.

При величине относительного расхода $\overline{Q} = 1$ $\left(Q_{\text{к}} = Q_p\right)$ и значении коэффициента разделения $K_p = 1,0818$ концентрации кислорода в обогащенном потоке и обедненном потоке, вычисляемые по формулам (21), будут равны $C_{r_0} = 0,2806$ кг/м^3, $C_0 = 0,2594$ кг/м^3.

Поскольку интенсивность процесса вынужденного массопереноса молекулярного кислорода в роторе центрифуги обусловливается действием центробежной силы $F_{\text{Цμ}}$, которая вызывает перепад концентраций кислорода вдоль радиуса ротора со средней величиной градиента $\dfrac{C_{r_0} - C_0}{r_0}$, то для определения величины скорости внутреннего диффузионного массопереноса может быть использован закон Фика

$$Q_m = A_{\text{ц}}D_{\text{к}}\frac{C_{r_0} - C_0}{r_0}, \text{ кг/с}. \tag{23}$$

Из (23) с учетом $A_{ц} = 2\pi r_0 l_{ц}$, $C_{r_0} = K_p C_0$ и $K_p = e^{\overline{F}}$ имеем

$$Q_m = 2\pi r_0 l_{ц} D_{к} \frac{C_0\left(K_p - 1\right)}{r_0} = 2\pi l_{ц} D_{к} C_0\left(K_p - 1\right) = 2\pi l_{ц} D_{к} C_0\left(e^{\overline{F}} - 1\right), \text{ кг/с}, \quad (24)$$

тогда для рассматриваемого случая $Q_m = 2,7 \cdot 10^{-6}$ кг/с.

Формула (1) может быть представлена в виде

$$Q_m = \frac{2\pi l_{\mu} D_{к} \upsilon_T^2}{RT} C_0(\mu_{к} - \mu_{см}) = 2\pi l_{\mu} D_{к} C_0 2 \frac{\left(\mu_{к} - \mu_{см}\right)\upsilon_T^2}{2RT} == 2\pi l_{ц} D_{к} C_0 2\overline{F}, \text{кг/с}. \quad (25)$$

При малой величине критериального комплекса можно записать $\overline{F} = 2e^{\overline{F}} - 1$, из чего следует

$$Q_m = 2\pi l_{\mu} D_{к} C_0 \overline{F}. \quad (26)$$

Формула (26) позволит получить оценочное значение производительности центрифуги $Q_m = 2,7 \cdot 10^{-6}$кг/с, величина которого будет незначительно отличаться от значения, вычисленного по формуле (24).

Величина удельной производительности центрифуги может быть определена по формуле

$$Q_{W_y} = \frac{Q_m}{W_{ц}} = \frac{2\pi l_{ц} D_{к} C_0 (K_p - 1)}{\pi r_0^2 l_{ц}} = \frac{2D_{к} C_0}{r_0^2}(K_p - 1) = 0,000112 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{с)}, \quad (27)$$

где $W_{ц} = W_{\mu}$ – объем ротора центрифуги, м^3.

Величина разности концентраций кислорода в газовой смеси на оси центрифуги C_0 и в пристеночной области ее ротора C_{r_0} может быть определена по формуле $\Delta C = C_{r_0} - C_0 = C_0(K_p - 1) = 0,0212$ кг/м^3.

Расчетная величина продолжительности обработки газовой смеси в роторе центрифуги $t_{ц}$, позволяющая достичь состояния динамического равновесия, при котором процесс принудительной молекулярной диффузии компонентов газовой смеси под действием центробежного поля прекратится и концентрации кислорода в пристеночной и приосевой областях ротора центрифуги достигнут значений C_{r_0} и C_0, может быть определена по формуле

$$t_{ц} = \frac{\Delta C}{Q_{W_y}} = C_0(K_p - 1)\frac{r_0^2}{2D_{к} C_0 (K_p - 1)} = \frac{r_0^2}{2D_{к}} = \frac{0,0885^2}{2 \cdot 2,07 \cdot 10^{-5}} = 189 \text{ с}. \quad (28)$$

Состояние динамического равновесия в роторе центрифуги длиной $l_{ц}$ может быть достигнуто за время $t_{ц}$ при величине осевой скорости потока газовой смеси

$$\upsilon_0 = \frac{l_{ц}}{t_{ц}} = \frac{1}{189} = 0,0053 \text{ м/с}. \quad (29)$$

Величина коэффициента закрутки потока газовой смеси в роторе центрифуги будет иметь значение

$$K_з = \frac{\upsilon_T}{\upsilon_0} = \frac{350}{0,0053} = 66038. \quad (30)$$

Величина объемного расхода пропускаемой через ротор центрифуги газовой смеси может быть определена по формуле

$$Q = \pi r_0^2 \upsilon_0 = 3{,}14 \cdot 0{,}0885^2 \cdot 0{,}0053 = 0{,}00013 \text{ м}^3/\text{с} \quad (31)$$

В этом случае величина массового расхода отделяемого в роторе центрифуги кислорода будет иметь значение

$$Q_m = Q \cdot \Delta C = \pi r_0^2 l_ц Q_{W_y} = 0{,}00013 \cdot 0{,}0212 = 3{,}14 \cdot 0{,}0885^2 \cdot 1 \cdot 0{,}00011 = 2{,}7 \cdot 10^{-6}. \quad (32)$$

Эффективность процесса разделения газовой смеси в центробежном аппарате может быть оценена по величине относительной разности концентраций отделяемого компонента на оси и в пристеночной области аппарата

$$\Delta \overline{C} = \frac{\Delta C}{2C_к} \cdot 100\% = \frac{C_{r_0} - C_0}{2C_к} \cdot 100\% = \frac{0{,}2806 - 0.2594}{2 \cdot 0{,}27} \cdot 100\% = 3{,}9\%. \quad (33)$$

Для центробежного аппарата, имеющего длину $l_ц$, отличающуюся от величины $l_ц$=1 м, значение радиуса $r_{l\mu}$ может быть вычислено по формуле

$$r_{l\mu} = \sqrt{\frac{W_\mu}{\pi l_ц}}, \text{ м}. \quad (34)$$

Геометрическое подобие камеры сепарации центробежных аппаратов будет иметь следующие безразмерные характеристики: $\overline{l}_\mu = \frac{l_\mu}{r_\mu}$; $\overline{l}_ц = \frac{l_ц}{r_0}$; $\overline{r}_\mu = \frac{r_{l\mu}}{r_\mu}$.

Из соотношения $\overline{l}_ц = \overline{l}_\mu \overline{r}$; $\frac{l_ц}{r_0} = \frac{l_\mu}{r_\mu} \cdot \frac{l_{l\mu}}{r_\mu}$ следует, что $l_ц = l_\mu \frac{r_0}{r_\mu} \cdot \frac{r_{l\mu}}{r_\mu} = l_\mu \frac{r_0 r_{l\mu}}{r_\mu^2}$, м.

Поскольку $W_\mu = \pi r^2 r_{l\mu} l_ц$ и $l_ц = \frac{W_\mu}{\pi r_{l\mu}^2}$, м, то

$$l_ц = \frac{W_\mu}{\pi r_{l\mu}^2} = l_\mu \frac{r_0 r_{l\mu}}{r_\mu^2}, \text{ м}, \quad (35)$$

откуда

$$r_{l\mu} = \sqrt[3]{\frac{W_\mu r_\mu^2}{\pi r_0 l_\mu}}. \quad (36)$$

В соответствии с формулой (14) величины ускорения центробежной силы $a_ц$, действующей на газовую смесь в динамически подобных аппаратах, имеющих различные размеры, должны иметь одинаковые значения:

$$a_ц = \frac{\upsilon_{T\mu}^2}{r_\mu} = \frac{\upsilon_{T\mu}^2}{r_0} = \frac{350^2}{0{,}0885} = 1384181 \text{ м/с}^2. \quad (37)$$

В этом случае основная технологическая характеристика, определяющая условия протекания процесса разделения газовой смеси в центробежном поле, – критерий Фруда (фактор разделения) – имеет значение

$$\text{Fr} = \frac{F_{Ц\mu}}{F_{g\mu}} = \frac{a_ц}{g} = \frac{1384181}{9{,}8} = 141243, \quad (38)$$

где $F_{g\mu}$ – величина силы тяжести, действующей на объем газовой смеси, равный одному молю, Н/моль; g=9,8 м/с^2 – ускорение свободного падения.

Действующее значение тангенциальной скорости υ_T для центробежного аппарата, имеющего камеру сепарации радиусом r_0 и обеспечивающего величину ускорения центробежной силы $a_ц$, отделяющей тяжелый компонент из газовой смеси, может быть определено из соотношения (14):

$$\upsilon_T = \sqrt{a_ц r_0}, \text{ м/с}^2. \quad (39)$$

Величина критериального комплекса $\overline{F}$ для центробежного аппарата, имеющего камеру сепарации радиусом r_0, величину радиуса $r_{l\mu}$, определяемую по формуле (36), значение длины $l_ц$, вычисляемое по формуле (35), и обеспечивающего ускорение центробежной силы $a_ц$ в периферийной области аппарата, может быть определена по формуле

$$\overline{F} = \frac{(\mu_к - \mu_{см}) a_ц}{RT} r_{l\mu}. \quad (40)$$

Величина коэффициента геометрического подобия $K_{ПГ}$ для центробежного аппарата, имеющего радиус r_0, может быть вычислена по формуле

$$K_{ПГ} = \frac{r_{l\mu}}{r_\mu} = \sqrt{\frac{l_\mu}{l_ц}} = \sqrt[3]{\frac{r_\mu}{r_0}}. \quad (41)$$

В первых строках табл. 1 и 2 приведены технологические характеристики центробежного аппарата объемом один моль ($W_\mu = 0,0246\,\text{м}^3$), имеющего радиус $r_м = r_{lм} = 0,085$ м и длину $l_ц = l_м = 1$ м. Все представленные в таблицах центробежные аппараты динамически подобны друг другу и имеют коэффициент динамического подобия $K_{ПД} = 1$ ($a_ц = 1384181$ м/с^2).

Данные, приведенные в табл. 1 и 2, позволяют сделать вывод о том, что при описании центробежных аппаратов необходимо наряду с коэффициентом динамического подобия $K_{ПД}$ учитывать и значение коэффициента геометрического подобия $K_{ПГ}$, величина которого зависит от линейного размера аппарата r_0 и определяется особенностями действия на тяжелый компонент газовой смеси центробежной силы $F_{Цμ}$ и силы давления теплового движения молекул газовой смеси $F_{Tμ}$.

Таблица 1

Технологические характеристики центробежного аппарата, имеющего радиус r_0, длину $l_ц$ и обеспечивающего величину ускорения центробежной силы в пристеночной области $a_ц = 1384181$ м/с^2

r_0, м	$r_{l\mu}$, м	$l_ц$, м	$K_{ПГ}$	$\overline{F}$	K_p	υ_T, м/с	υ_0, м/с	$K_З$
0,0885	0,0885	1	1	0,0786	1,0818	350	0,0053	66038
0,025	0,1349	0,4305	1,52	0,1198	1,1273	186	0,0285	6527
0,005	0,2306	0,1473	2,61	0,2049	1,2274	83,2	0,244	341
0,001	0,3944	0,0503	4,46	0,3504	1,4196	37,2	2,08	17,9
0,0005	0,4969	0,0317	5,61	0,4414	1,5549	26,3	5,28	5,0
0,00025	0,6260	0,0200	7,07	0,5561	1,7499	18,6	13,3	1,4

Таблица 2

Технологические характеристики центробежного аппарата, имеющего радиус r_0, длину $l_ц$ и обеспечивающего величину ускорения центробежной силы в пристеночной области $a_ц = 1384181$ м/с^2

r_0, м	$t_ц$, с	Q_{W_y}, кг/(м$^3 \cdot$ с)	Q, м^3/с	C_0, кг/м^3	ΔC, кг/м^3	$\Delta\overline{C}$, %
0,0885	189,2	0,0001	12,9 10^{-4}	0,2594	0,0212	3,9
0,025	16,1	0,0021	0,560 10^{-4}	0,2538	0,0323	6,0
0,005	0,6039	0,0913	0,192 10^{-4}	0,2424	0,0551	10,2
0,001	0,02415	3,87	0,065 10^{-4}	0,2232	0,0937	17,3
0,0005	0,0060	19,4	0,042 10^{-4}	0,2114	0,1173	21,7
0,00025	0,0015	96,8	0,026 10^{-4}	0,1963	0,1462	27,1

Величина коэффициента геометрического подобия определяет значения основных технологических характеристик центробежного аппарата критериального комплекса $\overline{F}$ и разности концентраций тяжелого компонента газовой смеси на оси и в пристеночной области ΔC, кг/м^3 ($\overline{F} \approx K_P - 1$).

$$K_{ПГ} = \frac{\overline{F}_ц}{\overline{F}_μ} \approx \frac{\Delta C_ц}{\Delta C_μ}. \quad (42)$$

Для центробежного аппарата радиусом $r_0 = 0,0005$ м величина тангенциальной скорости в пристеночной области должна составлять $\upsilon_T = 26,3$ м/с. При расходе газовой смеси, пропускаемой через этот центробежный аппарат, $Q = 0,042 \cdot 10^{-4}$ м^3/с $= 0,25$ л/мин величину скорости $\upsilon_T = 26,3$ м/с можно поддерживать за счет подачи газовой смеси через тангенциально присоединенный к камере сепарации входной патрубок, имеющий диаметр

$$d_{вх} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \upsilon_T}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,042 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 26,3}} = 0,00045 \text{ м}. \quad (43)$$

Движение газовой смеси во входном патрубке в этом случае будет происходить при величине критерия Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = \frac{\upsilon_T \cdot d_{вх}}{\nu} = \frac{26,3 \cdot 0,00045}{15,1 \cdot 10^{-6}} = 784, \quad (44)$$

где $\nu = 15,1 \cdot 10^{-6}$ м^2/с – кинематический коэффициент вязкости воздуха.

Величина критерия Рейнольдса $\mathrm{Re} = 784$ во входном патрубке аппарата радиусом r_0=0,0005 м (диаметром d_0=0,001 м) меньше критического значения $\mathrm{Re}_{KP} = 2300$ в точке перехода потока в турбулентный режим, что обеспечит сохранение ламинарного режима течения в центробежном аппарате и создаст возможность использования для процесса разделения компонентов потока газовой смеси в высокоградиентном центробежном поле более простого, чем центрифуга, устройства с неподвижной камерой сепарации – микроциклона.

Вихревая камера микроциклона диаметром r_0=0,0005 м и длиной $l_ц$=0,0317 м имеет объем $W_ц = \pi r_0^2 l_ц = 2,5 \cdot 10^{-8}$ м^3=25 мкл. Потоки, протекающие через русла малого объема (порядка 0,1–100 мкл), описываются в рамках науки, называемой микродинамикой. Микродинамика возникла в период бурного развития различных отраслей нанотехнологии в начале 1990-х годов.

Микродинамика как наука, изучающая потоки в руслах малого размера (от десятков до нескольких сотен микрометров), в международной практике также называется микрофлюидикой (от др. греч. μικροζ (micros) – малый и лат. Fluidis – текучий), т.е. наукой о микропотоках. Микрофлюидика изучает системы, которые могут транспортировать, смешивать или разделять различные компоненты микропотока.

Использование принципов вихревой микрофлюидики, предусматривающих уменьшение размеров камеры сепарации центробежного аппарата до некоторой критической величины, может позволить проявиться новым свойствам потока, при которых величина критерия Рейнольдса становится ниже значения $Re_{кр}$=2300 и обеспечивается полная ламинарность течения газового потока, в результате чего устраняется эффект турбулентного перемешивания компонентов газовой смеси. Молекулярный транспорт компонентов газовой смеси в этом случае осуществляется только посредством вынужденной молекулярной диффузии, обусловленной разностью величин их парциального давления в пристеночной и приосевой областях камеры сепарации, возникающей вследствие действия центробежной силы.

Уменьшение линейных размеров камеры сепарации центробежного аппарата позволит не только упростить его конструкцию и отказаться от использования подвижных частей, но и существенно повысить его удельную производительность. Так, при уменьшении радиуса центробежного аппарата с r_0=0,085 м до r_0=0,0005 м величина его удельной производительности по отделяемому от воздуха кислороду увеличится в 200 тысяч раз.

Список литературы

1. Scott Kemp, R. Gus Centrifuge Theory and Development / R. Scott Kemp // Science and Global Security. – 2009. – Vol 17. – P. 1–19.

2. Андреев, С.Ю. Новая технология интенсификации процесса разделения газовых смесей в центробежном поле за счет уменьшения размера центробежных аппаратов / С.Ю. Андреев, К.В. Лебединский, В.С. Андреев // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №3(48). – С. 167–175.

3. Андреев, С.Ю. Анализ процесса разделения воздуха на кислород и азот в высокоградиентном центробежном поле микроциклона / С.Ю. Андреев, К.В. Лебединский, В.С. Андреев // Региональная архитектура и строительство. – Пенза: ПГУАС, 2021. – №4(49). – С. 119–126.

4. Андреев, С.Ю. Теоретический анализ и рекомендации по расчету процесса разделения воздуха на кислород и азот в высокоградиентном центробежном поле микроциклона / С.Ю. Андреев, К.В. Лебединский, В.С. Андреев // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 1 (50). – С. 102–109.

5. Орлов, А.А. Газофазные методы разделения: в 2 ч. / А.А. Орлов. – Томск: Изд-во Том. политехн, ун-та, 2009. – Ч. 1. – 286 с.

References

1. Scott Kemp, R. Gus Centrifuge Theory and Development / R. Scott Kemp // Science and Global Security. – 2009. – Vol 17. – P. 1–19.

2. Andreev, S.Yu. New technology of intensification of the process of separation of gas mixtures in a centrifugal field by reducing the size of centrifugal apparatuses / S.Yu. Andreev, K.V. Lebedinskiy, V.S. Andreev // Regional architecture and engineering. – 2021. – №3(48) – P. 167–175.

3. Andreev, S.Yu. Process analysis separation of air into oxygen and nitrogen in a high-gradient centrifugal field of a microcyclone / S.Yu. Andreev, K.V. Lebedinskiy, V.S. Andreev // Regional architecture and engineering. – Penza: PGUAS, 2021. – №4(49) – P. 119–126.

4. Andreev, S.Yu. Theoretical analysis and recommendations for calculating the process of air separation into oxygen and nitrogen in a high-gradient centrifugal field of a microcyclone / S.Yu. Andreev, K.V. Lebedinskiy, V.S. Andreev // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 1 (50). – P. 102–109.

5. Orlov, A.A. Gas-phase separation methods: At 2 part / A.A. Orlov. – Tomsk: Publishing House of the Polytechnic Institute, un-ta, 2009. – Part 1. – 286 p.

УДК 698 DOI 10.54734/20722958_2023_2_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

Ерёмкин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Аверкин Александр Григорьевич,
доктор технических наук, профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»
E-mail: tgv@pguas.ru

Орлова Наталья Александровна,
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

Averkin Aleksandr Grigorevich,
Doctor of Sciences, Professor of the department «Heat and Ventilation»
E-mail: tgv@pguas.ru

Orlova Natalya Alexandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Heat 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

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И СКОРОСТНЫХ ПОЛЕЙ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ВЫТЯЖНОГО ЗОНТА

А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, Н.А. Орлова

Создания микроклимата и предотвращение загрязнений убранства в залах богослужения православных храмов являются актуальными задачами. Основными причинами загрязнений служат выделения вредностей в виде копоти, сажи, влаги, углекислого газа и др., образующихся при сгорании свечей на подсвечниках, и отсутствие способов их локализации. Для решения данной проблемы авторами предложены методика проведения экспериментальных исследований и лабораторный стенд, позволяющие определять профили скоростных и температурных полей в зоне всасывания вытяжного зонта. На их основе разработаны технологические и конструктивные параметры: высота установки зонта над подсвечником, способы снижения концентрации вредностей внутри помещения. Это позволило оптимизировать количество загрязненного воздуха, отсасываемого зонтом в залах богослужения православных храмов.

Ключевые слова: открытый вытяжной зонт, профили скоростей и температуры, зона всасывания зонта, вредности, копоть и сажа, отсасываемый воздух, свеча, зона свободного пространства, объемная концентрация вредностей, подсвечник, храм, зал богослужения, микроклимат, убранство, термоанемометр, координатник, микроманометр

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PROFILES OF TEMPERATURE AND VELOCITY FIELDS IN THE FREE SPACE OF THE HOOD

A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, N.A. Orlova,

The problems of creating a microclimate in the halls of worship and preventing contamination of decoration in Orthodox churches are very urgent. The main cause of pollution is the release of harmful substances in the form of soot, soot, moisture, carbon dioxide, etc., formed during the burning candles on candlesticks and the lack of methods of their localization. To solve the actual problem, the authors have developed a methodology for conducting experimental studies, and a laboratory stand, which makes it possible to investigate the profiles of velocity and temperature fields in the suction zone of the exhaust hood. On their basis, technological and design parameters have been developed: the height of the umbrella installation above the candlestick, ways of reduction concentration of hazards indoors. This made it possible to optimize the amount of polluted air sucked out by the umbrella in the worship halls of Orthodox churches.

Keywords: open exhaust hood, speed and temperature profiles, umbrella suction zone, soot and soot hazards, sucked air, candle, free space zone, volume concentration of hazards, candlestick, temple, worship hall, microclimate, decoration, hot-wire anemometer, coordinator, micromanometer

Обработанные результаты экспериментальных исследований, представленные в виде профилей скоростей и температур в поперечном сечении потока в свободном пространстве вытяжного зонта $h_{сп}$ = 400 мм, позволили определить концентрацию копоти и сажи в удаляемом воздухе.

Разработанный экспериментальный стенд и предложенная программа проведения экспериментов дали возможность получить достаточно надежные результаты $v_{ос}$, м/с, $v_{ср}$, м/с, $v_{сп}$, м/с, $t_{ос}$, ºС, $t_{ср}$, ºС, $t_{сп}$, ºС, и определить оптимальное расстояние $h_{сп}$, м, от столешни подсвечника до нижней кромки зонта. Результаты экспериментальных исследований закономерностей изменения профилей скоростных и температурных полей в поперечном сечении всасывающего потока в зоне свободного пространства открытого вытяжного зонта над подсвечником с горящими церковными свечами приведены на рис. 1, 2, 3. В процессе научных исследований использовался зонт с углом раскрытия 60º, что способствовало созданию равномерной скорости всасывания воздушного потока в сечении входного отверстия зонта.

На основе натурных исследований в храмах и соборах авторы предлагают устанавливать вытяжной зонт на расстоянии от 300 до 500 мм от столешни до нижней кромки зонта, чтобы прихожане не испытывали неудобств во время постановки церковных свечей на столешню подсвечника. Проводилось экспериментальное исследование профилей скоростей $v_{сп}$, м/с, и температуры $t_{сп}$, ºС, воздуха в поперечном сечении всасывающего потока от горящих свечей при высоте свободного пространства $h_{сп}$, равной 300 мм, 400 мм, 500 мм, и заполняемости столешни свечами 25 % (13 свечей), 50 % (25 свечей), 100 % (50 свечей), при наличии 50 мест на столешне.

В процессе экспериментов восходящий поток в свободном пространстве вытяжного зонта создавался за счет источника теплоты от горящих церковных свечей, размещенных на столешне подсвечника, и потока, создаваемого механической местной вытяжкой с помощью канального осевого вентилятора (см. рис. 1). Загрязненный воздух (сток) из помещения лаборатории свободно подтекал со всех сторон к восходящему потоку и удалялся из помещения через систему вытяжной вентиляции с использованием вытяжного зонта, размещенного над подсвечником.

Восходящий поток в открытом свободном пространстве зонта $h_{сп}$, мм, образовался за счет разности между атмосферным давлением в помещении и разрежением воздуха, создаваемым вентилятором внутри вытяжного зонта и в плоскости всасывающего отверстия, а также в результате разности плотностей внутреннего и нагретого воздуха в зоне всасывания за счет теплоты от сгорания церковных свечей на столешнице подсвечника.

Известно, что любой конвективный поток состоит из трех участков, отличающихся друг от друга профилем, а также значениями скоростей и температур. В данной статье

рассматривается тепловой поток от открытого пламени горящих церковных свечей применительно к восходящему тепловому потоку. На первом участке происходит подтекание окружающего воздуха от основания до верха свечей на высоту до 200 мм. На этом участке температура и скорость воздуха в потоке соответствуют параметрам внутреннего воздуха (см. рис. 1, 2, 3).

Второй участок характеризуется значительным ускорением потока, что приводит к сужению сечения, образуется «шейка». Для рассматриваемого варианта скорость потока в «шейке» на оси центра всасывания отверстия зонта достигает $v_{ос}$ = 1,4 м/с на высоте установки зонта $h_{сп}$ = 400 мм (см. рис. 3). На данном участке имеет место стабильный поток, где рекомендуется установить вытяжной зонт на высоте $h_{сп}$ = 400 мм от подсвечника до нижней кромки зонта.

На третьем участке конвективный поток расширяется за счет активного «стока» внутреннего воздуха из помещения к восходящему потоку, где имеет место нарушение стабильности потока.

Экспериментальные исследования позволили определить диаметр «шейки» потока $d_ш$, м, по формуле

$$d_ш = 0,698 d_п, \quad (1)$$

где $d_п$ – диаметр столешни подсвечника, м.

Диаметр входного сечения вытяжного зонта вычисляется по формуле

$$D_з = d_п + 0,375 h_{сп}, \quad (2)$$

где $h_{сп}$ – высота свободного пространства зонта, м.

Исследования показали, что скорость конвективного потока воздуха в центре всасывающего отверстия зонта $v_{ос}$, м/с, при сгорании свечей на подсвечнике и неработающем вентиляторе в среднем составила $v_{ос}$=0,35 м/с, что недостаточно для эффективной работы вытяжного зонта. Экспериментально также установлено, что $v_{ос}$, м/с, создаваемая вытяжным вентилятором, при отсутствии горящих свечей на подсвечнике равна $v_{ос}$=0,49 м/с.

Когда воздушный поток в свободном пространстве зонта при $h_{сп}$=400 мм сформирован одновременно за счет как конвективного потока от горящих свечей, так и работы вытяжного вентилятора, скорость воздуха в центре всасывающего отверстия зонта возрастает и в среднем составляет $v_{ос}$=0,84 м/с, что обеспечивает надежное удаление вредностей в виде копоти и сажи.

Из приведенных значений скорости $v_{ос}$, м/с, следует, что конвективный поток от сгорания свечей способствует увеличению осевой скорости воздуха в зоне всасывания зонта, создаваемой вытяжным вентилятором. Это приводит к увеличению количества загрязненного воздуха, удаляемого из зала богослужения системой местной вытяжной вентиляции.

В процессе экспериментов во избежание искажения профиля скоростей исключались боковые скоростные воздушные потоки в лаборатории. Приемное отверстие вытяжного зонта располагалось непосредственно над подсвечником с горящими свечами, и его форма (круглая) соответствовала конфигурации подсвечника. Диаметр приемного отверстия зонта принимался расчетом больше, чем диаметр столешни подсвечника.

Данные экспериментальных исследований профилей скоростей $v_{сп}$, м/с, и температур $t_{сп}$, ºС, воздуха в поперечном сечении восходящего потока от горящих свечей и механической вытяжки при $h_{сп}$ = 400 мм и заполняемости свечами n=25 % приведены на рис. 1, а среднестатистические значения $v_{сп}$, м/с, $t_{сп}$, ºС, – в табл. 1.

При высоте свободного пространства $h_{сп}$ = 400 мм и заполняемости свечами n=50 % профили скоростей $v_{сп}$, м/с, и температур воздуха $t_{сп}$, ºС, в поперечном сечении восходящего потока приведены на рис. 2, а среднестатистические значения $v_{сп}$, м/с, $t_{сп}$, ºС, – в табл. 2.

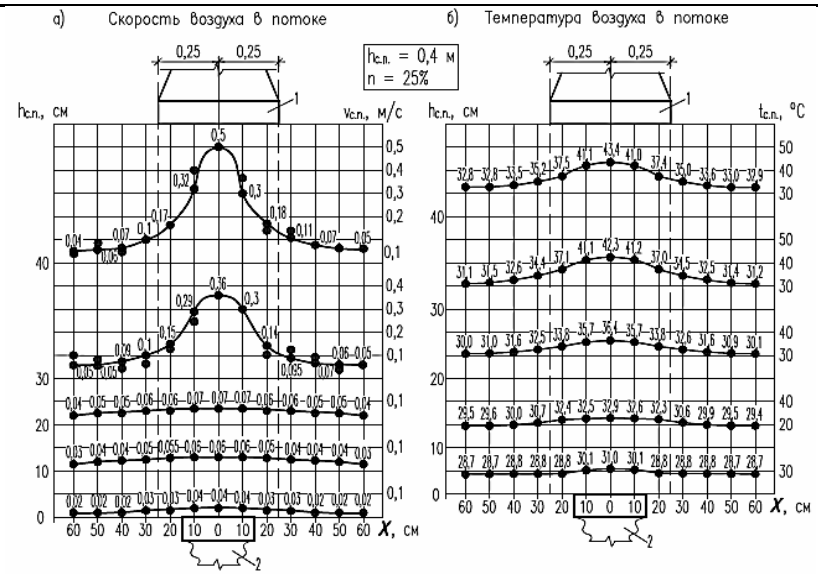


Рис. 1. Профили скоростей (а) и температур (б) воздуха в поперечном сечении всасывающего потока в зоне свободного пространства $h_{сп}$ = 400 мм открытого вытяжного зонта при количестве горящих свечей на столешне подсвечника n=25 %:
1 – входное отверстие зонта

Таблица 1

Среднестатистические значения скорости $v_{сп}$, м/с, и температуры $t_{сп}$, ºС, в восходящем потоке при $h_{сп}$ = 400 мм, n=25 %

X, см	60		50		40		30		20		10		0		10		20		30		40		50		60	
hсп., см	Vсп.	tсп.	Vсп.	tсп.	Vсп.	tсп.	Vсп.	tсп.	Vсп.	tсп.	Vсп.	tсп.	Vсп.	tсп.	Vсп.	tсп.	Vсп.	tсп.	Vсп.	tсп.	Vсп.	tсп.	Vсп.	tсп.	Vсп.	tсп.
40	0,04	32,8	0,06	32,8	0,07	33,5	0,1	35,2	0,17	37,5	0,3	41,1	0,5	43,4	0,3	41,0	0,18	37,4	0,11	35,0	0,09	33,5	0,07	32,8	0,05	32,8
30	0,05	31,1	0,05	31,5	0,09	32,6	0,1	34,4	0,15	37,1	0,30	41,1	0,36	42,3	0,30	41,2	0,14	37,0	0,095	34,5	0,07	32,5	0,06	31,4	0,05	31,2
20	0,04	30,0	0,05	31,0	0,05	31,6	0,06	32,5	0,06	33,8	0,07	35,7	0,07	36,4	0,07	35,7	0,06	33,8	0,06	32,6	0,05	31,6	0,05	30,9	0,04	30,1
10	0,03	29,5	0,04	29,6	0,04	30,0	0,05	30,7	0,055	32,4	0,06	32,5	0,06	32,9	0,06	32,6	0,055	32,3	0,05	30,6	0,04	29,9	0,04	29,5	0,03	29,4
0	0,02	28,7	0,02	28,7	0,02	28,8	0,03	28,8	0,03	28,8	0,04	30,1	0,04	31,0	0,04	30,1	0,03	28,8	0,03	28,8	0,02	28,8	0,02	28,7	0,02	28,7

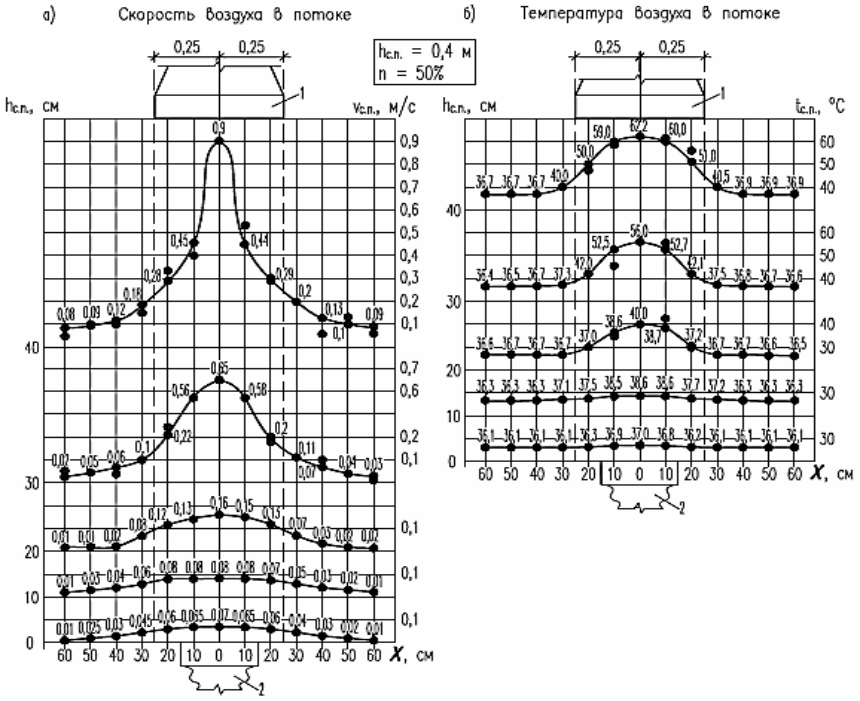


Рис. 2. Профили скоростей (а) и температур (б) воздуха в поперечном сечении всасывающего потока в зоне свободного пространства $h_{сп}$ = 400 мм открытого вытяжного зонта при количестве горящих свечей на столешне подсвечника n=50 %:
1 – входное отверстие зонта

Таблица 2

Среднестатистические значения скорости $v_{сп}$, м/с, и температуры $t_{сп}$, ºС, в восходящем потоке при $h_{сп}$ = 400 мм, n=50 %

X, см	60		50		40		30		20		10		0		10		20		30		40		50		60	
$h_{сп}$, см	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$
40	0,08	36,7	0,09	36,7	0,12	36,7	0,18	40,0	0,28	50,0	0,45	59,0	0,9	62,2	0,44	60,0	0,29	51,0	0,2	40,5	0,13	36,9	0,1	36,9	0,09	36,9
30	0,02	36,4	0,05	36,5	0,06	36,7	0,1	37,3	0,22	42,0	0,56	52,5	0,65	56,0	0,58	52,7	0,2	42,1	0,11	37,5	0,07	36,8	0,04	36,6	0,03	36,4
20	0,01	36,6	0,01	36,7	0,02	36,7	0,08	36,7	0,12	37,0	0,13	38,6	0,16	40,0	0,15	38,7	0,13	37,2	0,07	36,7	0,03	36,7	0,02	36,6	0,02	36,5
10	0,01	36,3	0,03	36,3	0,04	36,3	0,06	37,1	0,08	27,5	0,08	38,5	0,08	38,6	0,08	38,6	0,07	37,7	0,05	37,2	0,03	36,3	0,02	36,3	0,01	36,3
0	0,01	36,1	0,025	36,1	0,03	36,1	0,045	36,1	0,06	26,3	0,065	36,9	0,07	37,0	0,065	36,9	0,06	36,3	0,04	36,1	0,03	36,1	0,02	36,1	0,01	36,1

Для варианта при высоте свободного пространства $h_{сп}$ = 400 мм и заполняемости свечами n=100 % профили $v_{сп}$, м/с, $t_{сп}$, ºС, в поперечном сечении восходящего потока приведены на рис. 3, а среднестатистические значения $v_{сп}$, м/с, $t_{сп}$, ºС, – в табл. 3.

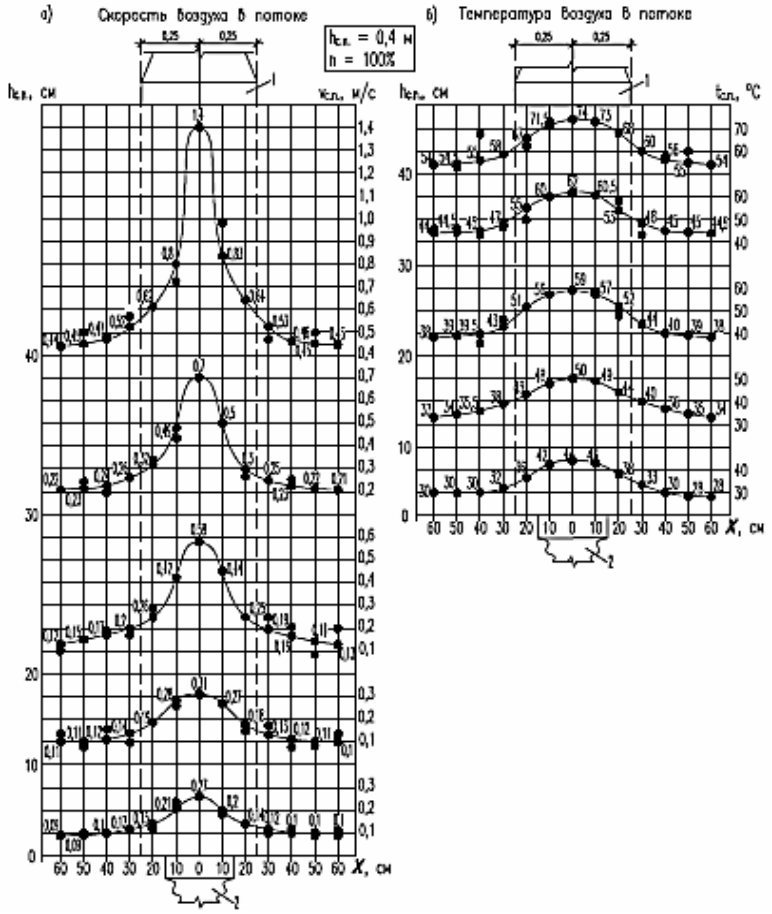


Рис. 3. Профили скоростей (а) и температур (б) воздуха в поперечном сечении всасывающего потока в зоне свободного пространства $h_{сп}$ = 400 мм открытого вытяжного зонта при количестве горящих свечей на столешне подсвечника n=100 %:
1 – входное отверстие зонта

Таблица 3

Среднестатистические значения скорости $v_{сп}$, м/с, и температуры $t_{сп}$, ºС, в восходящем потоке при $h_{сп}$ = 400 мм, n=100 %

X, см	60		50		40		30		20		10		0		10		20		30		40		50		60	
$h_{сп}$, см	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$	$V_{сп}$	$t_{сп}$
40	0,44	59,0	0,45	55,0	0,47	56,0	0,52	60,0	0,62	68,0	0,8	73,0	1,4	74,0	0,83	73,0	0,64	68,0	0,53	60,0	0,46	56,0	0,45	55,0	0,45	54,0
30	0,22	44,0	0,23	44,5	0,24	45,0	0,26	47,0	0,32	55,0	0,49	60,0	0,7	62,0	0,5	60,0	0,3	55,0	0,25	47,0	0,23	45,0	0,22	44,5	0,21	44,0
20	0,12	38,0	0,15	39,0	0,17	40,0	0,2	44,0	0,26	52,0	0,42	57,0	0,58	59,0	0,44	57,0	0,25	52,0	0,19	44,0	0,16	40,0	0,14	39,0	0,13	38,0
10	0,11	34,0	0,11	35,0	0,12	36,0	0,14	40,0	0,19	44,0	0,28	49,0	0,31	50,0	0,27	49,0	0,18	44,0	0,13	40,0	0,12	36,0	0,11	35,0	0,10	34,0
0	0,09	28,0	0,09	28,0	0,10	30,0	0,13	33,0	0,15	38,0	0,21	43,0	0,27	44,0	0,20	43,0	0,14	38,0	0,12	33,0	0,10	30,0	0,1	28,0	0,1	28,0

Поперечное сечение соответствовало перпендикулярной поверхности к траектории восходящего потока в зоне свободного пространства между нижней кромкой зонта и столешней подсвечника.

Аэродинамические характеристики, представленные на рис. 1, 2, 3 в виде скоростных и температурных полей, подтверждают наличие неизотермического воздушного потока в зоне всасывания вытяжного зонта. Струя воздуха в свободном пространстве зонта, участвующая в теплообмене с окружающей средой, имела температуру от 43,4 до 74 ºС, при этом температура окружающей среды составляла не более 32 ºС.

Как показали эксперименты, теплота от горящих свечей передается прилегающим слоям воздуха, которые, нагреваясь, расширяются и становятся менее плотными по сравнению с окружающей средой, в результате они поднимаются вверх и создают тепловое давление на входе вытяжного зонта, способствующего увеличению скорости и температуры потока. Установлено, что в зависимости от высоты свободного пространства $h_{сп}$, мм, в пределах от 300 до 500 мм и количества горящих свечей на подсвечнике от 13 до 50 шт. скорость потока на оси всасывающего отверстия зонта увеличивается от 0,5 до 1,4 м/с.

Авторами экспериментально выявлено, что минимальные скорость и температура всасываемого потока при $h_{сп}$ = 400 мм и количестве свечей на столешне подсвечника n=25 % составляют $v_{сп}$= 0,5 м/с, $t_{сп}$= 43,4ºС, а максимальные значения данных параметров при n=100 % равны: $v_{сп}$= 1,4 м/с, $t_{сп}$= 74 ºС.

Проведенные исследования показали, что в зоне свободного пространства стоки воздуха из помещения устремляются к приемному отверстию зонта, в результате резко сокращается зона активного всасывающего потока. Данные процессы и количественные показатели необходимо учитывать при определении количества воздуха, удаляемого вытяжными зонтами, которые установлены над подсвечниками с горящими церковными свечами. Для эффективного всасывания загрязненного воздуха зонт должен находиться в зоне разгонного участка конвективного потока при максимальных значениях температур и скорости потока, что обеспечит устойчивое улавливание вредностей и оптимизацию размера входного отверстия зонта.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований при $h_{сп}$ = 400 мм. Кроме того, авторами проведены исследования аэродинамических характеристик $v_{сп}$, м/с, $t_{сп}$, ºС, для вариантов $h_{сп}$ = 300 мм, $h_{сп}$ = 500 мм. В процессе анализа полученных данных установлено, что устойчивое состояние конвективного потока достигается при $h_{сп}$ = 400 мм, что соответствует высоте разгонного участка конвективного потока с максимальными значениями скорости и температуры воздуха. На переходном и основном участках конвективного потока при $h_{сп}$ = 400 мм скорость и температура воздуха снижаются, и поток становится менее устойчивым. Установка зонта на данных участках потока нецелесообразна, так как это снижает эффективность улавливания копоти и сажи и приводит к увеличению диаметра входного отверстия зонта.

Экспериментально установлено, что по мере приближения к оси всасывающего отверстия зонта в поперечной плоскости всасывания скорость $v_{ос}$, м/с, возрастает при разной заполняемости столешни подсвечника свечами (от 25 до 100 %) от 0,5 м/с до 1,4 м/с (см. рис. 1, 2, 3). По мере удаления от оси стока зонта скорость воздуха затухает и в среднем составляет 35 % от $v_{ос}$, м/с, из-за неравномерности сгорания и расположения свечей на поверхности столешни подсвечника в период богослужения. При полном заполнении столешни свечами и равномерном горении свечей разница в скоростях составляет от 10 до 15 %, что достаточно для эффективной работы зонта.

Для рассматриваемого варианта при $h_{сп}$ = 400 мм скорость потока воздуха на оси в центре всасывания в поперечном сечении на уровне нижней кромки зонта диаметром 500 мм составляет $v_{ос}$= 1,4 м/с. По мере удаления от центра всасывающего отверстия до края зонта справа и слева скорость плавно уменьшается соответственно до v_x= 0,58 м/с и v_x= 0,56 м/с. Средняя скорость в зоне всасывания зонта составляет $v_{ср}$= 0,85 м/с и отличается от $v_{ос}$. Неравномерность скорости в плоскости всасывания зонта объясняется изменением количества сгораемых свечей, а также расположением

и размером высоты горящих свечей на подсвечнике в процессе богослужения. Указанная неравномерность подтверждается профилями скоростей в поперечном сечении в зоне всасывания зонта, полученными экспериментально и приведенными на рис. 1, 2, 3.

Изменение скорости движения воздуха в плоскости всасывающего отверстия зонта при $h_{сп}$ = 400 мм в безразмерной форме $v_x/v_{ос}$ на произвольном расстоянии от оси центра всасывания *x/r* при *x*, мм, радиусе *r* = 250 мм и разном заполнении подсвечника свечами при вариантах *n*=25 %, *n*=50 %, *n*=100 % показано на рис. 4, а, б, в.

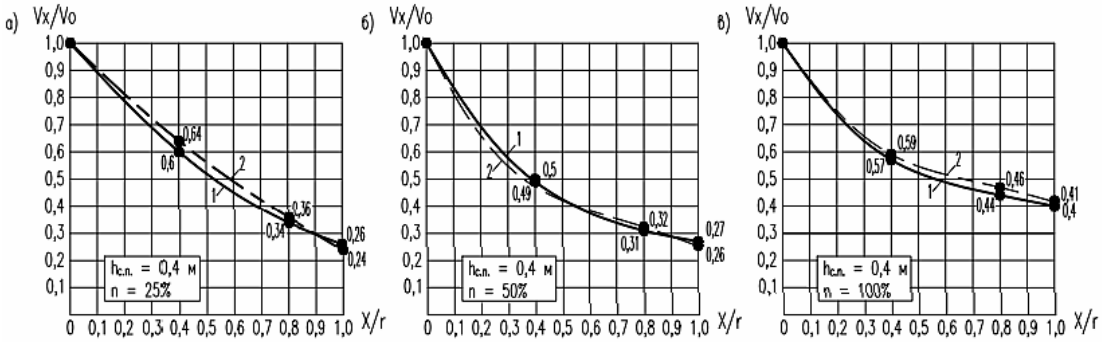


Рис. 4. Графики изменения скорости воздуха в безразмерной форме
в плоскости круглого всасывающего отверстия зонта диаметром 500 мм:
а – при *n*=25 %; б – при *n*=50 %; в – при *n*=100 %;
1 – график скорости воздуха справа от оси; 2 – график скорости воздуха слева от оси

Качественный анализ графиков безразмерной формы, приведенных на рис. 4, а, б, в, при $h_{сп}$ = 400 мм позволяет сделать выводы, что при всех вариантах заполняемости подсвечника свечами скорость воздуха в зоне всасывания зонта плавно уменьшается. Расчетом установлено, что средняя скорость $v_{ср}$ = 0,85 м/с в зоне всасывания зонта является достаточной для эффективного решения задачи улавливания и удаления вытяжным зонтом вредностей, образующихся при сгорании свечей.

На рис. 5 приведены результаты экспериментальных исследований влияния количества сгораемых свечей на подсвечнике *n*, %, на параметры воздуха в зоне всасывания зонта $t_{сп}$, ºС, $v_{сп}$, м/с, $L_з$, м^3/ч, $q_{сп}$, мг/м^3.

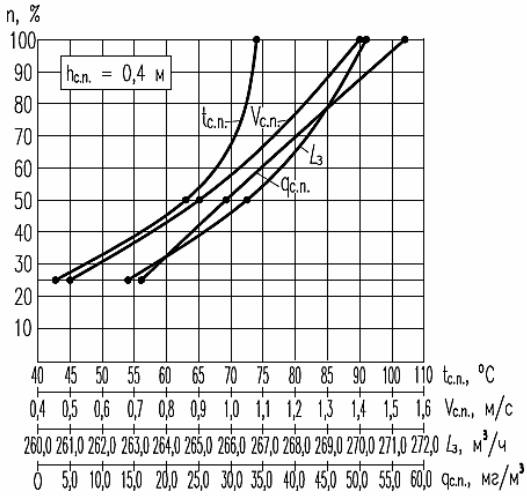


Рис. 5. Графики изменения параметров воздуха в зоне всасывания зонта в зависимости от количества сгораемых свечей *n*, %, на подсвечнике:
$h_{сп}$ – высота свободного пространства, мм; $v_{сп}$ – скорость воздуха в зоне всасывания, м/с;
$t_{сп}$ – температура воздуха в зоне всасывания, ºС; $q_{сп}$ – объемная концентрация копоти и сажи в воздушном потоке, мг/м^3; $L_з$ – объем воздуха, удаляемого зонтом, м^3/ч

Анализ графиков, приведенных на рис. 5, позволяет сделать вывод, что с увеличением числа сжигаемых свечей на подсвечнике от 25 до 100 % резко возрастает поступление теплоты в свободное пространство зонта. В результате движущаяся вверх архимедова сила увеличивает общий импульс восходящего потока, что приводит к росту скорости $v_{сп}$, температуры $t_{сп}$, объемной концентрации копоти и сажи $q_{сп}$, а также расхода воздуха, удаляемого зонтом $L_з$. Эти особенности являются положительными, и необходимо их учитывать при проектировании эффективной местной системы вытяжной вентиляции с использованием зонтов для локализации вредностей при сгорании свечей. Отрицательным является рост объемной концентрации копоти и сажи в свободном пространстве за счет увеличения количества сжигаемых свечей.

В процессе экспериментальных исследований рассматривались также различные варианты высоты установки вытяжного зонта над подсвечником $h_{сп}$, мм, в пределах 300 мм, 400 мм, 500 мм. Вследствие указанных вариантов $h_{сп}$, мм, анализировались изменения скорости $v_{сп}$, м/с, температуры $t_{сп}$, ºС, расход воздуха $L_з$, м^3/ч, и объемная концентрация копоти и сажи $q_{сп}$, мг/м^3 в зоне свободного пространства между нижней кромкой зонта и подсвечником. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 6.

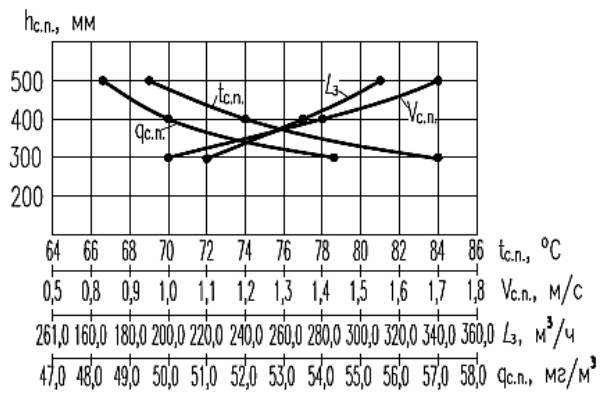


Рис. 6. Графики изменения параметров воздуха в зоне всасывания зонта в зависимости от высоты установки $h_{сп}$, мм, зонта над подсвечником: $v_{сп}$ – скорость воздуха в зоне всасывания, м/с; $t_{сп}$ – температура воздуха в зоне всасывания, ºС; $q_{сп}$ – объемная концентрация копоти и сажи в воздушном потоке, мг/м^3; $L_з$ – объем воздуха, удаляемого зонтом, м^3/ч

Известно, что воздух к вытяжному отверстию свободно устанавливаемого зонта движется со всех сторон и в зависимости от высоты свободного пространства $h_{сп}$, мм, изменяется объем воздуха (стока), подтекаемого из помещения к восходящему потоку в зоне всасывания. Анализ приведенных графиков (см. рис. 6) показывает, что с увеличением $h_{сп}$, мм, наблюдается значительный рост объемного расхода $L_з$, м^3/ч, воздуха в потоке и $v_{сп}$, м/с, в зоне всасывания, что является положительным процессом. В то же время выявлено снижение температуры $t_{сп}$, ºС, и объемной концентрации сажи и копоти $q_{сп}$, мг/м^3, в потоке за счет их разбавления в объеме воздуха в зоне всасывания.

Доказано, что наилучший результат по уменьшению объемной концентрации копоти и сажи достигается при высоте установки зонта $h_{сп}$ = 400 мм, производительности зонта $L_з$ от 270 до 500 м^3/ч. При этом объемная концентрация копоти и сажи на всасывающей стороне зонта при 100 % заполняемости свечей $q_{сп}$ = 54,3 мг/м^3, а на выходе из системы местной вытяжной вентиляции $q_{сп}$ = 48,4 мг/м^3 и уменьшается на 11 %. Следовательно, полученный результат позволяет сделать вывод, что поступления загрязнений в зал богослужения незначительные. Разница в 11 % объясняется налипанием копоти и сажи на поверхностях зонта и системы местной вытяжной вентиляции за счет турбулентной диффузии данных вредностей в сторону помещения и их ассимиляции в потоке удаляемого зонтом воздуха.

Полученные результаты подтверждают эффективность применения местной вытяжной вентиляции с установкой над подсвечниками зонтов для улавливания и удаления вредностей от сгорания свечей на высоте $h_{сп}$ = 400 мм.

Результаты экспериментальных исследований профилей скоростей, температуры в зоне всасывания вытяжного отверстия зонта в зависимости от количества горящих свечей над подсвечником и высоты свободного пространства от подсвечника до нижней кромки зонта позволили оптимизировать установочные размеры зонта, расход удаляемого воздуха, скорость потока воздуха и сократить концентрацию копоти и сажи, поступающих в зал богослужения православных соборов.

Список литературы

1. ГОСТ 12.3.018–79 ССБТ. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. – М., 1979.
2. Ахназарова, С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1985. – 327 с.
3. Боровицкий, А.А. Исследования закономерностей взаимодействия воздушных потоков в вытяжном зонте / А.А. Боровицкий, С.В. Угарова // Актуальные проблемы современного строительства: межвуз. сб. науч. тр. – СПб.: СПбГАСУ, 2010. – С.55–58.
4. 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.
5. Еремкин, А.И. Методика расчета воздухообмена системы кондиционирования воздуха вытесняющего типа в залах богослужения православных соборов / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 3. – С. 161–168.
6. Еремкин, А.И. Влияние санитарно-гигиенического состояния микроклимата в залах богослужения православных соборов на физиологическое состояние прихожан / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, А.Г. Багдасарян // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2020. – № 6. – С. 151–156.
7. Еремкин, А.И. Теоретические основы и рекомендации по созданию местной вытяжной вентиляции продуктов сгорания свечей в зале богослужения / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, В.А. Леонтьев, К.А. Петрова // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1. – С. 195–202.
8. Еремкин, А.И. Совершенствование систем климатического обеспечения комфортных условий и сохранности историко-культурного наследия в православных культовых сооружениях / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, Д.А. Трофимов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2021. – № 4. – С. 36–45.
9. Еремкин, А.И. Теоретические и экспериментальные исследования по определению массовой концентрации сажи и копоти в воздухе залов богослужения / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, А.А. Мишин, А.В. Мочалов // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 1. – С. 81–87.
10. Еремкин, А.И. Комплексное решение локализации загрязнений в процессе сгорания церковных свечей в православных сооружениях / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, Н.А. Орлова, А.А. Мишин, А.В. Мочалов // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2. – С. 104–116.
11. Ерёмкин, А.И. Теоретические основы и рекомендации по созданию местной вытяжной вентиляции продуктов сгорания свечей в зале богослужения / А.И. Ерёмкин, А.Г. Аверкин, В.А. Леонтьев, К.А. Петрова, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 195–202.
12. Еремкин, А.И. Инженерные системы поддержания микроклимата православных соборов / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, К.А. Петрова // Образование и наука в современном мире. Инновации – 2021. – № 1. – С. 87–91.
13. Рогова, Т.Н. Влияние турбулентной диффузии газов на расчет объемов удаляемого воздуха / Т.Н. Рогова // Мир транспорта. – 2006. – № 1. – С. 16–21.

14. Килин, П.И. Расчет и устройство вытяжных зонтов / П.И. Килин, Т.Н. Рогова. – Екатеринбург: УрГУПС, 2005. – 71 с.

15. Позин, Г.М. Местная вытяжная вентиляция – самый эффективный способ организации воздухообмена в помещении / Г.М. Позин // Инженерные системы. – 2008. – № 3. – С. 40–45.

16. Сотников, А.Г. Теоретически-экспериментальное обоснование метода оптимизации воздухообменов в системах промышленной вентиляции / А.Г. Сотников, А.А. Боровицкий // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 2. – С. 54–59.

17. Талиев, В.Н. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Талиев. – М.: Стройиздат, 1979. – 295 с.

18. Шепелев, И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении / И.А. Шепелев. – М.: Стройиздат, 1978. – 144 с.

References

1. GOST 12.3.018–79 SSBT. Ventilation systems. Methods of aerodynamic tests. – M., 1979.

2. Akhnazarova, S.L. Methods of experiment optimization in chemical technology / S.L. Akhnazarova, V.V. Kafarov. – M.: Higher School, 1985. – 327 p.

3. Borovitsky, A.A. Studies of the laws of interaction of air flows in the exhaust hood / A.A. Borovitsky, S.V. Ugarova // Actual problems of modern construction: interuniversity. Sat. scientific tr. – SPb.: SPbGASU, 2010. – P.55–58.

4. 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.

5. Eremkin, A.I. Method for calculating the air exchange of a displacement air conditioning system in the worship halls of Orthodox cathedrals / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 3. – P. 161–168.

6. Eremkin, A.I. Influence of the sanitary-hygienic state of the microclimate in the worship halls of Orthodox cathedrals on the physiological state of the parishioners / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, A.G. Bagdasaryan // Education and science in the modern world. Innovations – 2020. – No. 6. – P. 151–156.

7. Eremkin, A.I. Theoretical foundations and recommendations for the creation of local exhaust ventilation of candle combustion products in the worship hall / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, V.A. Leontiev, K.A. Petrova // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1. – P. 195–202.

8. Eremkin, A.I. Improving the systems of climatic support for comfortable conditions and the preservation of historical and cultural heritage in Orthodox religious buildings / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, D.A. Trofimov // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. – 2021. – No. 4. – P. 36–45.

9. Eremkin, A.I. Theoretical and experimental studies to determine the mass concentration of soot and soot in the air of worship halls / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, A.A. Mishin, A.V. Mochalov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 1. – P. 81–87.

10. Eremkin, A.I. A comprehensive solution for the localization of pollution during the combustion of church candles in Orthodox buildings / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, N.A. Orlova, A.A. Mishin, A.V. Mochalov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2. – P. 104–116.

11. Eremkin, A.I. Theoretical foundations and recommendations for the creation of local exhaust ventilation of candle combustion products in the worship hall / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, V.A. Leontiev, K.A. Petrova, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1 (46). – P. 195–202.

12. Eremkin, A.I. Engineering systems for maintaining the microclimate of Orthodox cathedrals / A.I. Eremkin, I.K., Ponomareva K.A. Petrova // Education and science in the modern world. Innovations – 2021. – No. 1. – P. 87–91.

13. Rogova, T.N. Influence of turbulent diffusion of gases on the calculation of volumes of removed air / T.N. Rogova // Mir transporta. – 2006. – No. 1. – P. 16–21.

14. Kilin, P.I. Calculation and arrangement of exhaust hoods / P.I. Kilin, T.N. Rogova. – Ekaterinburg: UrGUPS, 2005. – 71 p.

15. Pozin, G.M. Local exhaust ventilation is the most efficient way to organize indoor air exchange / G.M. Pozin // Engineering Systems. – 2008. – No. 3. – P. 40–45.

16. Sotnikov, A.G. Theoretical and experimental substantiation of the method for optimizing air exchanges in industrial ventilation systems / A.G. Sotnikov, A.A. Borovitsky // Civil Engineering Journal. – 2012. – No. 2. – P. 54–59.

17. Taliev, V.N. Aerodynamic ventilation / V.N. Taliev. – M.: Stroyizdat, 1979. – 295 p.

18. Shepelev, I.A. Aerodynamics of air flows in the room / I.A. Shepelev. – M.: Stroyizdat, 1978. – 144 p.

УДК 528.4 DOI 10.54734/20722958_2023_2_128

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

Акифьев Илья Владимирович,
кандидат экономических наук, доцент кафедры «Землеустройство и геодезия»
E-mail: zig@pguas.ru

Ерёмкин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция»
E-mail: eremkin@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

Akifev Ilya Vladimirovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Land Management and Geodesy»
E-mail: zig@pguas.ru

Eremkin Aleksander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Heat, Gas Supply and Ventilation»
E-mail: eremkin@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

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ СПУТНИКОВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

И.В. Акифьев, А.И. Еремкин, И.К. Пономарева

Показано, как развитие современных технологий позволяет сделать доступными застройку, прокладку дорог, магистралей теплогазопроводов на территориях, которые на сегодняшний момент малоизучены ввиду своего труднодоступного месторасположения либо удалённости от крупных населённых центров и дорог. Отмечено, что получение информации о координатах потенциальных строительных площадок с помощью спутниковых технологий устраняет недостатки контактного способа сбора информации, а во многих ситуациях полностью заменяет его.

Ключевые слова: строительство, планировка объекта, дорога, магистраль, инженерные коммуникации, высота здания, геодезические работы в строительстве, спутниковые технологии, глобальная навигационная система

THE STUDY OF THE ACCURACY OF SATELLITE POSITIONING IN CONSTRUCTION

I.V. Akifev, A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva

The development of modern technologies makes it possible to make building available in areas that are currently little explored due to their remote location or remoteness from large settlements centers and roads. Obtaining information about the coordinates of potential construction sites using satellite technology eliminates the shortcomings of the contact method of collecting information, and in many situations completely replaces it.

Keywords: construction, facility layout, road, highway, engineering communications building height, geodetic works in construction, satellite technologies, global navigation system

Актуальным направлением развития спутниковых технологий в строительстве является их позиционирование, ориентированное на массовое применение в условиях удалённости стройплощадки от населённых пунктов. На сегодняшний день выявлены функциональные преимущества глобальной навигационной спутниковой системы

(далее ГНСС) в сравнении с традиционными методами геодезии. К таким преимуществам можно отнести: широкий диапазон точностей, меньшую зависимость от погодных условий, времени суток и года, высокую автоматизацию, оперативность наблюдений, возможность производить работы по точному определению координат и высот как в движении, так и непрерывно. Эти качественные отличия обусловили высокую производительность и экономическую эффективность спутниковых технологий в строительной сфере.

Реально получаемая точность спутниковых измерений, проводимых указанными способами, дает среднюю квадратическую ошибку до 2 см. Подобная точность вполне оправдана при постройке зданий и сооружений, прокладке дорог, трасс, магистралей различного назначения. При этом экономическая целесообразность такого решения является достаточно высокой.

Современные технологии ГНСС-наблюдений широко используются при проведении разнообразных съемок в строительстве. Помимо топографических, следует отметить следующие виды съемок:

– съемки для решения задач землеустройства;

– съемки для решения задач планировки территории под строительство и благоустройство;

– съемки для прокладки дорог всех типов;

– съемки для прокладки инженерных сетей;

– съемки с целью обеспечения геолого-геофизических работ.

Указанный перечень непрерывно расширяется и дополняется.

Проведение спутниковых наблюдений является эффективным дополнением классических методов, применяемых геодезистами в строительстве. При проведении съемок, например, в районах с густым лесом или плотной застройкой поступающие от навигационных спутников радиосигналы экранируются от различного рода препятствий.

В момент проектирования и проведения различных съемок спутниковыми методами особо важное внимание отведено снижению ошибок измерений, обусловленных отражениями от окружающих объектов и подстилающей поверхности. Для решения этой проблемы производится постоянная модернизация ГНСС – и системы в целом, и приемников в частности, совершенствуются алгоритмы обработки поступающих от навигационных спутников данных, направленных на снижение влияния отражений сигналов.

Анализ мировых трендов в производстве геодезических работ в строительстве показывает, что использование только лишь классических способов и средств при их выполнении практически исчерпаны. Высоким требованиям, таким, как экономическая эффективность, точность измерения, скорость выполнения строительных работ, предъявляемым к современным технологиям в области строительной геодезии, отвечают только методы, основанные на применениях ГНСС-технологий.

Результаты измерений глобальных навигационных спутниковых систем первого поколения основывались на измерении доплеровского сдвига; для вычисления координат объекта глобальные навигационные спутниковые системы второго поколения уже применяют дальномерный метод определения сигналов. Структура радиосигналов, генерируемых и посылаемых спутником, такова, что дает возможность точно высчитать задержку их распространения до конечного пользователя. Также эти радиосигналы передают информацию, которая решает задачу вычисления положения навигационного космического аппарата и его скорость.

Всю систему измерений ГНСС можно разделить на следующие подкатегории:

– основа системы – спутниковая трилатерация;

– измерение длины линии до НКА (навигационные космические аппараты) путем спутниковой дальнометрии;

– единство хода часов спутника и приёмника;

– геометрия спутников – расположение навигационных космических аппаратов на орбите относительно других спутников;

– определение, учет и коррекция возникающих ошибок и задержек.

Определение точных координат на поверхности Земли возможно тогда, когда известно точное расположение на орбите навигационных космических аппаратов; оно осуществляется на основе измерения расстояний от группы навигационных космических аппаратов. Таким образом, навигационные космические аппараты, по большому счету, являются пунктами, координаты которых вычислены и известны. Зная точное расстояние от одного НКА, можно нарисовать воображаемую сферу определённого радиуса вокруг него. Если проделать ту же операцию для второго НКА, расположенного поблизости, то искомое местоположение будет расположено где-то в пересечении двух полученных сфер. Третья воображаемая сфера, описанная вокруг НКА, используется спутником для определения двух точек на окружности. Задача сводится только к верному выбору точки. Однако одна из точек исключается, так как либо ей характерна высокая скорость, либо она расположена на или под поверхностью Земли.

Принцип спутниковой дальнометрии основан на измерении расстояний до трёх навигационных спутников (рис. 1).

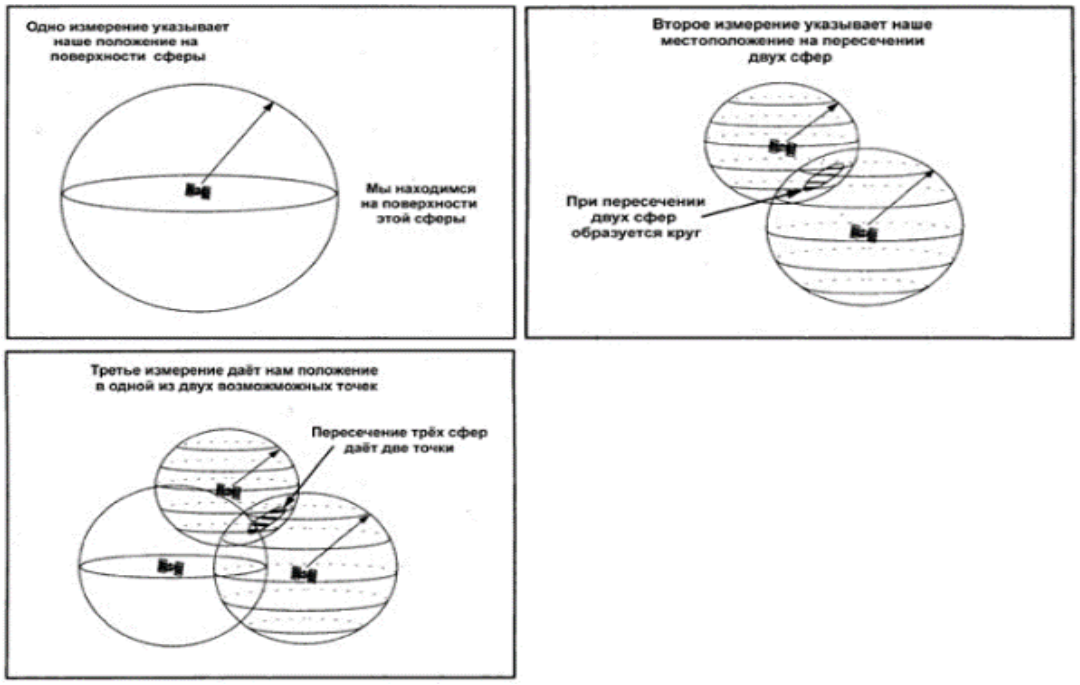


Рис. 1. Принцип спутниковой трилатерации

Время, за которое излученный навигационным спутником радиосигнал достигнет приёмника, умноженное на константу в виде скорости света, позволяет вычислить расстояние до НКА с большой точностью. В данном случае необходимо владеть информацией о точном времени, когда этот сигнал был сгенерирован и излучен НКА. Для решения этой задачи на НКА и в ГНСС-приёмнике генерируется идентичный псевдослучайный код (рис. 2).

В процессе строительства при работе с ГНСС в основном используют C/A-код (код «грубого» захвата GPS, общедоступный код). Однако ряд геодезических приёмников может работать с P-кодом (помехоустойчивый код GPS). Внедрить его в работу на строительной площадке можно быстро и без каких-либо экономических затрат. Приёмник проверяет входящий сигнал с НКА и определяет, когда он генерировал такой же код. Искомое расстояние вычисляется путем умножения скорости света на вычисленную разницу. Таким образом, временная задержка может быть определена приемником в любой момент времени. Также стоит заметить, что сигнал для каждого

НКА является уникальным и позволяет идентифицировать конкретный навигационный спутник.

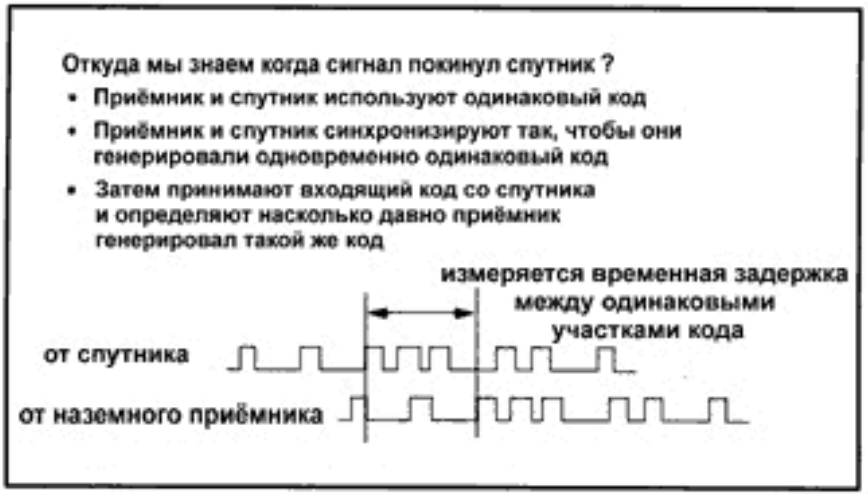


Рис. 2. Принцип спутниковой дальнометрии

Таким образом, использование спутниковой трилатерации вкупе с работой геодезических приёмников с Р-кодом позволяет повысить необходимую точность для всех видов строительных работ и получать более качественные координаты за счёт исключения помех от ионосферы.

Эволюция ГНСС имеет вектор на повышение точности измерений и доступности позиционирования, обеспечения единства навигационного поля, а также расширения и популяризации разнообразных дополнительных сервисов. Выделяется два основных направления развития ГНСС, неразрывно связанных с повышением точности предоставляемых услуг:

- модернизация действующих (GPS, ГЛОНАСС, Галилео, BeiDou) и создание новых ГНСС;
- развитие функциональных дополнений (ФД).

Для увеличения точности ГНСС-измерений и доступности дополнительных услуг, обеспечения целостности навигационного поля авторами предлагаются следующие функциональные дополнения к действующим ГНСС (см. таблицу).

Система функциональных дополнений к действующим ГНСС

Параметры	Система функциональных дополнений			
	Местные дифференциальные системы	Региональные дифференциальные системы	Широкозонные системы дифференциальной коррекции	Глобальные системы дифференциальной коррекции
Состав	несколько станций сбора и обработки измерений, 1 канал передачи данных	локальная сеть станций измерений, множество каналов передачи данных в вычислительный центр	региональная сеть станций измерений, система каналов передачи данных в вычислительный центр, наземный комплекс управления	глобальная сеть станций измерений, каналы передачи данных в вычислительный центр, наземный комплекс управления
Корректирующая информация	поправки к навигационным параметрам, полученным пользователем, данные о единстве системы	поправки к навигационнымпараметрам, полученным пользователем, данные о единстве системы	поправки к эфемеридно-временной информации, поправки к навигационнымпараметрам, измеряемым потребителем, информация о целостности системы	поправки к эфемеридно-временной информации поправки для исключения атмосферных искажений сигнала, поправки к навигационным параметрам, измеряемым потребителем, информация о целостности системы

Каналы передачи	наземные каналы	наземные каналы	космические методы	космические методы
Зона действия	до 200 км	до 2 тыс. км	до 5 тыс. км	глобальная
Погреш-ность	от 1 до 5 см	от 5 до 50 см	от 5 дм до 2 м	от 5 см до 2 м

Таким образом, применение спутниковых методов определения координат с использованием функциональных дополнений даёт возможность осуществлять строительство на удалённых площадках без предварительной рекогносцировки и длительных геодезических измерений классическими методами. Фактически при использования режима статики ГНСС-приёмники дают точность в плане 1 см, чего достаточно для всех видов работ с бетоном, металлом, кирпично-блоковыми материалами и деревянными конструкциями. Т.е. координаты потенциальных строительных площадок для возведения жилого строения, в том числе многоэтажного, прокладки дорог, магистралей теплогазопроводов можно получать с применением только ГНСС-приёмников, без использования тахеометров и теодолитов в процессе строительства. Данный подход позволяет исключить необоснованные экономические затраты в процессе строительства.

Список литературы

1. Ерёмкин, А.И. Анализ развития возможностей ГЛОНАСС для выполнения геодезических работ в строительстве на современном этапе развития спутниковых технологий / А.И. Ерёмкин, И.В. Акифьев, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 3 (52). – С. 199–212.

2. Ерёмкин, А.И. Инновационный метод выполнения геодезических работ в строительстве на принципах навигационной системы ГЛОНАСС / А.И. Ерёмкин, И.В. Акифьев, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4 (53). – С. 111–119.

3. Пономарева, И.К. Бизнес-планирование на предприятии / И.К. Пономарева, И.В. Акифьев, В.Д. Быстрова // Научное обозрение. – 2014. – № 9–2. – С. 663–665.

4. Акифьев, И.В. Формирование стратегии развития предприятий строительного комплекса в эффективных зонах деятельности: автореф. дис. ... канд. экон. наук / И.В. Акифьев. – Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2010.

5. Акифьев И.В. Формирование стратегии развития предприятий строительного комплекса в эффективных зонах деятельности: дис. ... канд. экон. наук / И.В. Акифьев. – Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2010.

6. Акифьев, И.В. Стратегия продвижения малоэтажных зданий в регионах РФ / И.В. Акифьев, И.К. Пономарева // Муниципалитет: экономика и управление. – 2019. – № 1 (26). – С. 5–15.

7. 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.

8. Постановление Правительства РФ от 24 ноября 2016 г №1240 «Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы.

9. 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».

10. ITRF2014. Description. – URL: http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/

References

1. Eremkin, A.I. Analysis of the development of GLONASS capabilities for performing geodetic works in construction at the present stage of development of satellite technologies / A.I. Eremkin, I.V. Akifiev, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 3 (52). – P. 199–212.

2. Eremkin, A.I. An innovative method for performing geodetic works in construction based on the principles of the GLONASS navigation system / A.I. Eremkin, I.V. Akifiev, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 4 (53). – P. 111–119.

3. 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.

4. Akifiev, I.V. Formation of a strategy for the development of enterprises of the construction complex in effective areas of activity: Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Economic Sciences / I.V. Akifiev. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2010.

5. Akifiev, I.V. Formation of a strategy for the development of enterprises of the construction complex in effective areas of activity: Thesis for the degree of Candidate of Economic Sciences / I.V. Akifiev. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2010.

6. Akifiev, I.V. Strategy for the promotion of low-rise buildings in the regions of the Russian Federation / I.V. Akifiev, I.K. Ponomareva // Municipality: economics and management. – 2019. – No. 1 (26). – P. 5–15.

7. Gorobets, V.P. Experience of the Russian Federation in establishing the state system of coordinates in 2011 / V.P. Gorobets, G.N. Efimov, I.A. Stolyarov // Vestnik SGUGiT. – 2015. – Issue. 2 (30). – P. 24–37.

8. Decree of the Government of the Russian Federation of November 24, 2016 No. 1240 “On the establishment of state coordinate systems, the state system of heights and the state gravimetric system.

9. Federal Law of December 30, 2015 No. 431-FZ “On geodesy, cartography and spatial data and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation”.

10. ITRF2014. description. – URL: http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 69:004.94(571.6) DOI 10.54734/20722958_2023_2_134

Дальневосточный государственный аграрный университет
Россия, 675005, Дальневосточный федеральный округ, Амурская область, г. Благовещенск, ул. Политехническая 86,
тел.: +7 (4162) 99-51-15;
факс: +7 (4162) 99-99-98
Окладникова Елена Викторовна,
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительного производства и инженерных конструкций
E-mail: okladnikova_ev@mail.ru

Far Eastern State Agrarian University
Russia, 675005, Far Eastern Federal District, Amur Region, Blagoveshchensk, 86, Polytechnic St.,
tel.: +7 (4162) 99-51-15;
fax: +7 (4162) 99-99-98
Okladnikova Elena Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Construction Production and Engineering Structures
E-mail: okladnikova_ev@mail.ru

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬНУЮ ОТРАСЛЬ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Е.В. Окладникова

Рассмотрены актуальные задачи внедрения технологий информационного моделирования (ТИМ) в строительство, обоснована необходимость разработки цифровой модели объекта строительства, развития кадрового потенциала строительной отрасли Дальнего Востока, отмечены основные преимущества применения ТИМ.

Ключевые слова: технологии информационного моделирования, внедрение, ТИМ, программное обеспечение, ТИМ-компетенции

ANALYSIS OF THE MAIN FACTORS OF IMPLEMENTATION INFORMATION MODELING TECHNOLOGIES IN THE FAR EAST CONSTRUCTION INDUSTRY

E.V. Okladnikova

The article discusses actual tasks of introducing information modeling technologies, the need to develop a digital model of the construction site and developmentof human resources potential of the construction industry in the Far East, and the main advantages of using TIM

Keywords: information modeling technologies (TIH); TIM, software, TIM-competencies

В связи с действующим Постановлением Правительства РФ, а также в рамках положений Градостроительного комплекса и выполнения поручений президента России с 1 марта 2022 года обязательным становится формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства. Это касается всех застройщиков, технических заказчиков, эксплуатирующих организаций, если на объект

выделены средства из бюджетов муниципального, регионального или федерального уровней.

Внедрение и использование технологии информационного моделирования в настоящее время становится необходимостью при проектировании, строительстве и эксплуатации промышленных и гражданских объектов (рис. 1).

Рис. 1. Структура информационного моделирования

При этом выявляется потребность в разработке единых методических подходов к построению архитектуры информационного моделирования на государственном уровне с учетом имеющейся практики определения стоимости строительства при управлении проектами [1].

Согласно результатам мониторинга разработанные документы в области ТИМ имеют менее четверти российских регионов. Особенно остро эта проблема стоит в дальневосточных регионах, в частности в Амурской области.

Уже сейчас все участники строительного процесса понимают актуальность и необходимость активного внедрения технологий информационного моделирования во все сферы строительства. Руководители и специалисты всех проектных, строительных и эксплуатирующих компаний, а также государственные и коммерческие заказчики и застройщики заинтересованы в изучении ТИМ. При этом необходимо со всей ответственностью подойти к вопросам подготовки кадров строительной отрасли с ТИМ-компетенциями, развития и применения отечественного программного обеспечения для строительства.

Цифровая трансформация строительной отрасли своей целью ставит автоматизацию всех стадий жизненного цикла объекта — от проектирования до эксплуатации зданий [2].

Все возводимые современные здания и сооружения с каждым годом становятся всё более сложными во всех отношениях (рис. 2). Это касается и визуального облика, и конструктивного устройства, и технического оснащения, которые непрерывно взаимодействуют между собой. Всё это взаимодействие должно быть отражено в проекте, которому просто необходима соответствующая цифровая модель, способная учесть связь всех систем здания, скоординировать работу всех служб, которые будут его создавать.

Рис. 2. Цифровая визуализация объекта (фото: www.pokter.ru)

Технология информационного моделирования (ТИМ) – это технология создания, управления и хранения информации о зданиях или сооружениях на весь период их проектирования, эксплуатации и последующего обслуживания [3].

ТИМ-модель объекта должна содержать полную информацию обо всех характеристиках и элементах, начиная с несущих конструкций и заканчивая параметрами используемых строительных материалов, вплоть до отделочных (рис. 3). Также информационная модель должна содержать сведения о стоимости применяемых материалов, об этапах и сроках выполнения работ, что позволит застройщику точно просчитать экономическую эффективность объекта.

Рис. 3. Цифровая модель здания

Ключевая особенность цифровой модели объекта – это возможность видеть весь проект в целом, соединить в комплексе инженерно-технические, финансово-экономические и другие аспекты с возможностью внесения при необходимости моментальных изменений в любые отдельные её структуры.

ТИМ по сути является базой данных создаваемого объекта, то есть это полная цифровая информация об объекте, используемая для его проектирования, строи-

тельства и эксплуатации, позволяющая объединить всех смежников на одной виртуальной площадке, увидеть ситуацию целиком с высокой детализацией. Процесс ТИМ представляет собой коллективное формирование информационной модели здания или сооружения (рис. 4), которую в дальнейшем можно использовать на всех этапах жизненного цикла объекта – от идеи создания до эксплуатации, реконструкции и даже демонтажа.

Рис. 4. Этапы формирования информационной модели

Созданная модель должна обладать полной интеллектуальной информацией об архитектурно-строительных, расчетно-конструктивных, организационно-технологических, инженерно-коммуникационных, финансово-экономических и других важнейших характеристиках объекта.

С помощью данного метода моделирования в одном проекте можно объединить всеобъемлющие данные по архитектурным, конструктивным, технологическим, инженерным, экономическим и другим решениям (рис. 5).

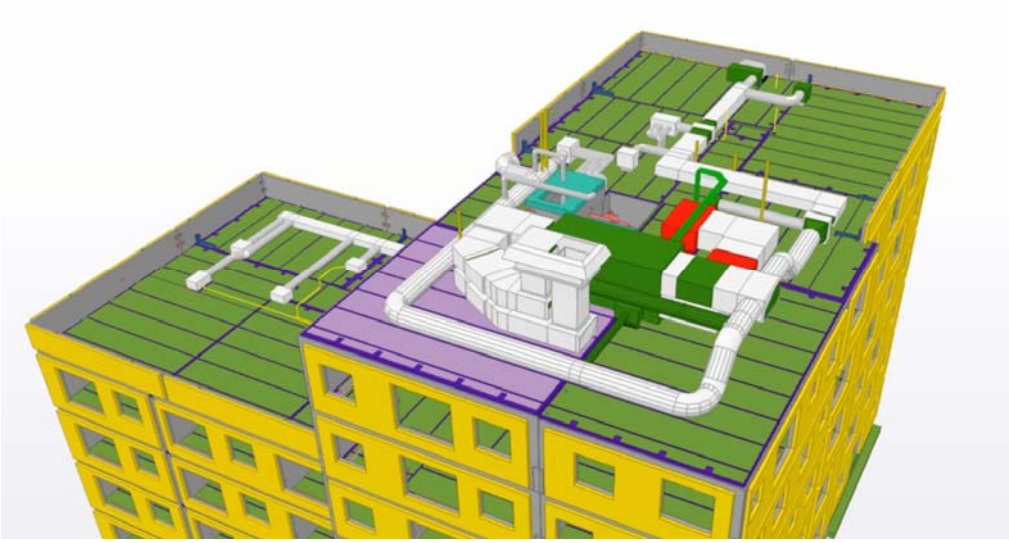


Рис. 5. Объединение смежных процессов на виртуальной площадке

Это позволит в комплексе избежать ошибок, вовремя внести при необходимости исправления и уточнения (рис. 6), увеличить эффективность проекта.

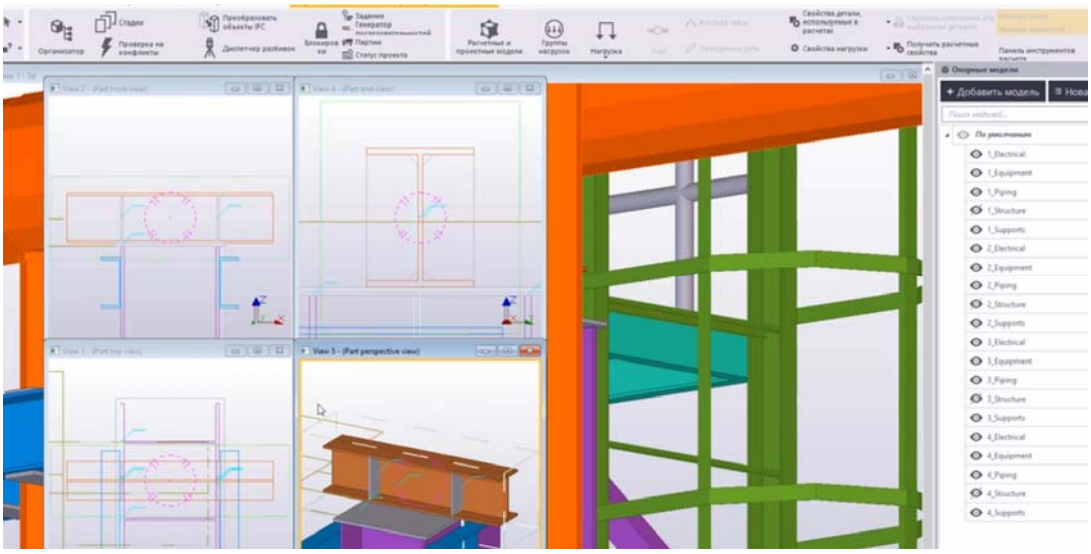


Рис. 6. Создание недостающих чертежей на любом этапе

В результате любое сооружение представляется как единый объект, в котором все элементы связаны и взаимосвязаны. При внесении каких-либо изменений система автоматически пересчитает все остальные данные. Это позволяет избежать необходимости корректировать чертежи, а также не допускать ошибок при проектировании и строительстве.

Таким образом, компьютерная визуализация обладает конкретными техническими характеристиками, что дает возможность отследить все этапы жизненного цикла здания или сооружения, включая возведение, эксплуатацию, ремонт и даже снос (рис. 7).

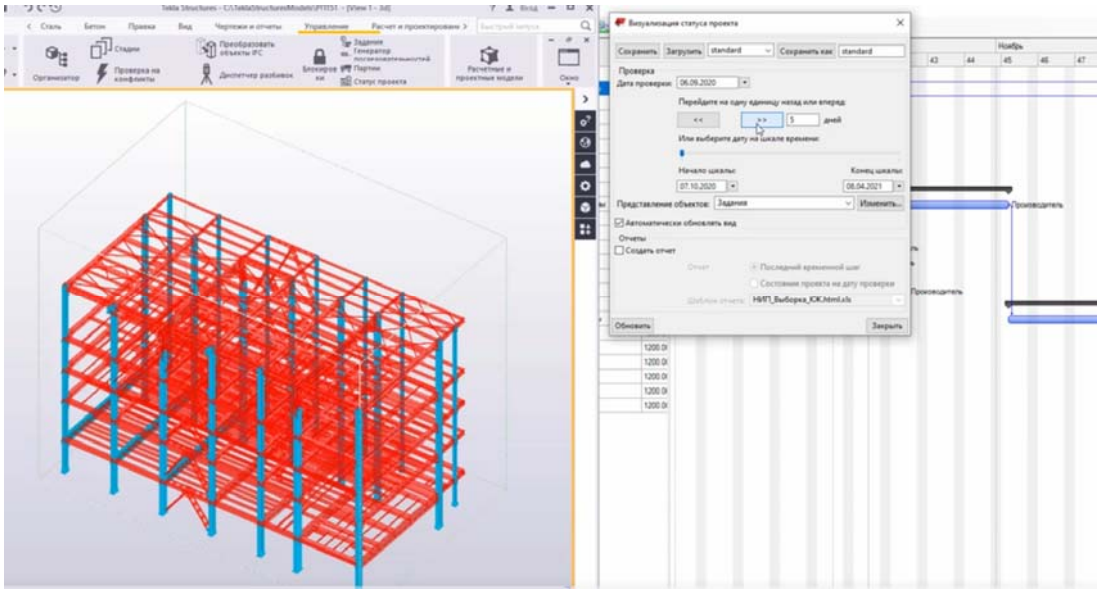


Рис. 7. Отслеживание текущего состояния объекта на любом этапе

Внедрение технологии информационного моделирования в строительство направлено на оптимизацию всех строительных процессов, на увеличение прибыли строительных компаний, на рост их конкурентоспособности, на повышение безопасности труда и снижение финансовых затрат, на сокращение сроков возведения объектов, на появление инновационных строительных материалов [4]. Всё это позволяет строителям внедрять самые смелые идеи, находить новые решения.

Одним из наиболее важных преимуществ технологии информационного моделирования является возможность командной работы на расстоянии. Над общими

задачами могут трудиться люди, находящиеся в разных городах и даже странах; при этом они имеют возможность свериться с полученными результатами, что в условиях современного ритма жизни является очень актуальным. Скорость работы при сохранении ее качества и оптимизация деятельности становятся главными приоритетами (рис. 8).

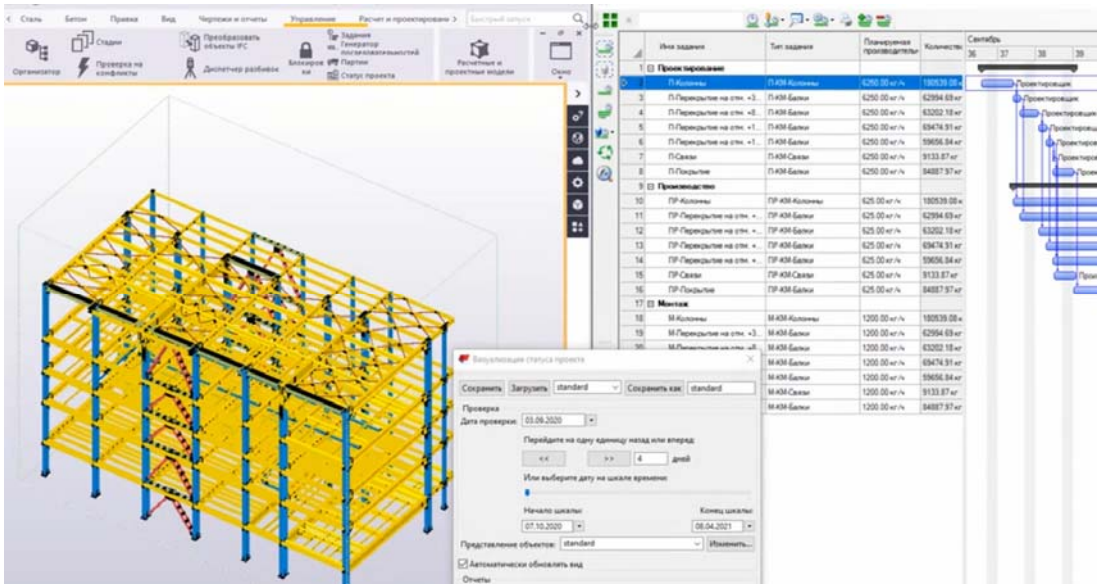


Рис. 8. Перенос информации из модели на график производства

Активное внедрение технологий информационного моделирования происходит в проектно-строительном комплексе России [5]. Для решения задач сооружения и эксплуатации строительных объектов всё чаще находят применение российские технологии информационного моделирования. При этом рассматривается региональный опыт создания и использования цифровых информационных моделей.

Стремительная цифровая трансформация строительной отрасли в России и в мире, изменение геополитической обстановки делают Дальний Восток одной из самых перспективных площадок в России для внедрения новых цифровых инструментов на всех этапах жизненного цикла объектов капитального строительства. С учетом внешнеполитических обстоятельств остро созрела необходимость в развитии отечественного программного обеспечения ТИМ.

Одной из актуальных задач является своевременное информирование всех участников строительного процесса о внедрении продуктов отечественных разработчиков программного обеспечения для строительного комплекса России.

Для более эффективного внедрения ТИМ в городах Дальнего Востока (Хабаровске, Благовещенске, Владивостоке и других) проводятся форумы и дискуссионные площадки, где проходят демонстрации новых технологий и материалов, а также обсуждение стремительной цифровизации строительной отрасли, обсуждаются цифровые сервисы, услуги на всех этапах инвестиционно-строительного процесса, эксплуатации зданий и сооружений.

В этих мероприятиях принимают участие все компании строительной отрасли Дальнего Востока – застройщики, строительные подрядчики, органы государственной власти, компании – поставщики строительных материалов, механизмов и оборудования, а также образовательные организации. Дальневосточный ТИМ-форум уже стал регулярной площадкой для специалистов информационного моделирования всех направлений: жилищного, гражданского, промышленного, инфраструктурного строительства.

Большая роль в формировании и развитии кадрового потенциала строительной отрасли отводится высшим образовательным учреждениям Дальнего Востока (ТОГУ, ДВГУПС, ДВФУ, Дальневосточный ГАУ). Так, например, для обеспечения необхо-

димыми кадрами кафедра «Строительство» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (г. Хабаровск) в 2022 году впервые на Дальнем Востоке начала подготовку строителей по программе «Информационное моделирование в строительстве».

В настоящее время необходимым и актуальным является проведение активного обучения специалистов всех структур, связанных с процессами проектирования, строительства, обслуживания и эксплуатации зданий и сооружений, внедрение соответствующего программного обеспечения, обновление технического оборудования для дальнейшего использования технологии информационного моделирования [6].

Список литературы

1. Ларионов, А.Н. Формирование модели капитальных затрат в реалиях цифровизации строительства / А.Н. Ларионов, В.В. Соловьев, А.А. Морозов // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 1. – С. 91–101. – DOI :10.22227/1997-0935.2023.1.91-101.

2. Адамцевич, Л.А. Перспективные в условиях цифровой трансформации строительной отрасли технологии индустрии 4.0 / Л.А. Адамцевич, И.В. Сорокин, А.В. Настычук // Строительство и архитектура. – 2022. – №. 4. – С. 101–105. – DOI: https://doi.org/10.29039/2308-0191-2022-10-4-101-105.

3. Тимошенко, Т.А. Внедрение ТИМ (BIM) в строительстве в России / Т.А. Тимошенко, Е.С. Нигорожина // Университетская наука. – 2022. – № 1(13). – С. 91–94. – EDN WWGDES.

4. Алешина, И.А. Повышение эффективности деятельности строительных предприятий в результате внедрения BIM-технологий / И.А. Алешина, И.Н. Лямцева // Финансовая экономика. – 2021. – № 1. – С. 118–121. – EDN MKULJY.

5. Вечелковский, Б.Е. Анализ ключевых факторов внедрения технологии информационного моделирования зданий в современном строительстве / Б.Е. Вечелковский // Современная техника и технологии. – 2015. – № 1. – URL: https://technology.snauka.ru/2015/01/5625 (дата обращения: 24.02.2023).

6. Трегубов, А.П. Особенности кадрового обеспечения программы внедрения ТИМ-технологий в строительстве / А.П. Трегубов, А.С. Страхов, А.С. Грицун // XXVI Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области: сборник материалов конференции, Волгоград, 16–28 ноября 2021 года. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2022. – С. 306–308. – EDN ZAYSDD.

References

1. Larionov, A.N. Formation of a model of capital expenditures in the realities of digitalization of construction / A.N. Larionov, V.V. Soloviev, A.A. Morozov // Bulletin of MGSU. – 2023. – Vol. 18, № 1. – P. 91–101. – DOI :10.22227/1997-0935.2023.1.91-101.

2. Adamtsevich, L.A. Promising in the context of the digital transformation of the construction industry industry technologies 4.0 / L.A. Adamtsevich, I.V. Sorokin, A.V. Nastychuk // Construction and architecture. – 2022. – №. 4. – P. 101–105. – DOI: https://doi.org/10.29039/2308-0191-2022-10-4-101-105.

3. Timoshenko, T.A. Introduction of TIM (BIM) in construction in Russia / T.A. Timoshenko, E.S. Nigorozhina // University Science. – 2022. – № 1(13). – P. 91–94. – EDN WWGDES.

4. Aleshina, I.A. Increasing the efficiency of construction enterprises as a result of the introduction of BIM technologies / I.A. Aleshina, I.N. Lyamtseva // Financial economics. – 2021. – № 1. – P. 118–121. – EDN MKULJY.

5. Vechelkovsky, B.E. Analysis of key factors of implementation of information modeling technology of buildings in modern construction / B.E. Vechelkovsky // Modern technology and technologies. – 2015. – No. 1. – URL: https://technology.snauka.ru/2015/01/5625 (accessed date: 24.02.2023).

6. Tregubov, A.P. Features of personnel support for the program for introducing TIM technologies in construction / A.P. Tregubov, A.S. Strakhov, A.S. Gritsun // XXVI Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd Region: a collection of conference materials, Volgograd, November 16-28, 2021. – Volgograd: Volgograd State Technical University, 2022. – P. 306–308. – EDN ZAYSDD.

УДК [72+69] : 620.91 – 049.35 DOI 10.54734/20722958_2023_2_142

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,
главный научный сотрудник научно-исследовательского сектора
E-mail:ambereg@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 Aleksandr Markovich,
Doctor of Sciences, Professor Chief Researcher of the Research Sector
E-mail: ambereg@rambler.ru

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ВОЗДУХООБМЕНА

А.М. Береговой

На основе экспериментальных исследований и расчетного моделирования разработаны конструктивные решения и технические устройства, позволяющие улучшить воздухообмен за счет использования возобновляемых источников энергии и утилизации тепла помещений. Дана оценка энергосберегающего эффекта.

Ключевые слова: воздухообмен помещений, регулирование, возобновляемые источники энергии, тепловой поток помещений, утилизация, наружные ограждения, влажностное состояние, энергосбережение

RENEWABLE ENERGY SOURCES AND UTILIZATION OF THE HEAT FLOW OF THE PREMISES AT REGULATION OF AIR EXCHANGE

A.M. Beregovoy

On the basis of experimental studies and computational modeling, design solutions and technical devices have been developed to improve air exchange through the use of renewable energy sources and heat recovery in rooms. An estimate of the energy-saving effect is given.

Keywords: indoor air exchange, regulation, renewable energy sources, indoor heat flow, recycling, outdoor fences, humidity state, energy saving

Результаты исследований и опыт эксплуатации зданий различного назначения указывают на тесную взаимосвязь естественной вентиляции с влажностным состоянием наружных ограждающих конструкций и относительной влажностью воздуха помещений [1, 2].

По данным зарубежных ученых, в период пандемии коронавируса только в сухом воздухе помещений (при $\varphi \leq 50$ %) вирус значительно ослабевает уже в течение нескольких секунд.

Для оценки влияния естественной вентиляции на влажностное состояние наружных ограждений и относительную влажность воздуха помещений в г. Пензе были проведены натурные обследования многоэтажных жилых зданий по сериям 90, 101 и 125.

Результаты обследований в холодный период эксплуатации показали, что на внутренней поверхности наружных стен отдельных квартир появляются сырые участки, плесень, вздутие обоев из-за выпадения конденсационной влаги на внутренней поверхности или в толщине ограждения (см. рисунок).

Увлажненные участки стен и плесень в местах примыкания стеклопакетов к откосам

Результаты лабораторных испытаний проб материала керамзитобетонных панелей домов серии 90 показали, что средняя величина влажности этого материала на 20 % превышает предельно допустимое приращение влажности.

Одна из причин чрезмерного увлажнения наружных стен – превышение проектной плотности керамзитобетона, что увеличило теплопроводность конструкции ограждения. Так, в домах серии 101 фактическая плотность превышала проектное значение во всех взятых пробах.

Как показали инструментальные замеры скорости движения воздуха в помещениях квартир, значительное влияние на влажностное состояние стен всех обследованных зданий оказывала неэффективная работа системы естественной вентиляции. Так, в 2-комнатных квартирах 10-этажных домов по сериям 90 и 101 воздухообмен составлял 34…46 % даже при открытии створки стеклопакета до упора на горизонтальной оси. Основными причинами неэффективной вентиляции помещений являются: неправильное регулирование притока воздуха при эксплуатации стеклопакетов, дефекты вытяжных каналов, строительные недоделки в конструкциях чердаков, что вызывает необходимость внедрения автоматизированной системы регулирования приточного воздуха.

Для формирования дополнительного притока вентиляционного воздуха на основе экспериментальных исследований и расчетного моделирования разработаны энергосберегающие конструктивные решения и технические устройства, позволяющие улучшить воздухообмен за счет использования возобновляемых источников энергии и утилизации тепла помещений. Результаты исследований приведены в таблице.

Энергосберегающие конструктивные решения и устройства
по дополнительному притоку воздуха

Конструктивные решения и устройства по регулированию параметров микроклимата	Описание функции (объем поступающего воздуха G и теплоэнергетические показатели)	Условия достижения нормативного воздухообмена. Эффект энергосбережения (Э), %
1	2	3
Упрощенная конструкция модулей плоского солнечного коллектора [3]	$G = v\,S$ $f = Q_T / L$	1 м^2 модуля для комнаты средней площади. Доля тепла до 12,5 % от тепловой нагрузки небольшого дома
Вентилируемая воздушная прослойка в наружной стене многоэтажного дома [4]	$G = v_{пр} \cdot \rho \cdot \delta_{пр} \cdot \delta^{1}_{пр}$ $t_x = t_c - (t_c - t_н) \cdot e^{-A\,x}$, $A = \alpha_к \cdot D_0 / (G \cdot c)$, $\alpha_к = 3{,}25 \cdot \delta_{пр}^{-0{,}2} \cdot v_{пр}^{0{,}8}$	Сечение прослойки 1,2х0,1 м, скорость движения воздуха v = 0,4 м/с. Величина Э на 1 и 5 этажах при $t_н$ до -20°С может достигать 11…48 %

Окончание таблицы

1	2	3
Воздуховод из подвального помещения [5]	$G = v\,S$ $t_х = t_в - (t_в - t_н)\cdot e^{-Ax}$ $Q = 0{,}28\cdot w_{вент}\cdot \gamma_н\cdot c_в\cdot (t_в - t_н)$	Диаметр воздуховода 11 см, v =1 м/с, Э = 11…48 % для помещений площадью 60 …11 м^2
Вентилируемые бетонные каналы под полом подвального помещения [6]	$G_к = v_{вп}\cdot \rho_{вп}\cdot \delta_x\cdot \delta_y\cdot c$. Количество тепла на подогрев воздуха в канале $Q_п = c\cdot G_{под}(t_в - t_н)$	Сечение канала 10х25 см. Э = 26… 40 % от тепловой нагрузки системы воздушного отопления небольшого дома
Конструкции наружных стен с небольшим сопротивлением воздухопроницанию [7]	$G_{инф} = \Delta P / \sum R_и$ $\tau_в = t_н + (t_в - t_н)\cdot \dfrac{e^{c_и\cdot w\cdot R} - 1}{e^{c_в\cdot w\cdot R_0} - 1}$ $q_u = \dfrac{c_в\cdot w\cdot e^{c_в\cdot w\cdot R}}{e^{c_в\cdot w\cdot R_0} - 1}\cdot (t_в - t_н)$	21...49 % от норматива для помещения площадью 12 м^2 в 12-этажном здании. Э = 10…18 %

Циркуляция воздуха в упрощенной конструкции коллектора осуществлялась между двухслойным остеклением и адсорбером с V-образной поверхностью, а затем воздух поступал через отверстия диаметром 20 мм в нижней и верхней стенках конструкции в воздуховоды. Скорость его движения регулировалась с помощью маломощного вентилятора с тремя режимами работы.

При проведении натурного эксперимента размер модуля коллектора был принят 580×480 мм, а расход воздуха при скорости движения 0,38 м/с в расчете на 1 м^2 площади модуля составлял 43,2 м^3/ч. Для комнаты площадь 20 м^2 нормативный объем обеспечивался модулями площадью 1,39 м^2. Энергетический эффект использования данного варианта солнечного коллектора может быть выражен в доле солнечного тепла от тепловой нагрузки, которая для небольшого 1-этажного дома составляет от 2,6 до 12,5 % в течение отопительного периода в условиях II климатического района.

Особенность остальных вариантов разработанных конструктивных решений и устройств состоит в том, что на подогрев определенного объема воздуха, поступающего в помещение, из каналов, воздуховода и через толщу ограждения затрачивается меньшее количество тепла, чем на подогрев такого же объема холодного воздуха, входящего в помещение через традиционные приточные отверстия.

В конструктивном решении наружной стены с воздушной прослойкой последняя имеет сечение 1,2×0,1 м; она экранирована со стороны внутренней поверхности ограждения окрашенным металлическим листом с минимальным термосопротивлением. Воздух проходит с нижней части здания и попадает в воздушную среду квартиры. Расчётное моделирование показало, что для квартиры площадью 58 м^2, расположенной на 10-м этаже, при скорости движения воздуха в прослойке 0,4 м/с:

– обеспечивается нормативный воздухообмен в объеме 172,8 м^3/ч;

– в аналогичных квартирах, расположенных на первых пяти этажах, при температурах наружного воздуха +1°С и –20°С эффект энергосбережения может достигать 8…46 % и 11…48 % соответственно.

Натурный эксперимент с использованием воздуховода проводился в подвальном помещении здания; один конец воздуховода сообщался через проем стены с наружным воздухом, а другой был выведен в помещения первого этажа. Воздуховод из плотного полиэтилена с проволочным каркасом длиной 11 м и сечением 11 см был оснащён комплектом измерительных приборов, в том числе вентилятором для побуждения движения воздуха. При оптимальной скорости движения 1 м/с обеспечивалась хорошая сходимость результатов расчетной модели и экспериментальных данных.

Количество вентиляционного воздуха, поступающего из воздуховода, удовлетворяло нормативным требованиям воздухообмена для помещения площадью 11,3 м^2. Расчеты показали, что эффект энергосбережения для помещений площадью 11,3, 18 и 60 м^2 составлял соответственно 48, 37 и 11 %.

В тонкостенных бетонных каналах, сообщающихся с наружной атмосферой, повторный подогрев воздуха, выходящего из каналов в помещения, осуществлялся системой воздушного отопления здания. Расчет показал, что количество поступающего атмосферного воздуха в каналы сечением 10×25 см может обеспечить необходимую кратность воздухообмена помещений. Энергосберегающий эффект при использовании в одноэтажном здании площадью 120 м^2 системы из восьми каналов может составить от 26 до 40 % от тепловой нагрузки системы воздушного отопления.

Через наружные стены из относительно воздухопроницаемых материалов может проникать в помещение достаточно большое количество воздуха, которое при определенных условиях оказывает существенный эффект на воздухообмен в многоэтажном здании. Так, в жилое помещение площадью 12 м^2 в 12-этажном доме через наружные стены ($R_и$=20,3…42 м^2·ч·Па/кг) может инфильтрироваться при скорости ветра около 5 м/с количество воздуха, обеспечивающего от 21 до 49 % нормативного воздухообмена. В результате возникновения экономайзерного эффекта в процессе инфильтрации холодного воздуха через стены с вышеупомянутыми значениями $R_и$ достигается эффект энергосбережения, который может составить для жилого помещения площадью 12 м^2 от 10 до 18 %.

В ы в о д ы

Первые четыре способа улучшения воздухообмена могут обеспечить нормативный приток $G_{тр}$ подогретого вентиляционного воздуха и эффект энергосбережения для помещения небольшой площади при следующих исходных данных.

1. Используется упрощённая конструкция солнечного коллектора относительно небольшой площади (например, для комнаты площадью 20 м^2 площадь коллектора составляет 1,39 м^2). Энергетический эффект для небольшого 1-этажного дома в виде доли солнечного тепла от тепловой нагрузки может составить от 2,6 до 12,5 %, в зависимости от площади коллектора за отопительный период в условиях II климатического района.

2. Размеры воздушной прослойки в наружной стене многоэтажного дома имеют сечение 1,2×0,1 м, а скорость движения воздуха в прослойке составляет 0,4 м/с. В квартирах, расположенных на первом и пятом этажах, эффект энергосбережения при температурах наружного воздуха +1°С и –20°С может достигать 8…48 % соответственно.

3. Воздуховод в подвальном помещении имеет сечение 11 см, а скорость движения воздуха в нем составляет 1 м/с. Эффект энергосбережения зависит от площади помещения и может составить от 11 до 48 % для помещений площадью 60…11 м^2 соответственно.

4. В одноэтажном здании небольшой площади (120 м^2) тонкостенные бетонные каналы под полом подземного помещения имеют сечение 10×25 см. Эффект энергосбережения при использовании восьмиканальной системы может составить от 26 до 40 % от тепловой нагрузки системы воздушного отопления.

5. Через наружные стены с небольшим сопротивлением воздухопроницанию (20,3…42 м^2·ч·Па/кг) может инфильтрироваться значительное количество воздуха, обеспечивающего, например, от 21 до 49 % нормативного воздухообмена для жилого помещения площадью 12м^2 , расположенного в 12-этажном здании. Возникающий при этом эффект энергосбережения может составить величину в пределах 10…18 %.

Список литературы

1. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций. – URL:docs.cntd.ru›document /1200095525 (дата обращения: 14.08.20).

2. Береговой, А.М. Наружные ограждающие конструкции в системе воздухообмена жилого многоэтажного здания / А.М. Береговой, М.А. Дерина // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: www. science-education.ru /121-17257 (дата обращения: 04.02.2015).

3. Береговой, А.М. Архитектурно-строительные основы энергосбережения / А.М. Береговой, В.А. Береговой, А.В. Гречишкин. – Пенза: ПГУАС, 2018. – 136 с.

4 Мальцев, А.В. Наружное ограждение, утилизирующее тепло уходящего воздуха из помещения / А.В. Мальцев, А.М. Береговой, В.А. Береговой, М.А. Дерина // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №1. – С. 123–127.

5. Береговой, А.М. Использование тепла подземных помещений в энергосбережении / А.М. Береговой, М.А. Дерина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №1. – С. 85–89.

6. Береговой, А.М. Повышение энергоэффективности малоэтажных жилых зданий / А.М. Береговой, Е.С. Маризина // Вестник ПГУАС. Строительство, наука и образование. – 2022. – №1. – С. 3–7.

7. 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.

Reference

1 Air permeability of enclosure structures. – URL: does.cntd.ru document/1200095525 (access date: 14.08.20).

2. Beregovoy, A.M. External enclosing structures in the air exchange system of a residential high-rise building / A.M. Beregovoy, M.A. Derina // Modern Problems of Science and Education. – 2015. – № 1. – URL: www. science–education.ru / 121–17257 (access date: 4.02.20

3. Beregovoy, A.M. Architectural and construction fundamentals of energy saving / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy, A.V. Grechishkin. – Penza: PGUAS, 2018.– 136 p.

4. Maltsev, A.V. Enclosure structures utilizing removed room air heat / A.V Maltsev, A.M. Beregovoy, V. A. Beregovoy, M.A. Derina // Regional architecture and engineering.– 2014. – № 1.– P. 123–127

5. Beregovoy, A.M. Using of underground rooms heat in energy saving / A.M. Beregovoy, M.A. Derina, B.A. Beregovoy, A.V. Maltsev // Regional architecture and engineering. – 2016. – №1. – P. 85–89.

6. Beregovoy, A.M. Improving the energy efficiency of low-rise residential buildings / A.M. Beregovoy, E.S. Marizina // Bulletin of the PGUAS. Construction, science and education. – 2022. – №1. – P.3–7.

7. Beregovoy, A.M. The effect of energy saving in room with natural ventilation in terms of air infiltration through exterior wall / A.M. Beregovoy, A.V. Maltsev, M.A. Derina, A.V. Grechishkin // Regional architecture and engineering. – 2013. – №3. – P. 140–144.

УДК 711:332 DOI 10.54734/20722958_2023_2_147

Государственный университет по землеустройству
Россия, 105064, Москва, ул. Казакова, 15, тел.: +7 (499) 261 95 45

Антропов Дмитрий Владимирович, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Кадастр недвижимости и землепользование»
E-mail: antropovzem@gmail.com

Рассказова Анна Александровна, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Кадастр недвижимости и землепользование»
E-mail: annar78@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

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

State University of Land Use Planning
Russia, 105064, Moscow, 15, Kazakova St., tel.: +7 (499) 261 95 45

Antropov Dmitry Vladimirovich, Candidate of Economics, Associate Professor of the Department «Real Estate Cadastre and Land Use»
E-mail: antropovzem@gmail.com

Rasskazova Anna Aleksandrovna, Candidate of Economics, Associate Professor of the Department «Real Estate Cadastre and Land Use»
E-mail: annar78@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

Akimova Maria 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

ПЛАНИРОВАНИЕ СОЦИАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДСКОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ НОРМАТИВНЫМ МЕТОДОМ*

Д.В. Антропов, А.А. Рассказова, М.С. Акимова, Н.Ю. Карабанова

Обосновано применение метода нормирования в системе стратегического планирования на муниципальном уровне, что позволит эффективно решить современные вызовы социальных институтов на современном этапе глобального развития. Дается пример использования нормативного метода к размещению объектов социальной инфраструктуры на территории города (г. Ефремов, Тульская область). Определены параметры строительства планируемых объектов. Предложен вариант размещения планируемого объекта по нормам земельного, градостроительного, природоохранного права с оценкой потребностей в ресурсах и показателей их использования.

Ключевые слова: социальная инфраструктура, землепользование, стратегическое планирование, территория города, метод, планирование, нормативный метод

* Выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда №23-28-01413, https://rscf.ru/project/23-28-01413/ на базе Государственного университета по землеустройству.

SOCIAL INFRASTRUCTURE PLANNING OF URBAN LAND USE USING A NORMATIVE METHOD

D.V. Antropov, A.A. Rasskazova, M.S. Akimova, N.Y. Karabanova

Application of a rationing method in the strategic planning system at the municipal level is justified, which will effectively solve modern challenges of social institutions at the present stage of global development. An example of the use of a normative method for the placement of social infrastructure facilities on the territory of a city (Efremov, Tula region) is given. The parameters of construction of the planned facilities have been determined. An option of placing the planned object according to land regulation, urban planning, environmental law, with an assessment of resource needs and indicators of their use is proposed.

Keywords: social infrastructure, land use, strategic planning, city territory, method, planning, regulatory method

Введение

При всей обширности площади земель в России города испытывают их дефицит, обусловленный ограничением роста в рамках черты населенного пункта, сложившейся планировочной структурой, плотностью застройки [1], вкрапливанием лесных земель, особо охраняемых природных территорий, наличием объектов культурного наследия, обладающих статусом охраны от застройки [2]. Кроме того, на планирование специфики пространственного развития города и новое строительство прямое влияние оказывают демографические тенденции и возрастающие потребности населения [3], а также количественно-качественные характеристики инженерных коммуникаций, транспортной и социальной инфраструктур [4].

Все это актуализирует вопросы организации эффективного землепользования в городе, для чего государством предприняты такие меры, как: введение стандартов, нормативов, реестров, регулирующих строительную отрасль; формирование комфортной городской среды через благоустройство, преобразование застроенных кварталов и обеспечение доступа в них к объектам социальной инфраструктуры; перепрофилирование сложившейся промышленной застройки в центральных местах города; стимулирование проектов комплексной жилой застройки.

Однако дискуссионным остается вопрос выбора методов планирования землепользования. В контексте проводимого исследования планирование землепользования подразделяется на два направления: стратегическое планирование и планирование развития территорий, одним из составных элементов которого является планирование использования отдельных объектов землепользования или его видов. В этом случае задачами планирования, например, в системе развития территории города являются оценка всех имеющихся ресурсов и определение организационно-технических, социальных и экономических мероприятий, направленных на реализацию выбранного варианта использования данных ресурсов. Это обосновывается превалированием территориального базиса как функции землепользования над остальными вышеуказанными элементами системы в целях расселения людей и размещения производственных сил. В этой связи необходимо определить направление применения различных методов и способов планирования в отношении видов и объектов системы землепользования, в т.ч. с учетом использования различных информационных ресурсов. Так, органы власти при управлении устойчивым городским развитием полагаются на стратегию социально-экономического развития [5], генеральный план, правила землепользования и застройки [6]. Основой разработки документов стратегического планирования являются методы прогноза и вероятностных оценок [7]. Некоторые авторы [8, 9, 10, 11] особо подчеркивают роль нормативного метода в проектировании новых землепользований. При этом вопросы, что собой представляет метод нормирования городского землепользования и какое место он занимает в структуре управления городом, однозначно не раскрыты. Нормативный метод планирования приобретает важное значение в период, когда Россия сталкивается с беспрецедентными геополитическими вызовами, необходимостью применения декларативных инструментов системы управления земельными ресурсами.

При планировании строительства объектов социальной инфраструктуры города целесообразно использовать нормативный метод.

Последовательность раскрытия поставленной цели:

1) уточнение места и роли нормативного метода в системе стратегического планирования городского землепользования;

2) систематизация положений нормативного метода;

3) обоснование эффективности применения нормативного метода при планировании объектов социальной инфраструктуры.

Объекты и методы исследования

Выявлено, что документы территориального планирования городского округа разрабатываются на основе документов стратегического планирования с применением местных градостроительных нормативов (рис. 1).

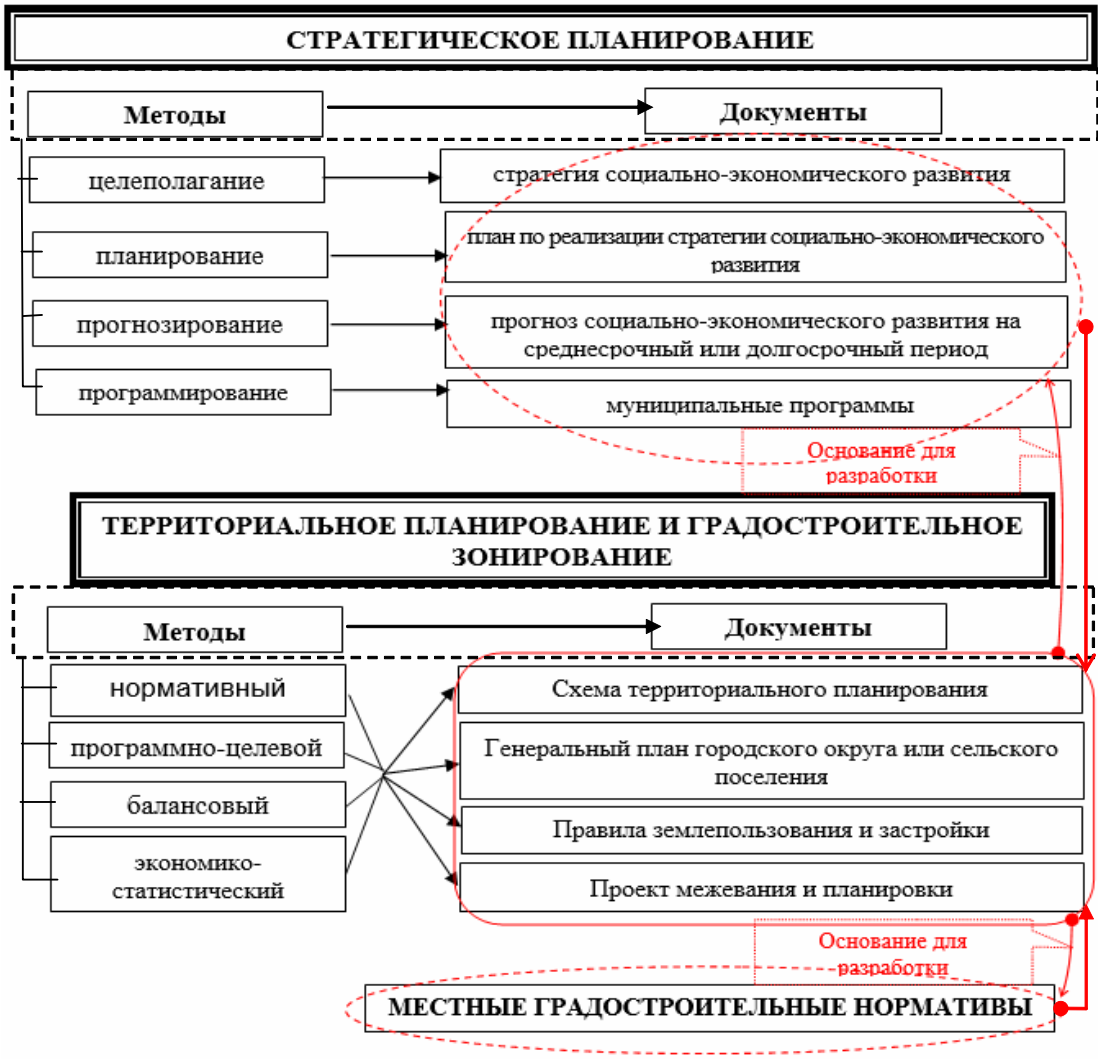


Рис. 1. Нормативный метод в системе стратегического планирования городского землепользования

Значение нормативного метода заключается в том, что он лежит в основе разработки документов, применяемых при управлении городской территорией и строительством. Так, на базе норм и нормативов, которые содержатся в [11], составляются местные градостроительные нормативы по расположению, конфигурации, предельным параметрам, количеству объектов строительства [12]. Далее местные нормативы, наравне с документами стратегического планирования, закладываются в основу разработки генерального плана городского округа, правил землепользования и застройки, проектов планировки и межевания территории. То есть от правильности расчетов

норм отвода земель и параметров застройки будет зависеть результативность управления территорией города.

Под нормативным методом планирования землепользования понимаются расчет предельных параметров отвода земель под общественно значимые объекты строительства, для которых, в свою очередь, определяются потребность в их наличии, предельные параметры и пропускная способность на основе демографического прогноза (на вариативной основе: рост, стагнация, сокращение численности населения), и обоснование выбора их размещения в структуре города с учетом пешеходной и транспортной доступности (рис. 2).

В качестве социальной инфраструктуры рассматриваются учреждения образования, здравоохранения, культуры и искусства, бытового обслуживания, физкультурно-оздоровительные сооружения и т.п.

Рис. 2. К планированию городского землепользования нормативным методом

Систематизированы основные положения нормативного метода, предполагающие последовательность расчетов и корректировку выбора места расположения для каждого объекта строительства с учетом особенностей сложившейся застройки, доступности, потребностей населения и статуса объекта (федеральный, региональный, местный) (табл. 1).

Таблица 1

Методика нормирования землепользования при планировании объектов социальной инфраструктуры

№	Содержание этапа	Методы исследования
1	2	3
1	Составление прогноза численности населения на определенный горизонт планирования	На основе построения линии тренда, т.е. анализа динамики развития с графическим и математическим моделированием тенденций изменения численности населения
2	Обоснование потребности в наличии и количестве общественно значимых объектов	На основе прогноза численности населения по возрастному и половому признакам, а также с применением нормативного метода
3	Расчет необходимой площади объекта на 1000 населения	$S = N$ x (C/1000), где S – площадь определенного типа объекта; N – норматив обеспеченности определенным типом объекта на 1000 населения; C – численность населения города

Окончание табл.1

1	2	3
4	Расчет предельных параметров отвода земельного участка	По местным градостроительным нормативам на 1000 жителей
5	Определение места размещения с учетом пешеходной и транспортной доступности	С учетом требований норм и с использованием балансового метода

Показана последовательность применения нормативного метода с установлением структуры всего землепользования, где важным моментом является использование демографического прогноза (прогнозирование) на этапе определения потребностей в увеличении доли рассматриваемых объектов (рис. 3).

Рис. 3. Алгоритм применения нормативного метода при планировании отдельных объектов системы землепользования с учетом ее структуры и демографического прогноза

Объектом применения нормативного метода выбран город Ефремов, Тульской области. С 2014 года в структуру городского округа Ефремов включены Ясеновское и Лобановское поселения, что потребовало пересмотра обеспеченности населения общественно значимыми объектами строительства. Город относится к средним, т.к. среднестатистическая численность составляет чуть больше 53 тыс. человек. Площадь города 1649 км^2. Плотность населения 32 чел./км^2.

Достоверность результатов исследования подтверждается нормирующими документами и [13, 14, 15].

Результаты и обсуждение

Планирование потребности в объектах социальной инфраструктуры в городе Ефремов выполнено с учетом прогнозирования численности населения путем построения линии тренда (рис. 4).

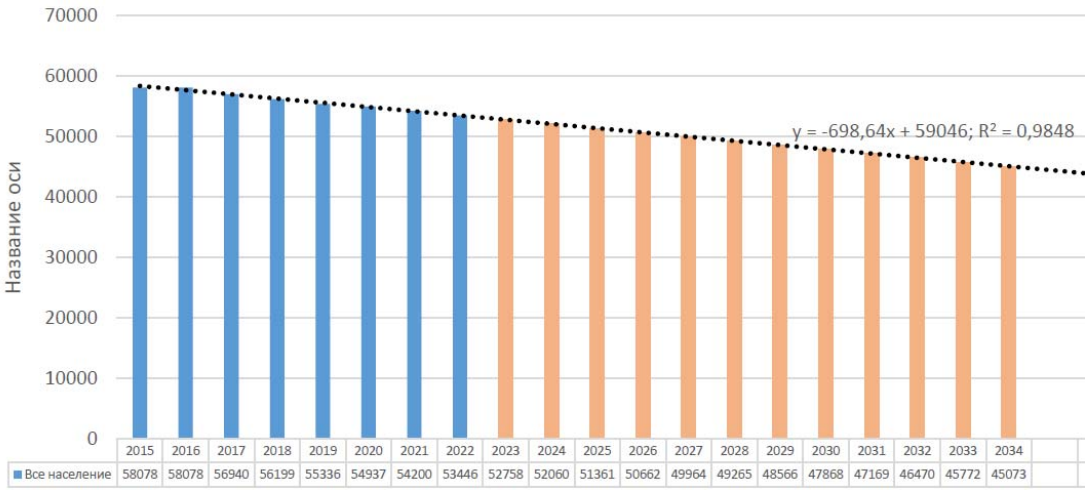


Рис. 4. Прогноз численности населения

Обоснование потребности в основных учреждениях культурно-бытового обслуживания для города с учетом требований к нормам обеспеченности населения соответствующей инфраструктурой приведено в табл. 2. В целом наблюдается нормальная обеспеченность населения соответствующей инфраструктурой. Расчеты показали, что недостает физкультурно-оздоровительных учреждений (плавательные бассейны, детско-юношеские спортивные школы).

Таблица 2

Расчет потребности в основных учреждениях культурно-бытового обслуживания в городе Ефремов

Наименование учреждения, предприятия, сооружения	Единица измерения	Норматив на 1000 жителей	Всего		
			Существующие (сохраняемые)	Требуется по нормативу	Новое строительство
1	2	3	4	5	6
Учреждения образования					
Профессиональные образовательные организации	место	3,5	3400	182	-
Дошкольные образовательные учреждения	место	40	4050	2077	-
Общеобразовательные школы	место	135	16300	7010	-
Организации дополнительного образования	место	3,4	1300	176	-
Учреждения здравоохранения					
Учреждения отдыха и оздоровления	мест на 10000 жителей	6,5	110	34	-
Фельдшерско-акушерские пункты	место	1	560	52	-
Больницы	койка	2,6	315	135	-

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
Амбулаторно-поликлиническая сеть	место	6	1186	312	-
Учреждения культуры и искусства					
Культурно-досуговые учреждения	место	2	5300	104	-
Образовательные организации в области культуры искусства	место	1,2	580	62	-
Региональные библиотеки	единиц на 10000 жителей	1	24	5	-
Физкультурно-оздоровительные сооружения					
Плавательный бассейн	кв. м зеркала воды на 1000 жителей	75	3025	3380	355
Открытые спортивные плоскостные сооружения	единовременная пропускная способность, чел. на 10000 жителей	1900	9055	8563	-
Центры спортивной подготовки	единовременная пропускная способность, чел. на 10000 жителей	1200	6073	5409	-
Специализированные спортивные образовательные организации	место	80	3533	3754	221

На следующем этапе были рассчитаны потребность в количестве и параметры объектов спортивной инфраструктуры, а также стоимость их строительства (табл. 3). Статус объектов – местные. При определении стоимости строительства также применялся нормативный метод.

Таблица 3

Планируемые количество и параметры физкультурно-оздоровительных учреждений

Наименование объектов	Единица измерения	Планируемые параметры									
		Нормативная вместимость	Количество требуемых объектов	Площадь отвода земельного участка под 1 объектом, га	Общая площадь, га	Стоимость отвода земельного участка, тыс. руб.	Общая стоимость отвода, тыс. руб.	Стоимость строительства 1 объекта, тыс. руб.	Общая стоимость строительства, тыс. руб.	Итоговая стоимость	Ошибка в отводе/ в стоимости
Плавательный бассейн	кв. м зеркала воды	275	1	0,44	0,44	182,0	182,0	838,1	838,1	1020,1	±0,04/ ±102
Специализированные спортивные образовательные организации	место	200	1	0,3	0,3	182,0	182,0	2080,4	2080,4	2262,4	±0,03/ ±226
Итого	-	-	2	-	0,74	-	364	-	2918,5	3282,5	±0,07/ ±328

При обосновании параметров отвода земель и мест расположения планируемых физкультурно-оздоровительных учреждений учтены следующие нормы:

– размер земельного участка 0,2–0,5 га на объект;

– пешеходная доступность 500–1500 м;

– транспортная доступность – до 30 мин.

На завершающем этапе определено предварительное место размещения объекта (специализированная спортивная образовательная организация с бассейном (рис. 5)).

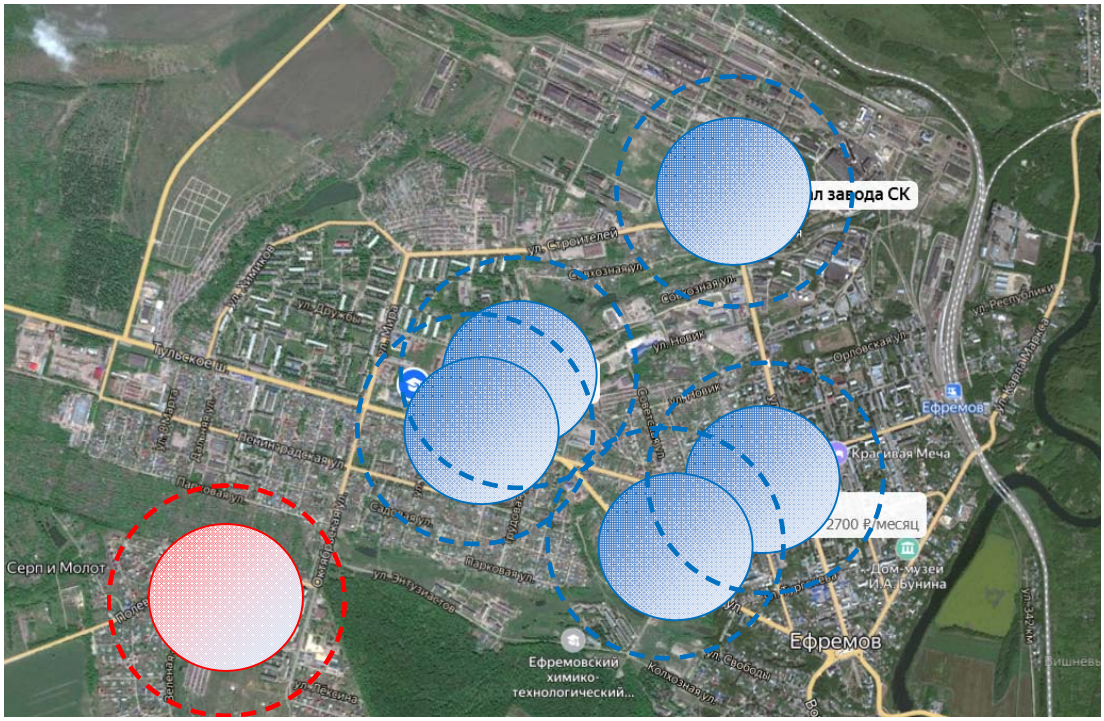


Рис. 5. Графическое обоснование выбора расположения планируемого объекта строительства

Выводы

1. В общей системе управления территориями города нормативный метод планирования землепользования несколько «растворился» среди большого количества регулирующих документов (стратегия, генплан, правила землепользования и застройки, местные градостроительные нормативы), что мешает увидеть его роль в процессе формирования оптимальной организации городской среды.

2. Общественно значимые объекты строительства должны размещаться в структуре города с учетом требований пешеходной и транспортной доступности. Для развития объектов социальной инфраструктуры в городе необходимо грамотное обоснование норм отвода земель под эти нужды, основывающееся на расчетах прогнозных значений численности населения, роста или сокращения потребностей в соответствующих объектах, количества объектов и параметров строительства.

3. Существующие методы прогноза не дают абсолютных значений и имеют значительные ошибки, для нивелирования которых требуется введение большого количества дополнительных данных, что затрудняет применение нормативного метода. Для повышения достоверности нормативного метода планирования городского землепользования необходим поиск способов прогнозирования с наименьшими погрешностями.

Список литературы

1. Прядко, И.А. Методические основы планирования эффективного землепользования как основы устойчивого развития городской территории / И.А. Прядко //

Экономический вестник Ростовского государственного университета. – 2008. – Т. 6, № 1–2. – С. 267–269.

2. Худяков, А.Ю. Стратегические вопросы градостроительных комплексов / А.Ю. Худяков // Архитектура, градостроительство и дизайн. – 2016. – № 1 (07). – С. 25–31.

3. Гостев, М.В. Эволюционное развитие систем городского землепользования и транспорта: разработка эвристической модели / М.В. Гостев // Городские исследования и практики. – 2019. – Т. 4, № 4 (17). – С. 70–92.

4. Постановление Правительства РФ от 01.10.2015 N 1050 (ред. от 02.08.2022) «Об утверждении требований к программам комплексного развития социальной инфраструктуры поселений, городских округов».

5. Федеральный закон от 28.06.2014 N 172-ФЗ (ред. от 31.07.2020) «О стратегическом планировании в Российской Федерации».

6. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 N 190-ФЗ (ред. от 19.12.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 03.02.2023).

7. Малинников, В.А. Использование цепей Маркова и данных ДЗЗ для прогнозирования конверсии видов землепользования в крупных городских агломерациях / В.А. Малинников, Н. Ван Нам // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – № 5. – С. 99–105.

8. Киселева, А.О. Нормы отвода земель как инструмент реализации земельной политики / А.О. Киселева, Н.В. Клюшниченко // Гео-Сибирь. – 2007. – Т. 2, № 2. – С. 97–101.

9. Сычева, Е.Б. Расчет объемов нового строительства дошкольных объектов с учетом демографического прогноза / Е.Б. Сычева // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2015. – № 4. – С. 50–55.

10. Комаров, С.И. Прогнозирование и планирование использования земельных ресурсов и объектов недвижимости / С.И. Комаров, А.А. Рассказова. – М.: Юрайт, 2019. – 298 с. EDN: EEISWG

11. Рассказова, А.А. Особенности методов планирования использования земельных ресурсов и объектов недвижимости / А.А. Рассказова // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2018. – №6. – С.35–41. EDN: XSZXCP

12. Свод правил 42.13330.2011 «СНиП 2.07.01-89*. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений»: приказ Министерства регионального развития РФ от 28.12.2010 N 820.

13. О методике определения нормативной потребности субъектов РФ в объектах социальной инфраструктуры: распоряжение Правительства РФ от 19.10.1999 N 1683-р (ред. от 23.11.2009) (утратило силу).

14. Проект генерального плана муниципального образования город Ефремов Тульской области. – URL: https://fgistp.economy.gov.ru/lk/#/document-show/304623

15. Об утверждении Правил землепользования и застройки муниципального образования город Ефремов: постановление Администрации муниципального образования город Ефремов от 18.02.2021 № 167. – URL: https://fgistp.economy.gov.ru/lk/#/document-show/300759

16. Нормативы градостроительного проектирования города Ефремов: постановление Администрации муниципального образования город Ефремов от 18.02.2021 № 168. – URL: https://fgistp.economy.gov.ru/lk/#/document-show/258122

References

1. Pryadko, I.A. Methodological foundations of planning effective land use as a basis for sustainable development of urban territory / I.A. Pryadko // Economic Bulletin of Rostov State University. – 2008. – Vol. 6, No. 1–2. – P. 267–269.

2. Khudyakov, A.Yu. Strategic issues of urban complexes / A.Yu. Khudyakov // Architecture, urban planning and design. – 2016. – № 1 (07). – P. 25–31.

3. Gostev, M.V. Evolutionary development of urban land use and transport systems: development of a heuristic model / M.V. Gostev // Urban research and practice. – 2019. – Vol. 4, No. 4 (17). – P. 70–92.

4. Decree of the Government of the Russian Federation of 01.10.2015 N 1050 (ed. from 02.08.2022) "On approval of requirements for programs for the integrated development of social infrastructure of settlements, urban districts".

5. Federal Law of 28.06.2014 N 172-FZ (ed. from 31.07.2020) "On strategic planning in the Russian Federation".

6. The Town-planning Code of the Russian Federation of 29.12.2004 N 190-FZ (ed. of 19.12.2022) (with amendments and additions, intro. in force since 03.02.2023).

7. Malinnikov, V.A. The use of Markov chains and remote sensing data for predicting the conversion of land use types in large urban agglomerations / V.A. Malinnikov, N. Van Nam // Izvestiya of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography. – 2017. – No. 5. – P. 99–105.

8. Kiseleva, A.O. Norms of land allotment as a tool for the implementation of land policy / A.O. Kiseleva, N.V. Klyushnichenko // Geo-Siberia. - 2007. – Vol. 2, No. 2. – P. 97–101.

9. Sycheva, E.B. Calculation of the volume of new construction of preschool facilities taking into account the demographic forecast / E.B. Sycheva // Academic Bulletin of UralNIIproekt RAASN. – 2015. – No. 4. – P. 50–55.

10. Komarov, S.I. Forecasting and planning the use of land resources and real estate objects / S.I. Komarov, A. A. Rasskazova. – M.: Yurayt, 2019. – 298 p. EDN: EEISWG

11. Rasskazova, A.A. Features methods of planning the use of land resources and real estate objects / A.A. Rasskazova // Land management, cadastre and land monitoring. – 2018. – No.6. – P.35–41. EDN: XSZXCP

12. Code of Rules 42.13330.2011 "SNiP 2.07.01-89*. Urban planning. Planning and construction of urban and rural settlements": Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation dated 12/28/2010 No. 820.

13. On the methodology for Determining the regulatory needs of the Subjects of the Russian Federation in social Infrastructure facilities: Order of the Government of the Russian Federation dated 10/19/1999 No. 1683-r (ed. dated 11/23/2009) (expired).

14. Draft general plan of the municipal formation of the city of Efremov, Tula region. – URL: https://fgistp.economy.gov.ru/lk/#/document-show/304623

15. On approval of the Rules of Land Use and development of the municipality of the city of Efremov: Resolution of the Administration of the Municipality of the city of Efremov dated 02/18/2021 No. 167. – URL: https://fgistp.economy.gov.ru/lk/#/document-show/300759

16. Standards of urban planning design of the city of Efremov: Resolution of the Administration of the municipality of the city of Efremov dated 02/18/2021 No. 168. – URL: https://fgistp.economy.gov.ru/lk/#/document-show/258122

УДК 72,012”18”:62 DOI 10.54734/20722958_2023_2_157

Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18
Мирхасанов Рустем Фаритович,
старший преподаватель кафедры «Конструктивно-дизайнерское проектирование»
E-mail: rystem69@mail.ru
Сабитов Линар Салихзанович,
доктор технических наук, профессор кафедры «Конструктивно-дизайнерское проектирование»
E-mail: l.sabitov@bk.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
Гарькин Игорь Николаевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление качеством и технология строительного производства»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

Kazan (Volga Region) Federal University
Russia, Kazan, 18, Kremlin St.
Mirkhasanov Rustem Faritovich,
Senior Lecturer of the Department «Structural engineering and design»
E-mail: rystem69@mail.ru
Sabitov Linar Salikhzanovich,
Doctor of Sciences, Professor of the Department «Structural engineering and design»
E-mail: l.sabitov@bk.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
Garkin Igor Nikolaevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Management Quality and Technology of Building Production»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

КОМПОЗИЦИОННАЯ ФОРМА В АРХИТЕКТУРЕ КОНЦА XIX ВЕКА: ЭВОЛЮЦИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ МЫСЛИ

Р.Ф. Мирхасанов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин

На основе дефиниций «форма» и «содержание» проанализировано влияние инженерной мысли на развитие композиционной формы в архитектуре конца XIX века. Отмечена важность вычленения аналогии, близости и родственных связей в искусственно созданных архитектурно-конструкторских организмах. Приведен ряд инженерных конструкций, которые повлияли на возникновение архитектурной эстетики более позднего времени. Определена важность композиционной аналитической работы для развития инженерно-архитектурной идеи и оценки объекта объемно-пространственной композиции.

Ключевые слова: архитектура, композиционная форма, инженерная мысль, влияние, творческий продукт, дизайн

COMPOSITE FORM IN ARCHITECTURE OF THE END OF THE XIX CENTURY: EVOLUTION OF ENGINEERING THOUGHT

R.F. Mirkhasanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin

Based on the definitions of «form» and «content», the influence of engineering thought on the development of compositional form in architecture of the late 19th century is analyzed. The importance of isolating analogy, proximity and family ties in artificially created architectural and design organisms is noted. The authors name engineering structures that influenced the emergence of architectural aesthetics of a later time. The importance of compositional analytical work for the development of an engineering and architectural idea and evaluation of an object of volume-spatial composition is determined.

Keywords: architecture, compositional form, engineering thought, influence, creative product, design

Архитектурная эстетика, связанная с представлениями об античных храмах и средневековых соборах, на протяжении веков транслировала пример выразительности и мощи. Но с бурным развитием науки и техники строительная традиция, созданная в XIX веке в русле историзма и эклектики, стала превращаться в подобие театральности и маскарада (содержательное начало в композиции, «рассказ», архитектурные исторические реминисценции). «Ритмические переклички», пластические ходы, модульные пропорциональные членения в объектах архитектуры и дизайна XIX века, украшенных элементами ордерных систем, тормозили развитие новых архитектурных форм (композиционные решения, современные образы), которых требовала новая промышленная технологическая эпоха. Появление бетона и металлического каркаса в конструкции зданий спровоцировало изменение строительных технологий. Появилась новая статика сооружений, а исторически универсальная строительная профессия разделилась на инженерную специальность и архитектурную. Архитекторы не успевали за инженерными расчетами, создавая новые архитектурные формы. Это все было признаком новой индустриальной эпохи и остается, на наш взгляд, интересной и важной областью для теоретических и практических исследований в творческой деятельности архитектора.

Развитие науки и техники в XIX в. было столь мощным, что в строительной практике активно стали заявлять о себе лёгкие железные конструкции. Инженерная строительная конструкция из металла, символизирующая индустриальный мир, приходит на смену ремесленному столярному искусству. Прямое воздействие металлических каркасов на архитектурные формы коснется чикагских небоскребов, а затем и горизонтальных небоскребов Лисицкого, проявит себя в проектах братьев Весниных, Миса ванн дер Роэ, Корбюзье.

Для практиков и теоретиков искусства дизайна вызывает интерес пример взаимодействия инженерной конструктивной мысли и архитектурной эстетики (законы композиции настолько универсальны, что работают в объемно-пространственной композиции инженерии, архитектуры и дизайна), поскольку цель формирования будущих профессионалов, владеющих современными инновационными технологиями, недостижима без глубоких знаний об объективно существующем развитии формы в изобразительном искусстве и дизайне и о прямом и косвенном влиянии инженерной композиционной формы на создание формы архитектурной. Приведем несколько интересных примеров внедрения металлических конструкций в архитектурную практику.

Маценков С.А. (гл. инженер Эрмитажа) отмечает: «Параллельно изобретали новые способы скрепления железных деталей, создавали столь необходимые теории расчёта и испытаний строительных конструкций. Наиболее интересный период в эволюции новых конструкций можно проследить на примере основных зданий Эрмитажа». Пожар 1837 г. спровоцировал появление в Зимнем дворце в 1838-1839 гг. одних из первых в России железных конструкций перекрытий. Директор казённого Александровского чугунолитейного завода.

Кларк М.Е. разработал для поддержания кровли фермы треугольной формы, а для перекрытий залов дворца создал шпренгели – эллиптические балки. Были созданы контрфорсы, крепи, фермы и шпренгели, поддерживающие громадную крышу Эрмитажа (рис. 1).

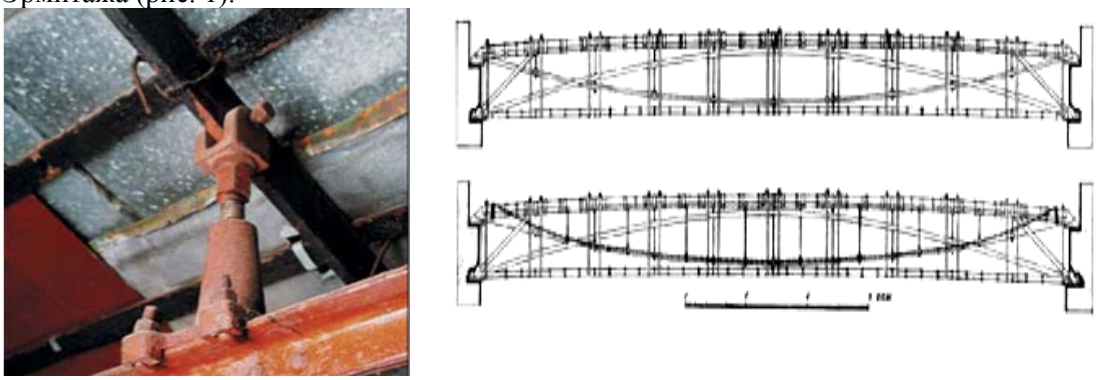


Рис. 1. Усиление ферм покрытия шпренгелями

Эллиптические балки изготовлены из четырёх вертикально стоящих слоёв железа толщиной 0,8 мм. Их высота около 70 см. Крайние листы изогнуты по дуге окружности и образуют в сечении эллипс. Эта форма сохраняется благодаря распорным трубкам, установленным по длине балки через каждые 45 см. Верх и низ листов зажат между уголками на заклёпках. Посередине пролёта количество листов железа в балке увеличивалось до восьми. Между ближайшими балками, уложенными с шагом около 1 м, делались микросводы из пустотелых гончарных горшков на известковом растворе. Эллиптические балки Зимнего дворца стали первым примером использования тонкостенных конструкций. Этими балками перекрыты помещения с пролётом до 14 м (Фельдмаршальский зал, Иорданская лестница и все бывшие жилые помещения третьего этажа). Также «…распорными конструкциями (две эллиптические балки из полосовой стали, находящиеся одна под другой), объединёнными в единую систему вертикальными стойками, были перекрыты Аванзал, Николаевский, Концертный, Гербовый зал». В 1887 году под руководством архитектора Зимнего дворца Н.А. Горностаева и директора Санкт-Петербургского металлического завода инженера О.Е. Креля был произведён большой ремонт: заменили ненадёжные детали, а оставшиеся элементы усилили новыми фермами, изготовленными из проката. Для сопряжения использовали сотни винтовых домкратов. Железные строительные конструкции Нового Эрмитажа появились одновременно с постройкой здания в середине XIX века. Балки перекрытий были изготовлены с помощью ковки. Средняя часть балки плоская, состоит из трёх слоёв проклёпанного железа, зажатого сверху и снизу по всей длине двумя парами уголков (тоже на заклёпках). Таким образом, в сечении балки образуется современный двутавр. В Эрмитажном театре стропильная система из дерева в 1895–1898 годах была заменена архитектором Зимнего дворца А.Ф. Красовским на железную. Все инженерные конструкции перекрытий Зимнего дворца очень похожи на современные двутавровые балки и уголки разных типов размеров.

Очевидна актуальность описания практического и теоретического освоения формальной сферы на основе изучения произведений хрестоматийно известных классиков изобразительного искусства и дизайна. Аналитическая композиционная работа по исследованию ранее созданной композиционной формы способствует четкому пониманию преемственности между композиционным процессом в современном искусстве дизайна и великими персоналиями предшествующих эпох. Проблемы понимания путей создания современного изобразительного (созидательного) искусства и дизайна лежат в отсутствии понимания развития композиционной формы в русле формальной сферы.

Ярким примером крупного по размерам сооружения из чугуна является мост через реку Северн в Колбрукдейле (1779 г.). Мосты с решетчатыми фермами из ковкого железа в дальнейшем сменились на чугунные [1, 2].

Отметим и мост Гальтона (рис. 2) – чугунный мост в Сметвике, недалеко от Бирмингема в Центральной Англии. Открытый в 1829 г. как автомобильный, мост был построен инженером-строителем Томасом Телфордом для прокладки дороги через новую главную линию Бирмингемского канала [3]; находится на высоте 21 метра над каналом (для своего времени инженерное сооружение было самым высоким однопролетным арочным мостом), ширина пролета – 7,9 м, длина – 46 м. Конструкция моста транслирует эстетику совершенной архитектоники; композиция прекрасна и гармонична не потому, что над этим специально работал художник или архитектор, а потому, что продукт инженерной мысли функционально совершенен и абсолютно надежен [4, 5].

Также Томас Телфорд построил в Англии (1825 г.) подвесной мост через пролив Менай (подвесная горизонтальная проезжая часть моста и достаточно дешевые кованые железные цепи сделали подвесные мосты удобными для перемещения колесного транспорта через реку). Центральный пролет моста длиной в 166 м долгое время оставался непревзойденным по длине (рис. 3). В большинстве случаев подвесные мосты были дешевле и практичнее мостов, построенных из камня. Цепи, использованные Телфордом для создания моста, состояли из звеньев, соединенных между

собой болтами (как цепи современных велосипедов). Концентрация напряжений в местах соединений требовала применения вязкого и пластичного металла, такого, как кованое железо (кованое железо может работать на растяжение, его прочность не особенно велика). Телфорд предусмотрительно допускал наибольшее номинальное напряжение в цепях на уровне 55 МН/м^2 (5 кгс/мм^2), что составляет менее 1/2 от предела прочности. Он считал, что мост через пролив Менай имеет максимально возможную для подвесного моста длину пролета [6].

Рис. 2. Мост Гальтона

Рис. 3. Подвесной мост через пролив Менай

Инженер Брюнель доказал, что Телфорд в расчетах ошибался, и перестраховался при постройке Клифтонского моста с пролетом 190 м. В отличие от современных подвесных мостов в проекте Телфорда использовались соединенные индивидуально 9,5-футовые (2,9 м) железные проушины для тросов.

Сегодня формальная (композиционная) часть нового искусственно созданного творческого продукта, находясь в неделимом союзе с содержательной частью, главенствует в достижении яркого современного образа новым языковым кодом. В образовательном процессе многих современных вузов, готовящих дизайнеров и архитекторов, необходима практика вольного копирования, схематического изображения хрестоматийных работ знаменитых инженеров, дизайнеров для выявления законов и средств композиции: копировальная практика для дизайнера так же важна, как и для художника.

В работе инженера над функциональностью композиции автоматически проявляется построение архитектоники продукта: это формальный (композиционный) метод работы над объемно-пространственной композицией (функциональная сторона продукта инженерной мысли). Композиционный анализ хрестоматийно известных работ инженеров, архитекторов – классиков прошлых эпох и современности является очень важной задачей на пути к цели – созданию собственного авторского продукта. Создание авторского продукта без глубокого изучения формальной (композиционной) сферы наследия представляется затруднительным. Форма (конструкция, композиция, логика построения) находится в определенном соотношении с содержательным началом

искусственно созданного организма архитектурной, инженерной, дизайнерской мысли. Выстраивание пути положительно прогнозируемого результата не может происходить без поиска и изучения шедевров инженерии, архитектурной, дизайнерской мысли. Синтез формальной конструктивной сферы (инженерное искусство) и архитектурная эстетика (содержание) рождают продукты современного искусства дизайна, который объединяет в себе все исторически сложившиеся виды изобразительного искусства.

Список литературы

1. Мирхасанов, Р.Ф. От «чугунной архитектуры» к металлическому каркасу / Р.Ф. Мирхасанов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 1 (54). – С. 176–185.
2. Лапшина, Е.Г. Концепция архитектурного пространства городов: динамическая составляющая / Е.Г. Лапшина // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4 (53). – С. 170–176.
3. Гарькин, И.Н. Некоторые аспекты проведения предпроектных работ на объектах культурного наследия / И.Н. Гарькин, Л.С. Сабитов, А.Р. Гайдук, Т.А. Глебова // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 11 (95). – С. 678–688.
4. Каракова, Т.В. Художественная перфорация как инструмент формообразования архитектуры общественного здания в контексте эмерджентности системы / Т.В. Каракова, А.В. Данилова // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 211–219.
5. Хакимов, Д.Р. Особенности сохранения и приспособления объектов культурного наследия к современным условиям / Д.Р. Хакимов, А.Ф. Требухин // Вестник евразийской науки. – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 57.
6. Лызина, А.Г. Средовые условия восприятия православных храмов и комплексов / А.Г. Лызина // Градостроительство и архитектура. – 2021. – Т. 11, № 4 (45). – С. 87–93.

References

1. Mirkhasanov, R.F. From «cast-iron architecture» to a metal frame / R.F. Mirkhasanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2023. – № 1 (54) – P. 176–185.
2. Lapshina, E.G. The concept of the architectural space of cities: a dynamic component / E.G. Lapshina // Regional architecture and engineering. – 2022. – №4 (53). – P. 170–176.
3. Garkin, I.N. Some aspects of pre-project work on cultural heritage sites / I.N. Garkin, L.S. Sabitov, A.R. Gaiduk, T.A. Glebova // Engineering Bulletin of the Don. – 2022. – № 11 (95). – P. 678–688.
4. Karakova, T.V. Artistic perforation as a tool for shaping the architecture of a public building in the context of system emergence / T.V. Karakova, A.V. Danilova // Regional architecture and engineering. – 2021. – №1 (46). – P. 211–219.
5. Khakimov, D.R. Features of preservation and adaptation of cultural heritage objects to modern conditions / D.R. Khakimov, A.F. Trebukhin // Bulletin of the Eurasian Science.– 2019. – Vol. 11, №1. – P. 57.
6. Lyzina, A.G. Environmental conditions for the perception of Orthodox churches and complexes / A.G. Lyzina // Urban planning and architecture. – 2021. – Vol. 11, № 4 (45). – P. 87–93.

УДК 711.523-042.2 DOI 10.54734/20722958_2023_2_162

Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18
Мирхасанов Рустем Фаритович,
старший преподаватель кафедры «Конструктивно-дизайнерское проектирование»
E-mail: rystem69@mail.ru
Садков Вадим Анатольевич,
доктор искусствоведения, профессор, главный научный сотрудник НИЛ «Вычислительный дизайн и цифровое производство»
E-mail: vsadkov@gmail.com
Сабитов Линар Салихзанович,
доктор технических наук, профессор кафедры «Конструктивно-дизайнерское проектирование»
E-mail: l.sabitov@bk.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
Гарькин Игорь Николаевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление качеством и технология строительного производства»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

Kazan (Volga Region) Federal University
Russia, Kazan, 18, Kremlin St.
Mirkhasanov Rustem Faritovich,
Senior Lecturer of the Department «Structural engineering and design»
E-mail: rystem69@mail.ru
Sadkov Vadim Anatolievich,
Doctor of art History, Professor, Chief Researcher, Research Laboratory «Computational Design and Digital Manufacturing»
E-mail: vsadkov@gmail.com
Sabitov Linar Salikhzanovich,
Doctor of Sciences, Professor of the Department «Structural engineering and design»
E-mail: l.sabitov@bk.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
Garkin Igor Nikolaevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Management Quality and Technology of Building Production»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

ИСТОКИ ОБРАЗНОГО РЕШЕНИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ЗАДАЧ В КОМПОЗИЦИИ ТЕО ВАН ДУСБУРГА

Р.Ф. Мирхасанов, В.А. Садков, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин

Представлена информация о «союзе» дизайна и инженерного искусства посредством вычленения, фиксации законов и средств композиции, которые применялись при создании хрестоматийно известных творческих продуктов дизайна. Проанализированы композиционные построения интерьера, возникшие в результате влияния на него формообразования, тектоники и условного изобразительного (инженерного) языка скоростных автомобилей, летающих и плавающих машин. Отмечено, что изучение высококлассных образцов Наследия позволяет развивать вкус и учит понимать ход и истоки композиционной мысли (на примере работ Тео Ван Дусбурга).

Ключевые слова: инженерное искусство, архитектура, композиция, китч, абстрактная картина, объемно-пространственная композиция, плоскостная композиция, формализм, формальный подход, формообразование, проект, дефиниция, дизайн

ORIGINS OF IMAGINATIONAL SOLUTION OF ARCHITECTURAL PROBLEMS IN THE COMPOSITION OF THEO VAN DUSBURG

R.F. Mirkhasanov, V.A. Sadkov, L.S. Sabitov, Yu.V. Bocharova

The authors convey information about the union of design and engineering art by isolating, fixing the laws and means of composition that were used to create textbook famous creative design products. The compositional constructions of the interior, which have appeared as a result of the influence of shaping, tectonics and conditional pictorial (engineering) language of high-speed cars, flying and

floating cars, are analyzed. The study of high-class samples of the Heritage allows to develop taste and teaches to understand the course and origins of Theo Van Dusburg's compositional thought.

Keywords: engineering art, architecture, composition, kitsch, abstract painting, three-dimensional composition, planar composition, formalism, formal approach, shaping, project, definition, design

Любой объект, созданный мастерами исторически сложившихся видов изобразительного искусства, или продукт дизайна должны подчиняться закономерностям композиционной константы. Оценка композиционной формы должна проводиться невзирая на финансовую успешность или содержательную наполненность, известность продукта изобразительного искусства или дизайна. В случае фиксации многочисленных отступлений от законов композиции, максимального преобладания «содержательного начала» продукта изобразительного искусства или дизайна мы имеем дело с творческим или учебным продуктом непрофессионального автора или примером случайно или осознанно созданного китча. Формальный (композиционный) анализ на основе универсальных законов и средств плоскостной или объемно-пространственной композиции – это прекрасный пример объективной оценки творческого продукта, принадлежащего к любому виду изобразительного искусства и дизайна, нивелирующий субъективные предпочтения или оценки в русле «вкусовщины»: нравится – не нравится [1].

Композиционный закон *«новизны и современности»* гласит, что на каждом этапе истории «форма» в искусстве дизайна, скульптуры, живописи, архитектуры должна отражать новое, современное состояние инженерной и научной мысли, общества. Телефония, радио, искусство кино требовали создания экстерьеров и интерьеров для функционального решения своих задач. Самолеты-истребители, гоночные автомобили, локомотивы и океанские лайнеры – эти машины, механизмы и приборы требовали новых форм (композиция) зданий портов, аэродромов, интерьеров кабин, а также влияли на формообразование искусственно вновь создаваемых организмов.

Рассмотрим же проблемы, которые поднимались великими архитекторами мирового уровня в их теоретических трудах.

Гинзбург М.Я., оценивая скорость и динамику современной жизни в русле необходимости соответствия им современных архитектурных форм, писал в труде «Стиль и эпоха» (1924 г.): «С другой стороны, динамика готического или барочного собора кажется нам бесконечно уравновешенной и младенческой по сравнению с неудержимым темпом наших дней. Она заставляет зодчего внимательно присмотреться ко всем проявлениям динамической жизни современности, для того чтобы сконденсировать ее со всей силой и остротой и в произведениях архитектуры. Ни средства готики, ни оружие барокко уже более не годятся. Узнавши и овладевши их композиционными методами, современный зодчий должен их бесконечно приумножить, иначе говоря, прибавить к ним свои методы, свои средства, опирающиеся на окружающую нас жизнь» [2].

В период времени, рассматриваемый нами с позиций дизайна и продуктов инженерной мысли, достижения в построении, например, самолетов были столь стремительны и плодотворны, что заставляли архитекторов глядеть на труд инженеров, конструкторов машин с пиететом и восторгом. Архитектурно-эстетическая сторона инженерного продукта (содержание) проявлялась самостоятельно в результате достижения инженерами-конструкторами высоких функциональных качеств машины (форма) [3]. Таким образом, знаменитый лозунг архитекторов-модернистов «форма проистекает из функциональности» у инженеров звучал как «эстетика проистекает из функциональности». Особенно ярко это проявлялось в машинах оборонной промышленности, где потребителя-заказчика абсолютно не интересовали архитектурно-эстетические параметры военной техники, а только инженерный функционал (форма). Т.е. прочный, маневренный, могущественный в огневом отношении военный самолет и автомобиль, имеющие прекрасные скоростные, ремонтные и др. качества функционального совершенства, эстетически привлекателен уже «по своей природе», без вмешательства архитекторов. При этом никто не усомнится, что средний танк Т-34-85

имеет высочайшую степень эстетики экстерьера. Он прекрасен именно *комплексом* функциональных качеств и имеет элегантный, стремительный экстерьер. При этом ни один архитектор не работал над эстетикой экстерьера танка Т-34-85 или красавцев-самолетов Ла-5, Ла 7, Як-3. Так конструктор-инженер природа создала идеальные функциональные характеристики быстрейшего хищника гепарда, что автоматически проявляется в божественной красоте его экстерьера, в гармонии его объемных форм [4].

Ле Корбюзье писал в труде «К архитектуре» («Vers une architecture») в 1923 г.: «…Самолеты. Самолет есть продукт высшего отбора. Его создатели могут преподать нам важный урок: научить логике в постановке и в разрешении проблемы. Проблема дома еще не поставлена…». Таким образом Корбюзье говорит об «искусственном отборе» создаваемой техники, подобном отбору природному. Ошибка инженера исправляется аварией машины, а ошибка природы исправляется «естественным отбором» [5].

Восхищаясь автомобилями, Ле Корбюзье пишет об архитектуре, как о «машине жилья»: «…В механике фактор экономии диктует соответствующий отбор. Дом – это машина для жилья. Автомобили... Чтобы подойти к проблеме совершенства, надо стремиться к выработке стандарта…».

В этих словах Корбюзье объединяет в единый термин классическую многовековую архитектуру, создаваемую ремесленным путем «по кирпичику», и инженерно-архитектурные здания со стальными фасадами и привешенной к ним стеной из стекла. Стальной дом «Clarte», похожий на океанский лайнер, Корбюзье построит в 1930 г.

Закон конструкции (каркаса) в строительстве гласит, что инженерное искусство – это каркас, а «содержательное» или эстетическое наполнение – это архитектура. Этот аспект отражен и в словах Ле Корбюзье: «Эстетика инженерии и архитектура – две вещи, прочно связанные, последовательные, при этом одна находится в расцвете, а другая в болезненном упадке. Инженер, вдохновленный законом экономии и ведомый расчетами, приводит нас в согласие с законами Вселенной. Так он достигает гармонии…» («Vers une architecture», 1923 г.).

Также в труде «К архитектуре» («Vers une architecture») в 1923 г. Ле Корбюзье писал о построенных инженерами океанских лайнерах через призму создания новой архитектурной формы: «…Лайнеры. Великая эпоха только началась. Родился новый дух. В этом духе уже многое создано, и больше всего – в области промышленного производства…».

Теоретик и практик строительства Гинзбург М.Я. понимал, что эстетическая (архитектурная) часть в строительстве подвергается обструкции, как устаревшие элементы античного декора. Он пытался указать на те задачи, которые необходимо решить для достижения цели – создания новой для 20-х г. XX в. формы в архитектуре и дизайне. Гинзбург М. Я. писал в 1924 г. о современной архитектурной форме (композиция – конструкция), избавляющейся от элементов «декора» в виде архитектурных деталей ордерных систем (содержание), в своем труде «Стиль и эпоха»: «Раз колонна и пилястра теряют в новой архитектуре свое самодовлеющее декоративное значение, а остаются лишь конструктивные и утилитарные опора и контрфорс, ясные в своей функциональной действенности, – перед зодчим вырастает во всей своей чистоте проблема ритмической организации этих опор или контрфорсов. И точно так же утилитарные элементы, вроде отверстий окна или двери, освобожденные от декоративного облачения, заставят зодчего обратиться к более существенной и основной задаче отыскания пропорциональных сочетаний, гармонических формул, утерянных в дебрях исторических аксессуаров».

Таким образом, исходя из высказываний великих архитекторов в период 20-х г. XX в. можно говорить, что форма (композиция) предметов наполнения интерьеров, инженерных коммуникаций здания, конструкции самого здания не могла быть прежней. Делегируя читателя статьи к константе искусства в виде законов и средств композиции, можно отметить, что изменилось и содержание искусственных композиций данной эпохи. Искусственная художественная форма в классических видах изобразительного искусства (архитектуре) и дизайне строится по аналогии с

природными (живыми формами и организмами) и включает в себя кроме содержательной базы (содержание) и композиционную форму (форма). Таким образом, эти две эстетические категории и дефиниции находятся в пропорциональном соотношении, в определенном гармоничном балансе [6, 7].

Несомненно влияние абстрактной живописи на все искусство XX в. Композиционные построения, каркас композиции, ритм и модульно-метрические членения – все указывало на движение станковой живописи в цветовые композиции в русле дизайна. Очищенную от сюжетного рассказа, изобразительных деталей, раскрывающих сюжет, станковую живопись можно было легко трансформировать в композицию цвета, а затем и в промышленный дизайн-продукт.

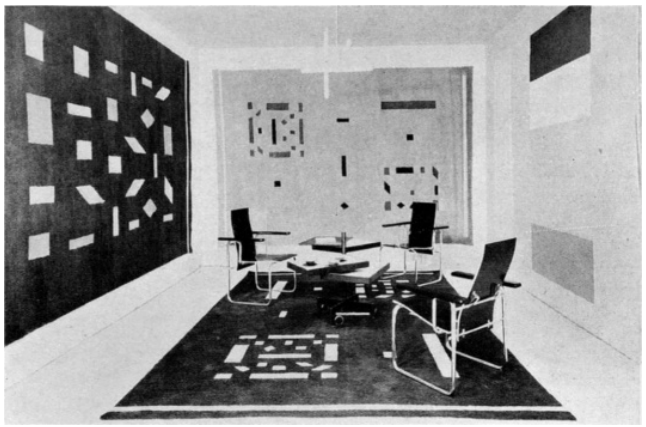


Рис. 1. Выставочный зал «Metz & Co», Барт ван дер Лек

В 1917 г. было создано творческое объединение мастеров, работавших в разных видах изобразительного искусства. А в 1926 г. Тео ван Дусбург, Софи Таубер-Арп и Жан Арп (или Ханс Арп) получили заказ от Поля и Адре Хорна на оформление интерьеров кафе «Обетт» в Страсбурге. Контакты архитекторов и художников происходили в группе «Де Стейл» художественного направления «неопластицизм«. Абстрактная живопись группы «Де Стейл» легко трансформировалась в русле дальнейшего обобщения как в тиражирование печатной продукции, так и в материалы отделки стен, предметы интерьера и др. Таким образом, станковая классическая живопись перерастала в промышленное тиражируемое искусство дизайна и превращалась, очищаясь от сюжетного начала, в абстрактную цветовую композицию [7, 8].

Барт ван дер Лек утверждал, что именно он является фактически пионером движения «Де Стейл»: «Однажды Мондриан пришел ко мне домой с Дусбургом, которого я никогда раньше не видел. Когда Дусбург заметил абстрактную картину прямо на мольберте, он воскликнул: «Если это не картина будущего, пусть меня повесят прямо сейчас!». Что ж, несколько месяцев спустя он писал именно в такой манере. Вот таким человеком был Дусбург. Никаких собственных идей. И мошенник в придачу...» [5].

Построению абстракций Мондриана, основанных на квадратной модульной сетке формата, ван Дусбург противопоставил построение цветовых пятен и черных линий, совпадающих с линиями диагоналей модулей сетки формата.

Увлекателен анализ законов и средств композиции в работах великих архитекторов 20-х годов XX в. Опыт архитекторов был направлен во многом на поиск новой архитектурной формы, на решение новой формальной задачи. Создавалась новаторская современная архитектура, отличная от классической ордерной системы и «историзма», которая обращалась в русле материалов, образных решений к продуктам научной и инженерной мысли своей эпохи [9,10].

Закон контраста в действии: барочно-пышный и торжественный экстерьер исторического здания «Обетт» (Aubette) на площади Клебер (Страсбург, Франция),

построенного архитектором Жаком-Франсуа Блонделем в 1765-1772 гг., гармонирует с интерьерами эпохи модернизма 20-х г. XX в. (рис.2, 3).

Рис. 2. Фасад здания. Кафе «Обетт» (Aubette). Архитектор Жак-Франсуа Блондель. 1765-1772 гг.

Рис. 3. «Обетт» (Aubette). Страсбург. Франция. Макет

Важнейший закон композиции – *«контраст»* – гласит, что старое и новое по времени и эпохе могут быть противопоставлены в композиции, создав Гармонию. Таким образом, проект интерьеров и их наполнения в здании «Обетт» (Aubette) решал вопрос включения новых форм дизайна XX в. в историческую постройку и при этом транслировал реалистичный инженерный подход, но мощно опередил свое время, став ярким примером, «иконой стиля», символом эпохи.

Композиционный каркас и нивелирование декора («украшения»): из композиционных построений предшествующих эпох мэтрами модернизма 20-х г. XX в. были изъяты первоэлементы форм. Модернисты-архитекторы удалили исторические реминисценции в экстерьерах зданий. Модернисты-художники очищали свои полотна от содержательной части композиционного организма (рис. 4).

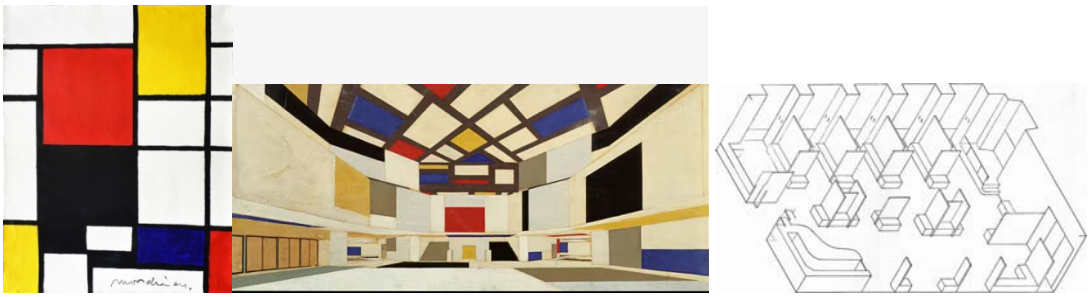


Рис. 4. Пит Мондриан. Абстракция

Краска и плоскость в композиции: цвет – сложная по оттенкам категория живописной композиции. Цвет относится к ручной ремесленной живописи. Цветным можно назвать пятно, имеющее «внутри» тепло-холодные вибрации. Живопись – ремесленного характера работа на плоскости, выполненная вручную кистью и красками для трансляции тепло-холодных отношений. Живописную работу красками невозможно абсолютно точно повторить, невозможно создать точный дубликат. «Плоскостной» характер пятен интерьера по почти локальным равномерно окрашенным красками пятнам. Плоскостной по формам и линиям декор интерьера: диагональные линии декора и уходящие в перспективу горизонтальные линии с некоторых точек обзора почти «объединяются», что вкупе с плоскостными красочными пятнами создает иллюзию плоскостного изображения. Тео ван Дусбург проявлял в 1913 г. интерес к проблемам интеграции чистой живописи и архитектуры. В этой области он проводил теоретические и практические исследования совместно с Ж.Р. Аудом и Ж. Вильсом.

Образное решение в композиции помогает лучше представить себе рассматриваемый объект архитектуры и дизайна в контексте развития научной и технической мысли того времени. Эта эпоха славится бурным развитием самолето-, автомобиле-,

кораблестроения. Так, плоские геометрические формы модулей квадратов читаются в дверцах и ветровых стеклах автомобиля Bentley 6½ L. Строгие формы автомобиля можно расчленить на почти «чистые» по форме призмы окружности (рис. 5).

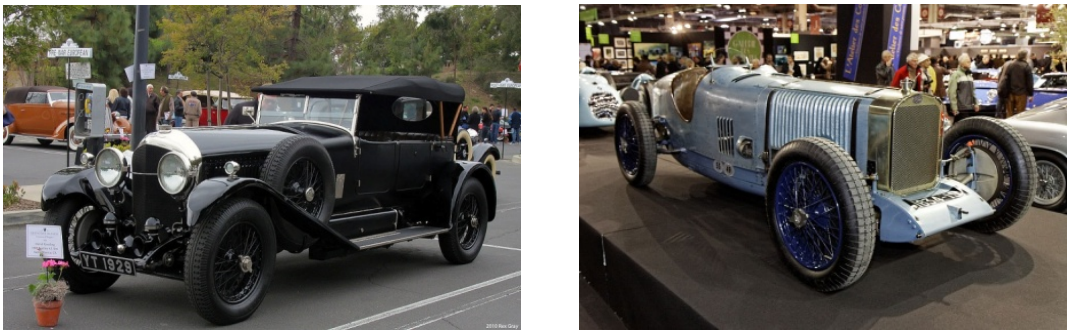


Рис. 5. Bentley 6½ L – спортивный автомобиль, разработанный британской компанией Bentley Motors во второй половине 1920-х г.

Создание и решение новой формальной (композиционной) задачи преобладало в искусственно создаваемых композиционных построениях живописи и архитектуры 20-х г. XX в. Инженерная мысль и абстрактная живопись влияли на архитектуру, которая именно в этот период создает «дома – машины для жилья», очищает фасады зданий от декора (украшения) или элементов ордера (рис. 6).

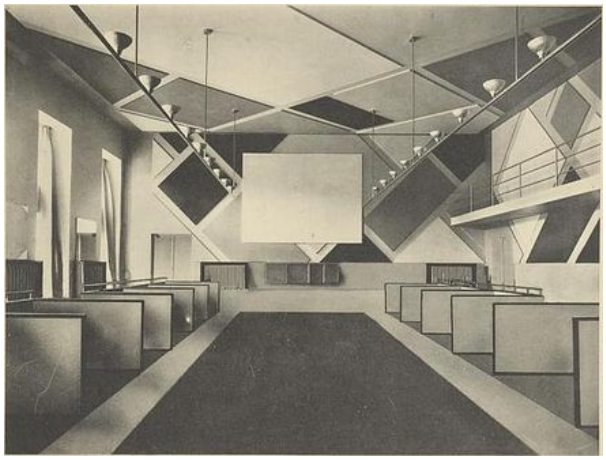


Рис. 6. Тео ван Дусбург. Кафе, кинотеатр, танцевальный зал. 1929 г.

Крылья самолета или мифического крылатого существа (например, Икара) определяются на фронтальной стене интерьера кафе. Вертикальные стойки с горизонталями перил ограждения на палубе океанского лайнера в виде образных истоков читаются на боковой стене справа. Самолёт – современник работы Тео ван Дусбурга над проектом кафе. Самолет представлял собой моноплан-парасоль металлической конструкции с полотняной обшивкой. Сужающийся к хвосту и передней части с двигателем фюзеляж, стойки неубирающихся шасси, переходящие к креплениям крыла (два стальных подкоса для каждого крыла), – все выполнено с единственной целью облегчения веса и увеличения прочности и скорости аппарата [11,12].

Черно-белое фото прекрасно иллюстрирует принцип *трехтонального (светотонального) композиционного рельефа.* Синий цвет воспринимается на черно-белом фото как черный тон, красный – как серый. А желтые и белые цвета в декоре интерьера можно условно обозначить как белый тон композиционного рельефа. Таким образом, эскизы архитектора Тео ванн Дусбурга (что особенно хорошо видно на черно-белых фото) выполнены в виде «плоскостного изображения», структурированного в виде однотонных пятен серого (красный), черного (черный и синий красочный

тон) и белого цвета (можно отнести и желтый красочный тон) и линий различной степени толщины и активности.

«Трехтональный красочный композиционный рельеф» (рис. 7) проявляется в эскизах красками, которые выполнены дизайнером с транслированием линейных ритмов и ритмики пятен, образующих «трехтональный композиционный рельеф» (черный + серый + белый тон). Схематический графический анализ (СГА) и «вольное копирование» как инструменты интегративной и универсальной методики фиксируют законы и средства композиции на основе изучения формальной сферы Наследия. Фиксируют не только контраст, модульные, метрические членения вертикальных и горизонтальных ритмов, но и конструкцию, пластику, пропорциональные соотношения, называемые «золотое сечение», свойство динамики и статики, ощущение легкости и тяжести. Таким образом, происходит вычленение из единого композиционного организма отдельных законов и свойств композиции, трансляция в схемах пути композиционных размышлений автора продукта, выявление аналоговых связей между первоклассными всемирно известными продуктами инженерной, архитектурной, художественно-дизайнерской мысли.

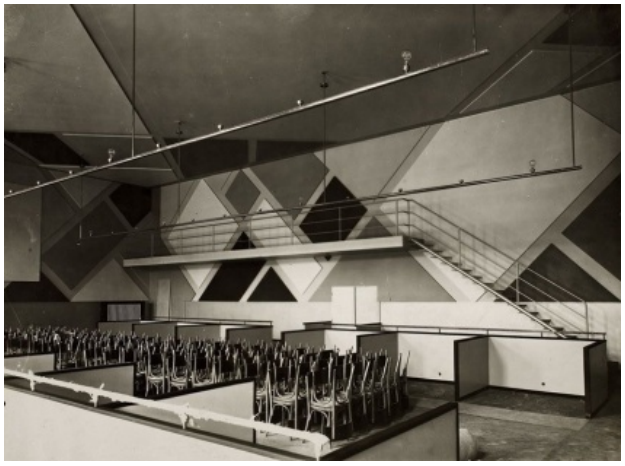


Рис. 7. Кафе. Кинотеатр. 1929 г.

Цветной трехтональный рельеф характерен для живописных полотен, а красочный (выполненный в локальных ровно окрашенных красочных оттенках) характерен для проектной культуры (рис. 8).

Рис. 8. Интерьеры. «Обетт» (Aubette)

Тео ван Дусбург проектировал два кафе и два танцевальных зала, Софи Таубер отвечала за входной проход, чайную и два бара, зоной ответственности Жана Арпа были подвал, коридор и бильярдная.

Геометрия *модульно-метрических членений* – составляющая единой объемной формы ступеней (проступи) и вертикали ограждения. На рис. 9 видно модульное

единство: квадратные по форме стекла оконного и дверного проемов равны цветным квадратам декора на стене.

Рис. 9. Лестничный пролет и площадка. «Обетт» (Aubette). Страсбург. Франция

Совместный дизайн-проект трех художников – это лестничная клетка. Позднее этот проект получил название «Сикстинская капелла абстрактного искусства».

Не вызывает сомнения единство образного решения и условного изобразительного языка в декоре стен интерьеров «Обетт» и в композициях Пита Мондриана.

Закон *«Ритм линейный»* проявляется в зоне кафе «Обетт» (Aubette), где располагался кинотеатр и танцевальный зал; Тео ван Дусбург создал здесь динамичный дизайн с диагоналями декора для стен и потолка. Ритмическая вертикальная и горизонтальная структура интерьеров объекта характерна не только для декора стен, но и для предметов наполнения интерьера, мебели, ограждений и т.д.

О важных выразительных средствах композиции *«плоскость + линия»* пишет в книге «Градостроительство» Ле Корбюзье: «В современном городе должна господствовать прямая линия. Жилые дома, водопроводные и канализационные линии, шоссе, тротуары — все должно строиться по прямой. Прямая линия оздоровляет город». Ле Корбюзье писал в 1923 г. в книге «Vers une architecture»: «Поверхность. Объем ограничен поверхностью. Поверхность членится направляющими и образующими линиями данного объема, которые выявляют его особенности»[5].

Закон композиции *«Новизна и современность»* раскрывается на примере дизайна кафе «Обетт»: несомненна нацеленность дизайнеров 20 г. XX в. на разработку яркого современного языка и новой современной композиционной формы. Новая для того периода времени архитектурно-дизайнерская композиция с форсированием динамики, акцентированием ритмической организации, с выявлением «внутренней жизни» здания в его стенах, лестничных пролетах проявилась в подчеркивании линейных элементов плоскостных красочных пятен. Интерьер расположенного в стенах исторического здания XVIII в. кафе, трансформируемый для танцев и просмотра фильмов, является наглядным тому подтверждением.

Закон композиции *«акцент – отголоски»* реализуется в проекте «Обетт» Тео ван Дусбурга, т.к. он четко построен на модульно-метрических членениях декора (плоскостная композиция) и предметов интерьера (объемно-пространственная композиция).

Весь проект дизайна кафе «Обетт» аналитически структурирован и построен на «акцентно-отголосочной» структуре. Акцентировано воспринимаются пятна желтого цвета, которые являются самым «ближним» по плановости цветовым пятном и расположены на освещенных светом поверхностях. Ритмика пятен создается чередованием с определенным интервалом ударов плоских цветовых пятен красного цвета, различных по форме площадей синего тона.

Закон композиции *«акцент – отголосок и модульно-метрические членения»* прослеживается в пронизанном геометрией и модульной сеткой интерьере. Реализация постулатов закона прекрасно читается в проекте интерьеров кафе «Обетт». Универсальный изобразительный язык работ всех участников творческого объединения «Де

Стейл» транслировал композиционную идею членения плоскости формата по модульно-метрическому принципу. Подобные построения абстрактных полотен воспринимаются сегодня как условный изобразительный язык, характерный для эпохи модернизма: советского авангарда и в большей степени для ар-деко 20-х г. XX в. [13].

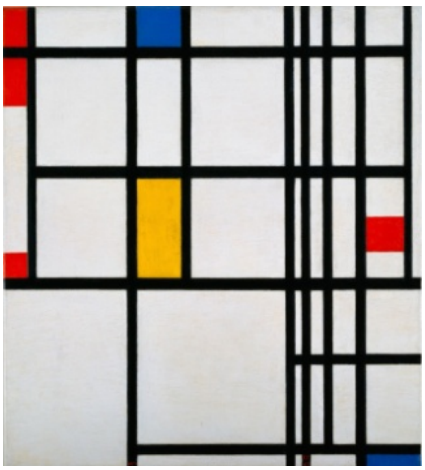


Рис. 10. Пит Мондриан. Абстрактная нефигуративная композиция

Не вызывает сомнений, что проекты Тео ванн Дусбурга (объемно-пространственная композиция) и Пита Мондриана, Барта ван дер Лека (композиция плоскостного характера) основаны на единых постулатах и идеях, которые «витали в это время в воздухе» и на единых, универсальных законах и средствах композиции.

Условный изобразительный язык архитектуры, живописи базируется на материалах и технологиях строительства, создания изображения соответствующей эпохи, школы, автора, исторических и стилистических предпочтениях эпохи. Условный изобразительный язык абстракций таких мастеров, как Пит Мондриан, Барт ван дер Лек, основан на преобладании формальной части искусственно создаваемого композиционного организма: конструкция, аналитический (формальный) подход, геометрия построений [14].

Закон композиции *«интернациональное и национальное»* проявляется в продуктах музыки, архитектуры, живописи, дизайна. Категория «национальное» в искусстве характерна в большей степени для ручного, ремесленного искусства, но проявляется и в дизайне. Невозможно не заметить, что самые компактные, «геометричные» по объему формы экстерьера автомобили проектируют японские дизайнеры. Яркий по неповторимости образа, габаритам «национальный» дизайн отличает экстерьеры автомобилей США 50-х г. XX в. Очень «национальный» финский колорит отличает предметы мебели пионера «интернационального» направления в архитектуре Алвара Аалто.

Создание плоскостной и объемно-пространственной композиции сопровождается композиционными поисками автора творческого продукта. Огромный интерес для учащегося, студента, исследователя, ученого, профессионала представляет понимание хода композиционной мысли автора всемирно известного творческого продукта. Выполняя схематический графический анализ, мы приходим постепенно к истокам, к идее, первоначальному замыслу автора, что является важным в свете современных требований профессиональной подготовки архитекторов и дизайнеров.

Список литературы

1. Ad Petersen, De Stijl Complete Reprint 1968, Amsterdam: Athenaeum, Den Haag: Bert Bakker, Amsterdam: Polak & Van Gennep, p. 617.

2. Гинзбург, М.Я. Стиль и эпоха: проблемы современной архитектуры / М.Я. Гинзбург. – М., 1924. – 239 с.

3. Дейхер, С. Пит Мондриан (1872-1944). Конструкции в пространстве / С. Дейхер. – АРТ-Родник, 2007. – 96 с.

4. Cohen Jean-Louis. Mies van der Rohe / Jean-Louis Cohen. – Paris: Hazan, 1994. – 143 p.

5. Le Corbusier (Charles Édouard Jeanneret, 1887-1965). Vers une architecture. – Paris: G. Crès, Collection de «L'Esprit Nouveau», 1923. – 230 p.

6. Seuphor, M. Piet Mondrian New York / M. Seuphor. – NY: Harry N. Abrams Inc. – P. 138.

7. Скачков, Ю.П. Модификация метода паттерн к решению архитектурно-строительных задач / Ю.П. Скачков, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – № 1. – С. 4–9.

8. Фремптон, К. Международный стиль: тема и вариации, 1925–1965 / К. Фремптон // Современная архитектура: критический взгляд на историю развития. – М.: Стройиздат, 1990. – 363 с.

9. Бочарова, Ю.В. Территория и объекты завода имени М.В. Фрунзе в контексте развития городской среды Пензы / Ю.В. Бочарова, М.Т. Хрюкина // Градостроительство и архитектура. – 2021. – Т. 11, № 3(44). – С. 20–25.

10. Culshaw, D. Bentley // The Complete Catalogue of British Cars 1895–1975 : e-book / D Culshaw, P Horrobin. – Poundbury, Dorchester, UK : Veloce Publishing, 2013. – P. 80–84.

11. Саденко, Д.С. Основы научно-технического сопровождения объектов капитального строительства / Д.С. Саденко, И.Н. Гарькин, М.В. Арискин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2 (51). – С. 89–95.

12. Журнал Aero Digest. Том 17. №1. Июль. 1930 г. – URL: https://www.aeroflight.co.uk/mags/magazine-details/aero-digest-magazine.htm

13. Danilov, A. Coherence function in analysis and synthesis of complex systems / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 9. – P. 375–380.

14. Данилов, А.М. Спектральные методы при анализе динамических систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 3. – С. 109–113.

References

1. Ad Petersen, De Stijl Complete Reprint 1968, Amsterdam: Athenaeum, Den Haag: Bert Bakker, Amsterdam: Polak & Van Gennep, p. 617.

2. Ginzburg, M.Ya. Style and era: Problems of modern architecture / M.Ya. Ginzburg. – M., 1924. – 239 p.

3. Deicher, S. Piet Mondrian (1872-1944). Structures in space / S. Deicher. – ART-Spring. 2007, – 96 p.

4. Cohen Jean-Louis. Mies van der Rohe / Jean-Louis Cohen. – Paris: Hazan, 1994. – 143 p.

5. Le Corbusier (Charles Édouard Jeanneret, 1887–1965). Vers une architecture. – Paris: G. Crès, Collection de «L'Esprit Nouveau», 1923. – 230 p.

6. Seuphor, M. Piet Mondrian New York / M. Seuphor. – NY: Harry N. Abrams Inc. – P. 138.

7. Skachkov, Yu.P. Modification of the pattern method for solving architectural and construction problems / Yu.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2011. – No. 1. – P. 4–9.

8. Frampton, K. International Style: Theme and Variations, 1925-1965. / K. Frampton // Modern architecture: a critical look at the history of development. – M.: Stroyizdat, 1990. – 363 c.

9. Bocharova, Yu.V. The territory and facilities of the plant named after M.V. Frunze in the context of the development of the urban environment of Penza / Yu.V. Bocharova, M.T. Khryukina // Urban planning and architecture. – 2021. – Vol. 11, No. 3(44). – P. 20–25.

10. Culshaw, D. Bentley // The Complete Catalogue of British Cars 1895–1975 : e-book / D Culshaw, P Horrobin. – Poundbury, Dorchester, UK : Veloce Publishing, 2013. – P. 80–84.

11. Sadenko, D.S. Fundamentals of scientific and technical support of capital construction objects / D.S. Sadenko, I.N. Garkin, M.V. Ariskin // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2 (51). – P. 89–95.

12. Aero Digest. Volume 17. No. 1. July 1930. – URL: https://www.aeroflight.co.uk/mags/magazine-details/aero-digest-magazine.htm

13. Danilov, A. Coherence function in analysis and synthesis of complex systems / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 9. – P. 375–380.

14. Danilov, A.M. Spectral methods in the analysis of dynamic systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2014. – No. 3. – P. 109–113.