

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ**

**Выходит 4 раза в год**

**Учредитель и издатель**

Пензенский государственный  
университет архитектуры  
и строительства

**Главная редакция:**

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

**Адрес редакции:**

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

Редакторы: М.А. Сухова  
Н.Ю. Шалимова

Дизайн обложки Е.Г. Лапшина

Компьютерная верстка  
Н.А. Сазонова

Перевод О.В. Гринцова

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

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

Подписной индекс:  
**36946** в каталоге Роспечати

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

Подписано к печати 15.05.2018.  
Формат 60x84 1/8.  
Уч.-изд.л. 27,75. Тираж 500 экз. Первый завод 100.  
Заказ № 600.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

# РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

2(35)/2018

## Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ.....	5
<b>Максимова И.Н., Макридин Н.И., Королев Е.В.</b> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ НА РАННИХ И ПОЗДНИХ СТАДИЯХ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ .....	5
<b>Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Стешин А.В.</b> ВЛИЯНИЕ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ДОБАВОК И ВОЛОКОН НА УДЕЛЬНУЮ УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ .....	13
<b>Селяев В.П., Сорокин Е.В., Селяев П.В., Алимов М.Ф.</b> ВЛИЯНИЕ ВИДА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ « $\sigma - \epsilon$ » НА РАСЧЕТНЫЕ ПРОГИБЫ ПЛАСТИНЫ .....	17
<b>Береговой В.А., Фокин Г.А., Снадин Е.В.</b> ПСЕВДОРАЗЖИЖЕНИЕ СЫРЬЕВЫХ МАСС В ТЕХНОЛОГИИ ЯЧЕИСТОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ СИЛИЦИТОВ .....	26
<b>Воскресенский А.В., Гречишкин А.В.</b> ЭПОКСИДНЫЕ КОМПОЗИТЫ С УПОРЯДО- ЧЕННОЙ СТРУКТУРОЙ И ПОВЫШЕННОЙ ХИМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТЬЮ С ДОБАВКАМИ ВЫСШИХ ЖИРНЫХ КИСЛОТ .....	31
<b>Фокин Г.А., Тетюшева О.В., Вилкова Н.Г.</b> ВЛИЯНИЕ ВИХРЕВОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	36
<b>Викторова О.Л.</b> ОЦЕНКА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ КАРБОНАТНО-ШЛАКОВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА .....	45
<b>Гарькина И.А., Данилов А.М.</b> ПОЛИНОМИАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ В ПРОГНО- ЗИРОВАНИИ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ: СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ .....	50
<b>Гарькина И.А., Данилов А.М.</b> ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИ- РОВАНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ.....	55
<b>Логанина В.И., Демьянова В.С., Фокин Г.А., Фролов М.В.</b> ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОМПОНЕНТОВ ПРИ СОЗДАНИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ .....	61

© Авторы публикаций, 2018

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2018

© ПГУАС, 2018

<b>Очкина Н.А.</b> ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ПОРИСТОСТЬ РАДИАЦИОННО- ЗАЩИТНОГО КОМПОЗИТА ..... 71	<b>Рулев А.В., Усачева Е.Ю.</b> РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ ПО ТЕПЛОВОМУ РАСЧЕТУ КОНДЕНСАТОРОВ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ В КАЧЕСТВЕ РАБОЧИХ АГЕНТОВ ЗЕОТРОПНЫЕ СМЕСИ..... 146
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ .....76	<b>Королева Т.И., Аржаева Н.В.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА В ТОЛЩЕ МНОГОСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ НАРУЖНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ..... 152
<b>Шенин А.И., Зернов В.В., Зайцев М.Б.</b> ОПЫТ РЕНОВАЦИИ ЖИЛОГО ДОМА БЕЗ РАССЕЛЕНИЯ ЖИЛЬЦОВ ПОСЛЕ ОТКАЗА НЕКОТОРЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ..... 76	<b>Королева Т.И., Аржаева Н.В., Мельников И.Е.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ КОНСТРУК- ЦИЙ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ..... 159
<b>Шишкин С.О., Гучкин И.С., Ласьков Н.Н.</b> ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ И ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ БЕТОННЫХ КОНСОЛЕЙ С АРМАТУРОЙ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА И МЕТАЛЛА ..... 84	<b>Андреев С.Ю., Яхкинд М.И., Гарькина И.А., Сафронов М.А.</b> НОВАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГИДРОДИНА- МИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСТЕ- НОЧНОГО СЛОЯ ТРУБЧАТЫХ КАПЛЕ- ОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД ... 167
<b>Устарханов О.М., Муселемов Х.М., Ирзаев Г.Г.</b> РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПАНЕЛИ С ВОЛОКНИСТЫМ НАПОЛНИТЕ- ЛЕМ ПРИ ДЕЙСТВИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ И СОСРЕДОТОЧЕННОЙ НАГРУЗОК..... 92	<b>Андреев С.Ю., Яхкинд М.И., Гарькина И.А.</b> ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИН МЕСТНЫХ ОСРЕДНЕННЫХ СКОРОСТЕЙ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ТРУБЧАТОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ..... 178
<b>Гарькин И.Н.</b> ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВНЫХ НЕРАЗРЕЗНЫХ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК ..... 100	АРХИТЕКТУРА ..... 191
<b>Калачук Т.Г., Оноприенко Н.Н., Курбатова В.В.</b> О ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ВОДОНА- СЫЩЕННЫХ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ ..... 105	<b>Петрянина Л.Н., Гречишкин А.В.</b> МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ПРИ РЕКОН- СТРУКЦИИ ЖИЛЫХ РАЙОНОВ..... 191
<b>Вдовин В.М., Карпов В.Н.</b> ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ РИГЕЛЯ-РАСПОРКИ В СТРОПИЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ..... 111	ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ..... 196
<b>Бакушев С.В.</b> ОГРАНИЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ..... 116	<b>Мебадури З.А., Учаева Т.В., Сигунова Е.И.</b> ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОЗВЕДЕНИЯ ЖИЛЫХ ДОМОВ НА ПРИМЕРЕ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ..... 196
<b>Береговой А.М., Береговой В.А.</b> ЭНЕРГОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ ..... 124	<b>Домке Э.Р., Жесткова С.А., Акимова В.Ю.</b> ЛОГИСТИКА В ДОСТАВКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ... 203
<b>Кузина В.В., Кошев А.Н.</b> ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЛЕВЕНБЕРГА – МАРКВАРДТА ПРИ РЕШЕНИИ НАУЧНЫХ ЗАДАЧ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ..... 128	<b>Кошев А.Н., Кузина В.В., Васин Л.А., Глебова Т.А.</b> ЭЛЕКТРОННАЯ СРЕДА КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ..... 211
<b>Дерина М.А.</b> ВЫБОР УТЕПЛИТЕЛЯ ДЛЯ НАВЕСНОГО ФАСАДА С ВЕНТИЛИРУЕМЫМ ВОЗДУШНЫМ ЗАЗОРОМ ..... 133	<b>Васин Л.А.</b> ОРГАНИЗАЦИЯ ВИДЕОКОНФЕРЕНЦИЙ В ЭЛЕКТРОННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ УНИВЕРСИТЕТА ..... 218
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ..... 137	
<b>Горшков В.И., Мирошниченко Д.С., Мельников Е.А.</b> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ УПРАВЛЯЕМЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ ВЕТВЯЩИХСЯ ПРОЦЕССОВ ..... 137	

---

## Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	<b>Ochkina N.A.</b> THE INFLUENCE OF MODIFYING ADDITIVES ON THE POROSITY OF A RADIATION-PROTECTIVE COMPOSITE.....	71
<b>Maksimova I.N., Makridin N.I., Korolev E.V.</b> COMPARATIVE ANALYSIS OF KINETIC DEPENDENCIES IN EARLY AND LATE STAGES OF PROCESSES OF STRUCTURAL FORMATION OF CEMENT COMPOSITES STRUCTURAL STRENGTH.....	5	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS .....	76
<b>Cherkasov V.D., Buzulukov V.I., Steshin A.V.</b> THE IMPACT OF FINELY DISPERSED ADDITIVES AND FIBERS ON THE SPECIFIC IMPACT STRENGTH OF CEMENT COMPOSITES .....	13	<b>Shein A.I., Zernov V.V., Zaytsev M.B.</b> EXPERIENCE OF RESIDENTIAL HOUSES RENOVATING WITHOUT TENANTS RESETTLAMANT AFTER THE FAILURE OF SOME STRUCTURAL ELEMENT .....	77
<b>Selyaev V.P., Sorokin E.V., Selyaev P.V., Alimov M.F.</b> INFLUENCE OF FUNCTIONAL DEPENDENCE TYPE « $\sigma - \varepsilon$ » ON THE CALCULATED DEFLECTIONS OF A PLATE .....	17	<b>Shishkin S.O., Guchkin I.S., Laskov N.N.</b> CRACKING AND FRACTURE OF CONCRETE CONSOLES WITH FIBERGLASS AND METAL REINFORCEMENT.....	84
<b>Beregovoi V.A., Fokin G.A., Snadin E.V.</b> FLUIDIZATION OF RAW MATERIALS IN THE TECHNOLOGY OF CELLULAR CERAMICS BASED ON NATURAL SILICIDES.....	26	<b>Ustarkhanov O.M., Muselemov K.M., Irzaev G.G.</b> ANALYSIS OF SANDWICH PANEL WITH A FIBER FILLER UNDER THE ACTION OF DYNAMIC EVENLY DISTRIBUTED AND CONCENTRATED LOADS.....	92
<b>Voskresenskiy A.V., Grechishkin A.V.</b> EPOXY COMPOSITES WITH ORDERED STRUCTURE AND INCREASED CHEMICAL RESISTANCE WITH HIGH FATTY ACIDS...	31	<b>Garkin I.N.</b> THEORETICAL STUDIES OF COMPOUND CONTINUOUS OVERHEAD CRANE BEAMS .....	100
<b>Fokin G.A., Tetjusheva O.V., Vilкова N.G.</b> INFLUENCE OF VORTEX DYNAMIC FIELD ON PROPERTIES OF BUILDING MATERIALS.....	36	<b>Kalachuk T.G., Onoprienko N.N., Kurbatova V.V.</b> LONG-TIME STRENGTH OF WATER-SATURATED LOESS SOILS .....	105
<b>Viktorova O.L.</b> ASSESSMENT OF HEAT-SHIELDING PROPERTIES OF CARBONITE-SLAG COMPOSITE MATERIAL .....	45	<b>Vdovin V.M., Karpov V.N.</b> SELECTION OF RATIONAL ARRANGEMENT OF CROSSBARS-STRUTS IN TRUSS SYSTEM .....	111
<b>Garkina I.A., Danilov A.M.</b> POLYNOMIAL MODELS FORECASTING THE PROPERTIES OF COMPOSITES: CONDITION, PROSPECTS .....	50	<b>Bakushev S.V.</b> LIMIT DEFORMATION THEORY OF PLASTICITY OF GRANULAR MEDIUM...	116
<b>Garkina I.A., Danilov A.M.</b> FORMALIZATION THE PROCESSES OF COMPOSITES PROPERTIES FORMATION ...	55	<b>Beregovoy A.M., Beregovoy V.A.</b> ENERGY-ACTIVE ELEMENTS OF EXTERNAL ENCLOSING STRUCTURES ...	124
<b>Loganina V.I., Dem'yanova V.S., Fokin G.A., Frolov M.V.</b> SUBSTANTIATION OF COMPONENTS SELECTION AT THERMAL INSULATING DRY BUILDING MIXTURES PRODUCTION....	61	<b>Kuzina V.V., Koshev A.N.</b> ABOUT FEATURES OF APPLICATION OF LEVENBERG – MARQUARDT METHOD IN SOLVING SCIENTIFIC PROBLEMS IN CONSTRUCTION .....	128
		<b>Derina M.A.</b> CHOICE OF INSULATION FOR SUSPENDED FACADE WITH A VENTILATED AIR GAP .....	133

ENGINEERING SYSTEMS .....137	ARCHITECTURE ..... 191
<b>Gorshkov V.I., Miroshnichenko D.S., Melnikov E.A.</b> MATHEMATICAL MODELING OF RELIABILITY OF VENTILATION SYSTEMS WITH USING OF CONTROLLED STOCHASTIC BRANCHING PROCESSES 138	<b>Petryanina L.N., Grechishkin A.V.</b> METHODS OF IMPROVING EFFICIENCY OF URBAN AREAS USE DURING RECONSTRUCTION OF RESIDENTIAL AREAS ..... 191
<b>Rulev A.V., Usacheva E.Yu.</b> DEVELOPMENT OF METHODOLOGICAL POSITIONS ACCORDING TO THERMAL CALCULATION OF HEAT PUMPS CONDENSERS UTILIZING AS WORKING AGENTS ZEOTROPE BLENDS..... 146	ECONOMICS AND MANAGEMENT.. 196
<b>Koroleva T.I., Arzhaeva N.V.</b> STUDY ON THE CONDENSATION OF WATER VAPOR IN THE THICKER MULTI- LAYER EXTERIOR ENCLOSING ..... 152	<b>Mebaduri Z.A., Uchaeva T.V., Sigunova E.I.</b> EFFICIENCY OF APPLICATION OF VARIOUS TECHNOLOGIES OF CONSTRUCTION OF RESIDENTIAL BUILDINGS ON THE EXAMPLE OF THE PENZA REGION ..... 196
<b>Koroleva T.I., Arzhaeva N.V., Melnikov I.E.</b> STUDY OF THE MOISTURE STATUS OF HETEROGENEOUS STRUCTURES OF EXTERIOR ENCLOSING ..... 159	<b>Domke E.R., Zhestkova S.A., Akimova V.Yu.</b> LOGISTICS IN THE DELIVERY OF OPERATIONAL MATERIALS FOR ROAD CONSTRUCTION MACHINERY ..... 203
<b>Andreev S.Yu., Yakhkind M.I., Garkina I.A., Safronov M.A.</b> NEW CALCULATION METHOD OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF WALL LAYER OF TUBULAR DROP FORMERS USED IN TREATMENT OF OILY WASTE WATER ..... 168	<b>Koshev A.N., Kuzina V.V., Vasin L.A., Glebova T.A.</b> ELECTRONIC ENVIRONMENT AS A MEANS OF IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF THE EDUCATIONAL PROCESS ..... 211
<b>Andreev S.Yu., Yakhkind M.I., Garkina I.A.</b> HYDRODYNAMIC REGULARITIES OF DISTRIBUTION OF LOCAL AVERAGED SPEED VALUES OF TURBULENT LIQUID FLOW IN CROSS-SECTION OF TUBULAR HYDRODYNAMIC DEVICE..... 178	<b>Vasin L.A.</b> ORGANIZATION OF VIDEO CONFERENCES IN THE ELECTRONIC INFORMATIONAL EDUCATIONAL SYSTEM OF THE UNIVERSITY ..... 218

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.327:539.32

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

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

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

*Национальный исследовательский  
Московский государственный  
строительный университет*

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

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

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

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

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

*National Research Moskovsky State University  
of Civil Engineering*

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

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

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ НА РАННИХ И ПОЗДНИХ СТАДИЯХ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

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

Представлены результаты обобщающего сравнительного анализа кинетических зависимостей процессов структурообразования конструкционной прочности цементных композитов на ранних и поздних стадиях гидратационного твердения на большом массиве экспериментальных авторских данных во временном диапазоне до 18 лет. Получены более строгие феноменологические модели механических свойств, которые могут быть положены в основу рецептурно-технологической оптимизации структуры и

прогнозирования длительной конструкционной прочности цементных гетерогенных дисперсных систем и закономерностей процессов их структурообразования и твердения.

*Ключевые слова:* цементный композит, ускоряюще-пластифицирующая добавка, структурообразование, твердение, прочность, конструктивный и деструктивный процессы, математические модели кинетических зависимостей

## COMPARATIVE ANALYSIS OF KINETIC DEPENDENCIES IN EARLY AND LATE STAGES OF PROCESSES OF STRUCTURAL FORMATION OF CEMENT COMPOSITES STRUCTURAL STRENGTH

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

A generale comparative analysis of kinetic dependences of the processes of structural formation of cement composites structural strength in early and late stages of hydration hardening on large experimental authors data in time range of up to 18 years has been made. Strict phenomenological models of mechanical properties have been obtained which can be used as a basis for prescription and technological optimization of the structure and predicting the long-term structural strength of cement heterogeneous disperse systems and regularities in the processes of their structure formation and hardening.

*Keywords:* cement composite, accelerating-plasticizing additive, structuring, hardening, strength, constructive and destructive processes, mathematical models of kinetic dependencies

Проблема нарастания длительной прочности цементной дисперсной системы во времени по своей практической значимости остается в центре внимания отечественных и зарубежных исследователей. Однако в публикациях по этой проблеме в основном рассматриваются ранние стадии процессов гидратационного структурообразования, что же касается поздних, то, как отмечено в работе [1], существует давно сложившееся мнение, что регулирование свойств цементного камня в этот период практически невозможно, хотя в этом имеется необходимость. В современных условиях поиска путей получения и использования в строительной практике бетонов нового поколения (БНП) с очень высокими показателями прочности, однородности и низкой пористости проблема длительной конструкционной прочности БНП приобретает особый научный и практический интерес с позиций как выбора технологической оптимизации структуры, так и прогнозирования свойств композита.

В исследованиях профессора С.А. Миронова с соавторами [2, 3] отмечается, что волнообразные изменения прочности во времени по восходящей линии являются не случайным, а закономерным явлением, обусловленным возникновением внутренних напряжений, снижающих прочность цементного камня от непрерывно идущей гидратации вяжущего, а также от перекристаллизационных процессов, обусловленных изменением фазового состава новообразований с переходом нестабильных соединений в более стабильные. В работе [4] отмечается, что фактор времени вызывает в бетоне проявление двух характерных разнонаправленных процессов: процесса нарастания прочности во времени (процесс старения бетона), определяемого физико-химическими изменениями его структуры, и процесса снижения прочности находящегося в напряженном состоянии бетона, связанного с проявлением его реологических свойств – ростом деформаций во времени, приводящим к определенным нарушениям внутренних связей в материале на микро- и макроуровнях.

В [5] приведены кинетические зависимости процессов структурообразования и твердения цементных композитов, отражающие ранние стадии процессов гидратационного структурообразования во временном интервале до 90 суток при использовании бездобавочных и добавочных портландцементов и модифицирующей полифункциональной химической добавки пластифицирующего действия. Анализ процессов структурообразования бетона (в рассматриваемом диапазоне времени) достаточно четко отражает влияние вида портландцемента и концентрации модифицирующей

химической добавки ПДО-М на характер изменения прочности  $R_{сж}$  и  $R_{ри}$  в рассматриваемом диапазоне времени.

Обобщение результатов исследований [6–12], в том числе собственных [13–16], позволяет констатировать, что наиболее рациональным способом регулирования структуры и свойств бетонов конструкционного назначения является модифицирование композиционных смесей химическими добавками пластифицирующего действия, а изучение природы механических свойств строительных материалов с позиций механики деформируемого твердого тела (МДТТ) и структурной механики разрушения материалов (СМРМ) [17–25] вызывает настоятельную необходимость широкого внедрения в исследовательскую практику при разработке и создании материалов новых научных принципов комплексной оценки силовых, деформационных и энергетических критериев конструкционной прочности с получением феноменологических математических моделей этих свойств.

В табл. 1 и 2 приведены экспериментально полученные численные значения изменения длительной прочности  $R_{сж}$  и  $R_{ри}$  и средней скорости  $\bar{V}_{R_{ри}}$  и  $\bar{V}_{R_{сж}}$  изменения прочности сравниваемых серий бетона в диапазоне времени после пропаривания образцов до 18 лет (6580 суток). Это и являлось целью и задачей нашего исследования по изучению характера изменения длительной прочности модифицированных и немодифицированных структур цементных бетонов, полученных при механических испытаниях опытных образцов сравниваемых серий и испытанных в разные сроки во временном диапазоне 18 лет.

Т а б л и ц а 1

Значения характеристик прочности  $R$  и изменения их средней скорости  $\bar{V}$   
в контрольные сроки для образцов бетона  
на старооскольском портландцементе М500 – Д0

Серия образцов	Зависимости	Концентрация ПДО-М, % от массы цемента	Возраст бетона, сут.			
			1	28	90	6580
1	$R_{ри} = f(\tau)$ , МПа	–	2,94	5,28	6,48	10,0
2		1,0	3,44	5,86	4,96	10,3
3		2,0	3,92	6,10	3,92	10,3
1	$\bar{V}_{R_{ри}} = f(\tau)$ , МПа/сут	–	2,94	0,087	0,019	0,00054
2		1,0	3,44	0,090	- 0,014	0,00082
3		2,0	3,92	0,081	- 0,035	0,00098
1	$R_{сж} = f(\tau)$ , МПа	–	16,4	29,3	40,1	73,6
2		1,0	16,2	33,4	36,1	77,4
3		2,0	18,1	40,3	37,0	66,4
1	$\bar{V}_{R_{сж}} = f(\tau)$ , МПа/сут	–	16,4	0,478	0,174	0,0052
2		1,0	16,2	0,637	0,044	0,0064
3		2,0	18,1	0,815	- 0,053	0,0045

Из анализа численных значений изменения прочности  $R_{ри}$  и  $R_{сж}$  модифицированных и немодифицированных структур сравниваемых серий опытных образцов цементного бетона (табл. 1) следует прежде всего отметить, что применение добавки ПДО-М приводит к повышению прочности  $R_{ри}$  в односуточном возрасте на 33,3 % относительно контрольного состава, тогда как  $R_{сж}$  в этом возрасте возрастает только на 10,4 %. Что касается характера изменения 18-летней прочности  $R_{ри}$  и  $R_{сж}$  контрольных образцов относительно прочности  $R_{ри}$  и  $R_{сж}$  проектного возраста, то следует отметить увеличение параметров этих механических свойств соответственно на 89,4 % и в 2,51 раза. Относительно рабочих образцов с добавкой ПДО-М это

увеличение для  $R_{\text{ри}}$  составляло в пределах 68,8–75,8 %, а для  $R_{\text{сж}}$  соответственно – на 64,8 % и в 2,32 раза. При этом большие значения увеличения прочности соответствуют однопроцентной дозировке добавки ПДО-М.

Т а б л и ц а 2

Значения прочностных характеристик  $R$  и изменения их средней скорости  $\bar{V}$  в контрольные сроки для образцов бетона на вольском портландцементе М500 – Д20

Серия образцов	Зависимости	Концентрация ПДО-М, % от массы цемента	Возраст бетона, сут			
			1	28	90	6580
1	$R_{\text{ри}} = f(\tau)$ , МПа	–	4,11	5,56	6,17	9,81
2		1,0	3,92	6,93	7,22	10,4
3		2,0	4,52	6,93	5,56	11,83
1	$\bar{V}_{R_{\text{ри}}} = f(\tau)$ , МПа/сут.	–	4,11	0,054	0,0098	0,00048
2		1,0	3,92	0,111	0,0047	0,00049
3		2,0	4,52	0,089	- 0,022	0,00097
1	$R_{\text{сж}} = f(\tau)$ , МПа	–	17,7	38,1	45,2	43,2
2		1,0	25,1	44,1	49,8	82,6
3		2,0	22,4	43,0	48,3	64,8
1	$\bar{V}_{R_{\text{сж}}} = f(\tau)$ , МПа/сут.	–	17,7	0,756	0,114	- 0,00031
2		1,0	25,1	0,704	0,092	0,0051
3		2,0	22,4	0,763	0,085	0,0025

Из анализа и сравнения численных значений прочности  $R_{\text{ри}}$  и  $R_{\text{сж}}$  (см. табл. 1 и 2) следует прежде всего отметить, что образцы бетона, полученные на основе вольского портландцемента, то есть цемента с 20 %-й минеральной добавкой, показали заметное повышение прочности  $R_{\text{ри}}$  и  $R_{\text{сж}}$  в начальные сроки твердения, то есть в возрасте одних и двадцати восьми суток как на контрольных образцах серии 1, так и на образцах серий 2 и 3 с добавкой ПДО-М. При этом превышение значений  $R_{\text{ри}}$  как для контрольных, так и для рабочих образцов составляло соответственно приблизительно 40 % и 14–15 % в односуточном возрасте, 5 % и 13–18 % в 28-суточном возрасте. В 90-суточном возрасте сброс прочности  $R_{\text{ри}}$  показали образцы бетона на вольском портландцементе только при дозировке 2 % добавки ПДО-М, тогда как образцы бетона на старооскольском цементе показали сброс прочности  $R_{\text{ри}}$  как при дозировке добавки ПДО-М 1 %, так и при дозировке 2 %.

Относительно характера изменения прочности  $R_{\text{сж}}$  во времени сравниваемых серий образцов следует отметить, что минеральная пуццоланическая добавка в вольском цементе оказывала заметное влияние как на величину упрочнения, так и на характер изменения  $R_{\text{сж}}$  во времени. Как следует из экспериментальных данных табл. 2, модифицирование структуры цементного камня добавкой ПДО-М вольского цемента с пуццолановой добавкой приводит к увеличению прочности сравниваемых образцов после ТВО примерно на 26–42 %, а в возрасте 18 лет модифицированные образцы показали увеличение  $R_{\text{сж}}$  на 87 и 50 % для образцов серий 2 и 3 соответственно относительно проектного возраста, тогда как для контрольного состава это увеличение составляло 13,4 %.

Из сравнения приведенных в табл/ 1 и 2 численных значений  $R_{\text{сж}}$  сравниваемых серий образцов в контрольные сроки следует отметить, что по абсолютной величине



наибольшие значения  $R_{сж}$  показали модифицированные образцы бетона на основе вольского цемента, за исключением контрольного состава в возрасте 18 лет.

Математическая обработка экспериментальных данных, представленных в табл. 1 и 2, позволила получить феноменологическое математическое описание процессов структурообразования и твердения сравниваемых серий образцов в возрасте 6580 суток (18 лет).

Общее уравнение

$$R_{сж} = \frac{a + bt^d}{1 + ct^d}; \quad (1)$$

$$R_{рн} = \frac{a + bt^d}{1 + ct^d}, \quad (2)$$

где  $a, b, c, d$  – эмпирические коэффициенты;  $t$  – продолжительность процесса структурообразования, сут.

Конструктивный процесс

$$f_k = \frac{bt^d}{1 + ct^d}. \quad (3)$$

Деструктивный процесс

$$f_d = \frac{a}{1 + ct^d}. \quad (4)$$

Скорость конструктивного процесса

$$v_k = \frac{df_k}{dt} = \frac{bdt^{d-1}(1 + ct^d) - cdt^{d-1}bt^d}{(1 + ct^d)^2}. \quad (5)$$

Скорость деструктивного процесса

$$v_d = \frac{df_d}{dt} = \frac{-acdt^{d-1}}{(1 + ct^d)^2}. \quad (6)$$

Отношение скоростей

$$\frac{v_k}{v_d} = \frac{bdt^{d-1}(1 + ct^d) - cdt^{d-1}bt^d}{acdt^{d-1}}. \quad (7)$$

Значения эмпирических коэффициентов для зависимостей (1) – (7) приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Значения эмпирических коэффициентов

№ состава	Значения эмпирических коэффициентов			
	$a$	$b$	$c$	$d$
1	2	3	4	5
<b>Цемент вольский М500 Д20</b>				
Предел прочности при сжатии				
1	17,65	0,06	0,0014	2,34
2	- 14,28	44,59	0,20	0,14
3	- 21,72	62,83	0,83	0,25

1	2	3	4	5
Предел прочности при изгибе				
1	2,19	2,43	0,12	0,19
2	- 3,96	10,90	0,75	0,17
3	4,29	0,57	0,0032	0,30
<b>Цемент старооскольский М500 Д0</b>				
Предел прочности при сжатии				
1	14,47	2,45	0,03	0,68
2	- 0,40	18,01	0,05	0,20
3	- 52,48	78,10	0,36	0,09
Предел прочности при изгибе				
1	1,91	1,40	0,13	0,46
2	2,32	1,37	0,014	0,21
3	4,53	0,0086	0,0002	0,77

Обработка полученных в наших опытах экспериментальных данных с использованием программных компьютерных математических методов позволяет получать более строгие феноменологические модели механических свойств, которые могут быть положены в основу рецептурно-технологической оптимизации структуры и прогнозирования длительной конструкционной прочности цементных гетерогенных дисперсных систем и закономерностей процессов их структурообразования и твердения.

#### Список литературы

1. Мчедлов-Петросян, О.П. Поздние стадии гидратации цемента / О.П. Мчедлов-Петросян, В.Л. Чернявский, А.Г. Ольгинский // Цемент. – 1982. – №9. – С. 15–17.
2. О структуре и прочности бетона, подвергнутого пропариванию / С.А. Миронов, Л.А. Малинина, О.Е. Королева, В.А. Федоров // Структура, прочность и деформации бетонов. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 217–226.
3. Рост прочности бетона при пропаривании и последующем твердении / С.А. Миронов [и др.]. – М.: Стройиздат, 1973. – 95 с.
4. Гениев, Г.А. Практический метод расчета длительной прочности бетона / Г.А. Гениев // Бетон и железобетон. – 1995. – № 4. – С. 25–27.
5. Максимова, И.Н. О кинетических зависимостях процессов структурообразования и твердения цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4 (33). – С. 29–35.
6. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1998. – 768 с.
7. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М.: АСВ, 2006. – 368 с.
8. Тараканов, О.В. Бетоны с модифицирующими добавками на основе вторичного сырья / О.В. Тараканов. – Пенза: ПГУАС, 2004. – 564 с.
9. Структурообразование и разрушение цементных бетонов / В.В. Бабков, В.Н. Мохов, С.М. Капитонов, П.Г. Комохов. – Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. – 376 с.
10. Калашников, В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов / В.И. Калашников // Технология бетонов. – 2007. – №5. – С. 8–10; №6. – С. 8–11; 2008. – №1. – С. 22–26.
11. Каприелов, С.С. Влияние состава органоминеральных модификаторов серии «МБ» на их эффективность / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. – 2001. – №5. – С. 11–15.

12. Несветаев, Г.В. Эффективность применения суперпластификаторов в бетонах / Г.В. Несветаев // *Строительные материалы*. – 2006 – № 10. – С. 23–25.
13. Структура, деформативность, прочность и критерии разрушения цементных композитов / Н.И. Макридин [и др.]; под ред. В.И. Соломатова. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2001. – 280 с.
14. Макридин, Н.И. Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов / Н.И. Макридин, Е.В. Королев, И.Н. Максимова. – М.: МГСУ, 2013. – 152 с.
15. Прочность и параметры разрушения цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.П. Скачков. – Саранск: Издательство Мордовского университета, 2015. – 360 с.
16. Структура и конструкционная прочность цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.П. Скачков. – М.: Издательство АСВ, 2017. – 400 с.
17. Макридин, Н.И. Сравнительный анализ механического поведения горных пород на диаграмме нагружения / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Е.А. Тамбовцева // *Строительные материалы*. – 2014. – №10. – С. 34–39.
18. Фазовый состав и механические свойства модифицированной гидратационной структуры цементного камня многолетнего твердения / Н.И. Макридин, О.В. Тараканов, И.Н. Максимова, И.А. Суров // *Приволжский научный журнал*. – 2014. – №4 (32). – С. 127-132.
19. Комплексная оценка параметров качества структуры и механики разрушения цементного камня / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Ю.В. Полубарова // *Известия вузов. Строительство*. – 2015. – №3. – С. 14–22.
20. О параметрах механического поведения горных пород с позиций структурной механики разрушения материалов / И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Н.И. Макридин, Н.А. Егина // *Региональная архитектура и строительство*. – 2017. – №2 (31). – С. 25–31.
21. Максимова, И.Н. Структурные изменения песчаных бетонов при кратковременном осевом сжатии / И.Н. Максимова // *Региональная архитектура и строительство*. – 2017. – №3 (32). – С. 29–38.

#### References

1. Mchedlov-Petrosyan, O.P. The late stages of hydration of cement / O.P. Mchedlov-Petrosyan, V.L. Chernyavsky, A.G. Olginsky // *Cement*. – 1982. – №9. – P. 15–17.
2. On the structure and strength of steamed concrete / S.A. Mironov, L.A. Malinina, O.E. Koroleva, V.A. Fedorov // *Structure, strength and deformation of concrete*. – М.: Stroyizdat, 1966. – P. 217–226.
3. Growth of concrete strength during steaming and subsequent hardening / S.A. Mironov [etc.]. – М.: Stroizdat, 1973. – 95 p.
4. Geniev, G.A. Practical method for calculating the long-term strength of concrete / G.A. Geoniev // *Concrete and Reinforced Concrete*. – 1995. – №4. – P. 25–27.
5. Maksimova, I.N. On the kinetic dependencies of the processes of structure formation and hardening of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin // *Regional architecture and engineering*. – 2017. – №4 (33). – P. 29–35.
6. Batrakov, V.G. Modified concrete. Theory and practice / V.G. Batrakov. – 2-nd ed. – М.: Stroizdat, 1998. – 768 p.
7. Bazhenov, Yu.M. Modified high-quality concrete / Yu.M. Bazhenov, V.S. Demyanova, V.I. Kalashnikov. – М.: ACU, 2006. – 368 p.
8. Tarakanov, O.V. Concretes with modifying additives based on secondary raw materials / O.V. Tarakanov. – Penza: PGUAS, 2004. – 564 p.
9. Structurization and destruction of cement concretes / V.V. Babkov, V.N. Mokhov, S.M. Kapitonov, P.G. Komokhov. – Ufa: State Unitary Enterprise «Ufa polygraphcombinat», 2002. – 376 p.

10. Kalashnikov, V.I. Through rational rheology in the future of concrete / V.I. Kalashnikov // *Technology of concrete*. – 2007. – №5. – P. 8–10; №6. – P. 8–11; 2008. – №1. – P. 22–26.
11. Kapriellov, S.S. Influence of the composition of organomineral modifiers of the MB series on their effectiveness / S.S. Kapriellov, A.V. Sheynfeld // *Concrete and reinforced concrete*. – 2001. – №5. – P. 11–15.
12. Nesvetaev, G.V. Efficiency of superplasticizers in concrete application / G.V. Nesvetaev // *Building Materials*. – 2006. – №10. – P. 23–25.
13. Structure, Deformability, Strength and Criteria of Destruction of Cement Composites / N.I. Makridin [et al.]; ed. by V.I. Solomatov. – Saratov: Saratov University Publishing House, 2001. – 280 p.
14. Makridin, N.I. Structural formation and structural strength of cement composites / N.I. Makridin, E.V. Korolev, I.N. Maksimova. – M.: MGSU, 2013. – 152 p.
15. Strength and parameters of destruction of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Yu.P. Skachkov. – Saransk: Publishing house of the Mordovian University, 2015. – 360 p.
16. Maksimova I.N. Structure and structural strength of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Yu.P. Skachkov. – M.: Publisher ASV, 2017. – 400 p.
17. Makridin, N.I. Comparative analysis of the mechanical behavior of rocks on the loading diagram / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, E.A. Tambovtseva // *Building materials*. – 2014. – №10. – P. 34–39.
18. Phase composition and mechanical properties of the modified hydration structure of the cement stone for many years of hardening / N.I. Makridin, O.V. Tarakanov, I.N. Maksimova, I.A. Surov // *Privolzhsky scientific journal*. – 2014. – №4 (32). – P. 127–132.
19. Complex assessment of the quality parameters of the structure and mechanics of destruction of cement stone / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, V.T. Erofeev, Yu.V. Polubarova // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2015. – №3. – P. 14–22.
20. On the parameters of the mechanical behavior of rocks from the standpoint of structural mechanics of material destruction / I.N. Maksimova, V.T. Erofeev, N.I. Makridin, N.A. Egina // *Regional architecture and engineering*. – 2017. – №2 (31). – P. 25–31.
21. Maksimova, I.N. Structural changes of sandy concrete under short-term axial compression / I.N. Maksimova // *Regional architecture and engineering*. – 2017. – №3 (32). – P. 29–38.

УДК 691.32

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

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

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

**Стешин Алексей Владимирович**,  
студент  
E-mail: steshalvl@yandex.ru

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

Россия, 430006, г. Саранск,  
ул. Большевистская, д. 68,  
тел.: (8342)47-71-56; факс: (8342)47-71-56

**Бузулуков Виктор Иванович**,  
доктор технических наук, профессор,  
руководитель сектора “Физическое  
и химическое материаловедение”  
E-mail: buzulukov-v@mail.ru

*Ogarev Mordovia State University*

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

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

**Steshin Alexei Vladimirovich**,  
Student  
E-mail: steshalvl@yandex.ru

*Ogarev Mordovia State University*

Russia, 430006, Saransk, 68,  
Bolshevistskaya St.,  
tel.: +7(8342)47-71-56; fax: +7(8342)47-71-56

**Buzulukov Victor Ivanovich**,  
Doctor of Science, Professor,  
Head of the sector «Physical and chemical  
materialology»  
E-mail: buzulukov-v@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ДОБАВОК И ВОЛОКОН НА УДЕЛЬНУЮ УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

В.Д. Черкасов, В.И. Бузулуков, А.В. Стешин

Приведены данные о влиянии тонкодисперсных добавок и волокон на прочность цементного камня при сжатии и удельную ударную вязкость цементного композита. Установлено, что тонкодисперсная добавка в виде угля повышает удельную ударную вязкость цементного композита в 1,5 раза. Добавление к этой добавке волокон не приводит к увеличению этого показателя. Кальцийсодержащую добавку для повышения удельной ударной вязкости композита необходимо вводить в сочетании с волокнами.

*Ключевые слова: цемент, тонкодисперсная добавка, волокно, гиперпластификатор, удельная ударная вязкость*

## THE IMPACT OF FINELY DISPERSED ADDITIVES AND FIBERS ON THE SPECIFIC IMPACT STRENGTH OF CEMENT COMPOSITES

V.D. Cherkasov, V.I. Buzulukov, A.V. Steshin

Some data on the impact of finely dispersed additives and fibers on the strength of cement stone during compression and the specific impact strength of cement composite is given. It has been established that a finely dispersed additive in the form of coal increases the specific impact strength of a cement composite in 1.5 times. The addition of fibers to this additive does not lead to an increase of this index. A calcium-containing additive must be introduced in combination with fibers to increase the specific impact strength of the composite.

*Keywords: cement, finely dispersed additive, fiber, hyperplasticizer, specific impact strength*

За последние годы в технологии вяжущих и бетонов существенно возрос интерес к особо тонкодисперсным минеральным добавкам. Введение таких добавок в цементы приводит к упрочнению их структуры и создает возможность получения модифицированных вяжущих нового поколения. Проведенные исследования показали, что

тонкодисперсные добавки существенно повышают прочность цементного камня на сжатие, а некоторые из них – и прочность цементного камня при изгибе [1]. Многие конструкции из бетона и железобетона работают под воздействием динамических и сейсмических нагрузок. В связи с этим актуальным является исследование влияния тонкодисперсных добавок на динамические свойства цементных композитов. Для этого были разработаны составы цементных композитов, включающие тонкодисперсные добавки и волокна, а также гиперпластификатор. Количество тонкодисперсных добавок, волокон и гиперпластификатора в этих составах принято в соответствии с ранее проведенными исследованиями [2, 3]. Составы цементных композитов приведены в табл. 1, 2.

Т а б л и ц а 1

Составы цементных композитов

№ состава	Цемент, г	Песок, г	Гиперпластификатор, %	Вода, В/Ц	Уголь, %	Волокно 1, %	Волокно 2, %
0	500	1500	-	0,4	-	-	-
1	500	1500	2	0,4	-	-	-
2	500	1500	2	0,4	1	-	-
3	500	1500	2	0,4	1	1	-
4	500	1500	1	0,4	1	-	2

Т а б л и ц а 2

Составы цементных композитов

№ состава	Цемент, г	Песок, г	Гиперпластификатор, %	Вода, В/Ц	Кальций-содержащая добавка, %	Волокно 1, %	Волокно 2, %
0	500	1500	-	0,4	-	-	-
1	500	1500	2	0,4	-	-	-
2	500	1500	2	0,4	2	-	-
3	500	1500	2	0,4	2	1	-
4	500	1500	1	0,4	2	-	2

Результаты исследований отражены на графиках рис. 1–4. Проведенные исследования показали, что введение угля повышает прочность цементного камня на сжатие на 40 % (см. рис. 1).

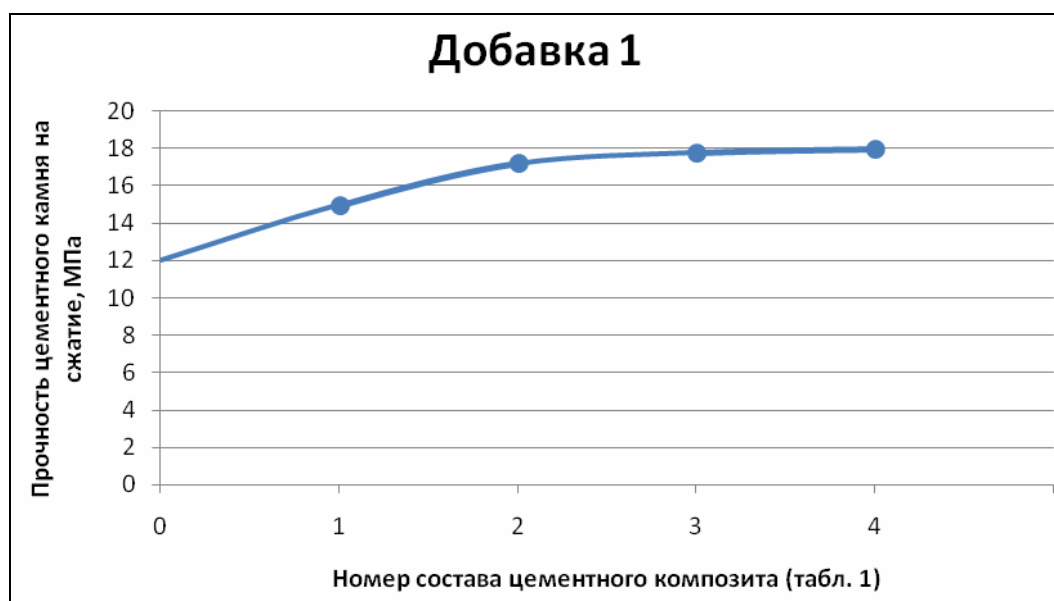


Рис. 1. Влияние тонкодисперсной добавки (уголь) и волокон на прочность цементного камня

Добавление волокон к составу, содержащему уголь, незначительно повышает прочность цементного камня на сжатие (см. рис. 1, составы 3 и 4). При этом она увеличивается с 40 % всего лишь до 50 %. При введении в состав цементного композита угля удельная ударная вязкость цементного композита возрастает на 50 %. Добавление волокон в композит с тонкодисперсной добавкой (уголь) незначительно повышает его удельную ударную вязкость (рис. 2).

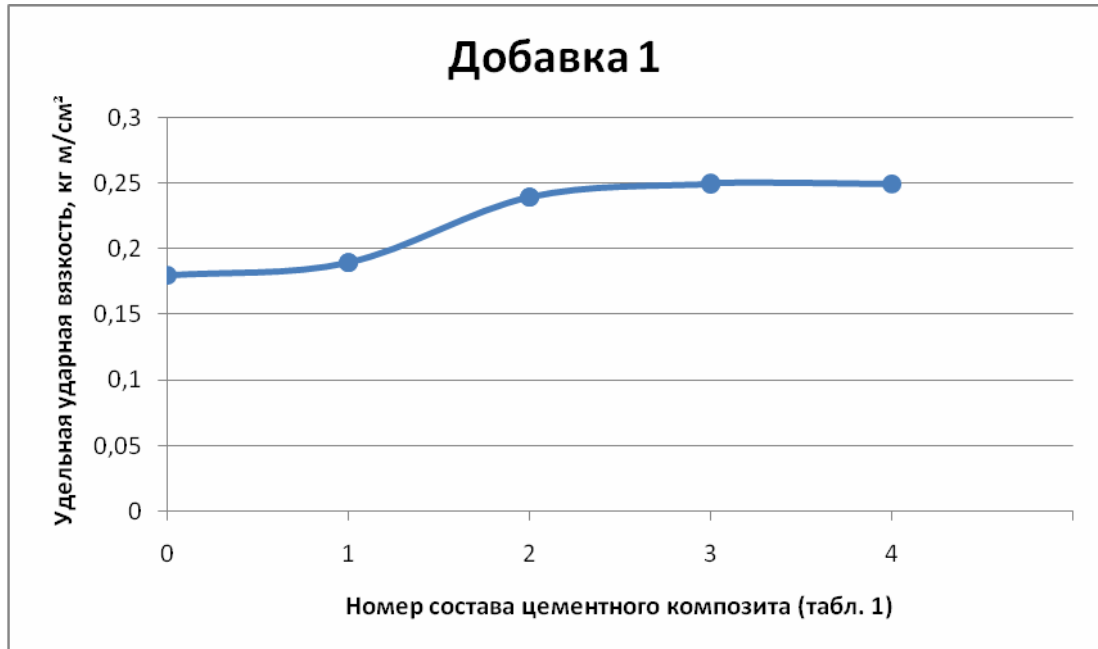


Рис. 2. Влияние тонкодисперсной добавки (уголь) и волокон на удельную ударную вязкость цементного камня

Введение в состав цементного композита кальцийсодержащей добавки приводит к увеличению прочности на сжатие композита на 60 % (см. рис. 3, состав 2). Добавление волокон к этой добавке повышает прочность цементного камня на сжатие почти в два раза (см. рис. 3, составы 3, 4).



Рис. 3. Влияние тонкодисперсной добавки (кальцийсодержащая добавка) и волокон на прочность цементного камня

Исследование влияния кальцийсодержащей добавки на удельную ударную вязкость композита показали, что эта добавка слабо влияет на эту характеристику (см. рис. 4). Добавление волокон к ней привело к увеличению удельной ударной вязкости композита в 1,5 раза.

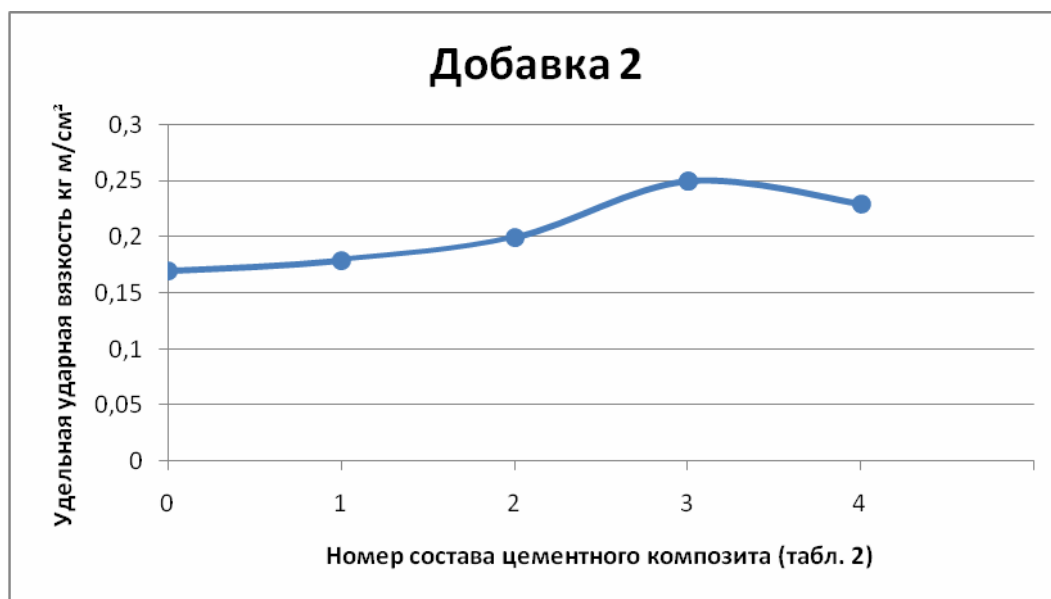


Рис. 4. Влияние тонкодисперсной добавки (кальцийсодержащая добавка) и волокон на удельную ударную вязкость цементного камня

Проведенные исследования показали, что:

- добавки, существенно увеличивающие прочность цементного камня, слабо влияют на удельную ударную вязкость цементного композита. Такие добавки для улучшения динамических свойств цементного композита необходимо вводить в сочетании с волокнами;
- на динамические свойства цементных композитов оказала положительное влияние тонкодисперсная добавка из угля. Эту добавку для увеличения удельной ударной вязкости цементного композита можно вводить в состав без добавления волокон.

#### Список литературы

1. Черкасов, В.Д. Модификация цементного камня комплексной добавкой на основе супергиперпластификатора и углеродного порошка / В.Д. Черкасов, В.И. Бузулуков, Д.А. Пронин // Региональная архитектура и строительство – 2016. – №4 (29). – С.40–49.
2. Черкасов, В.Д. Портландцементы с добавкой модифицированных диатомитов и композиты на их основе: монография / В.Д. Черкасов, В.И. Бузулуков, Д.В. Черкасов. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. – 116 с.
3. Черкасов, В.Д. Цементные композиты с повышенной ударной вязкостью / В.Д. Черкасов, А.В. Стешин // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №4 (33). – С.5–9.

#### References

1. Cherkasov, V.D. Modification of cement stone with a complex additive based on a superhyperplasticizer and a carbon powder / V.D. Cherkasov, V.I. Buzulukov, D.A. Pronin // Regional architecture and engineering. – 2016. – №4 (29). – P. 40–49.
2. Cherkasov, V.D. Portland cement with the addition of modified diatomites and composites based on them: monograph / V.D. Cherkasov, V.I. Buzulukov, D.V. Cherkasov. – Saransk: Mordovia State University Publishing House, 2017. – 116 p.
3. Cherkasov, V.D. Cement composites with increased toughness / V.D. Cherkasov, A.V. Steshin // Regional architecture and engineering. – 2017. – №4 (33). – P. 5–9.



Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарева

Россия, 430006, г. Саранск,  
ул. Большевистская, д. 68,  
тел.: (8342)47-71-56; факс: (8342)47-71-56

**Селяев Владимир Павлович**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Строительные  
конструкции», академик РААСН  
E-mail: ntorm80@mail.ru

**Сорокин Евгений Вячеславович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
E-mail: ntorm80@mail.ru

**Селяев Павел Владимирович**,  
кандидат технических наук, доцент  
E-mail: ntorm80@mail.ru

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

Ogarev Mordovia State University

Russia, 430006, Saransk, 68,  
Bolshevistskaya St.,  
tel.: +7(8342)47-71-56; fax: +7(8342)47-71-56

**Selyaev Vladimir Pavlovich**,  
Doctor of Science, Professor, Head of the  
department «Building designs», Academician  
of the Russian Academy of Architectural and  
Construction Sciences  
E-mail: ntorm80@mail.ru

**Sorokin Evgenii Vyacheslavovich**,  
Candidate of Science, Associate Professor  
E-mail: ntorm80@mail.ru

**Selyaev Pavel Vladimirovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
E-mail: ntorm80@mail.ru

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

## ВЛИЯНИЕ ВИДА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ « $\sigma - \varepsilon$ » НА РАСЧЕТНЫЕ ПРОГИБЫ ПЛАСТИНЫ

В.П. Селяев, Е.В. Сорокин, П.В. Селяев, М.Ф. Алимов

Исследовано влияние вида функциональной зависимости напряжений от деформаций на расчетные значения прогибов квадратной пластины, шарнирно опертой по сторонам. Предложены критерии для оценки применимости аналитических зависимостей « $\sigma - \varepsilon$ ».

*Ключевые слова:* напряжения, деформации, прогибы, зависимость, секущий модуль, касательный модуль

## INFLUENCE OF FUNCTIONAL DEPENDENCE TYPE « $\sigma - \varepsilon$ » ON THE CALCULATED DEFLECTIONS OF A PLATE

V.P. Selyaev, E.V. Sorokin, P.V. Selyaev, M.F. Alimov

The influence of the form of the functional dependence of stresses from deformations on the calculated values of deflections of a square plate hinged on the sides is researched. Criteria for assessing the applicability of the analytical dependence « $\sigma - \varepsilon$ » are proposed.

*Keywords:* stresses, strains, deflections, dependence, secant modulus, tangent modulus

Механические свойства бетона при одноосном напряженном состоянии описываются диаграммой, устанавливающей связь между напряжениями и продольными относительными деформациями сжатого (растянутого) образца при кратковременном действии однократно приложенной нагрузки.

Теоретические зависимости напряжений от деформаций можно классифицировать по ряду критериев.

- По виду аппроксимирующей функции зависимости могут быть классифицированы на: линейные; степенные (Г.Б. Бюльфингера [1], Ф.И. Гарстнера [1], А.Р. Ржаницына, П.А. Лукаша [1]); полиномиальные (Я.В. Столярова [9], И.Н. Попова [8], В.Н. Байкова [6], Сен-Венана [1]); экспоненциальные (Г.В. Мурашкина, В.Г. Мураш-

кина [2, 3], А.А. Прокоповича [10], Л.Е. Янга, Ж.М. Смитжа); тригонометрические (Г.А. Гениева [5]); логарифмические (П.И. Васильева, С.Е. Фрайфельда и В.М. Бондаренко [4]).

• По степени отражения физических представлений о работе материала: на аналитические (внешне описывающие диаграмму деформирования), структурные (основанные на некоторых физических представлениях) и нормативные (установленные на основании обобщения обширного экспериментального материала, накопленного исследователями).

В таблице приведены некоторые виды аналитических зависимостей. Коэффициенты предложенных функций определялись методом минимизации квадратов отклонений от экспериментальной кривой, полученной по результатам испытания стандартных образцов из бетона класса В15 на осевое сжатие. В графическом виде данные зависимости показаны на рис. 1, 2.

Аналитическая интерпретация диаграмм деформирования при кратковременном нагружении бетона

№ п/п	Вид функциональной «σ – ε» зависимости	Математическое представление	Подобранные значения коэффициентов
1	2	3	3
1	Степенные		
1.1	Бюльфингера Г.Б.	$\sigma = A \cdot \varepsilon^k$	$A = 889.55$ МПа, $k = 0.566$
1.2	Параболическая зависимость Ф.И. Герстнера	$\sigma = A_1 \cdot \varepsilon + A_2 \cdot \varepsilon^2$	$A_1 = E_0$ , $A_2 = -5.705 \cdot 10^6$
1.3	Зависимость Ржаницына А.Р., Лукаша П.А.	$\sigma = k_1 \cdot \varepsilon + k_2 \cdot \varepsilon^3$	$k_1 = 20020$ , $k_2 = -1.85 \cdot 10^9$
1.5	Зависимость Сен-Венана	$\sigma = A \times \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_R} \right)^n \right]$	$A = 24.92$ МПа, $n = 2.399$
2	Экспоненциальные		
2.1	Зависимость (1)	$\sigma = a \varepsilon^b \exp \left( b \frac{\varepsilon}{p} \right)$	$a = 889.55$ , $b = 0.566$ , $p = 1.25 \cdot 10^6$
2.2	Зависимость (2)	$\sigma = \varepsilon E_0 \exp \{ -k \varepsilon^n \}$	$k = 9144.21$ , $n = 1.515$
3.	Гиперболические		
3.1	Зависимость Соколовского В.В., Тимошенко С.П.	$\sigma = \frac{s \varepsilon}{\sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon}{t} \right)^2}}$	$s = 25530.09$ , $t = 0.0011$
4.	Логарифмические		
4.1	Уравнение Васильева П.И., Фрайфельда С.Е. и Бондаренко В.М.	$\varepsilon_m = \frac{\sigma \left[ 1 + \eta_k \left( \frac{\sigma}{R_{kt}} \right)^{m_k} \right]}{E_{kt}^0}$	$\eta_k = 0.9136$ , $m_k = 5.636$

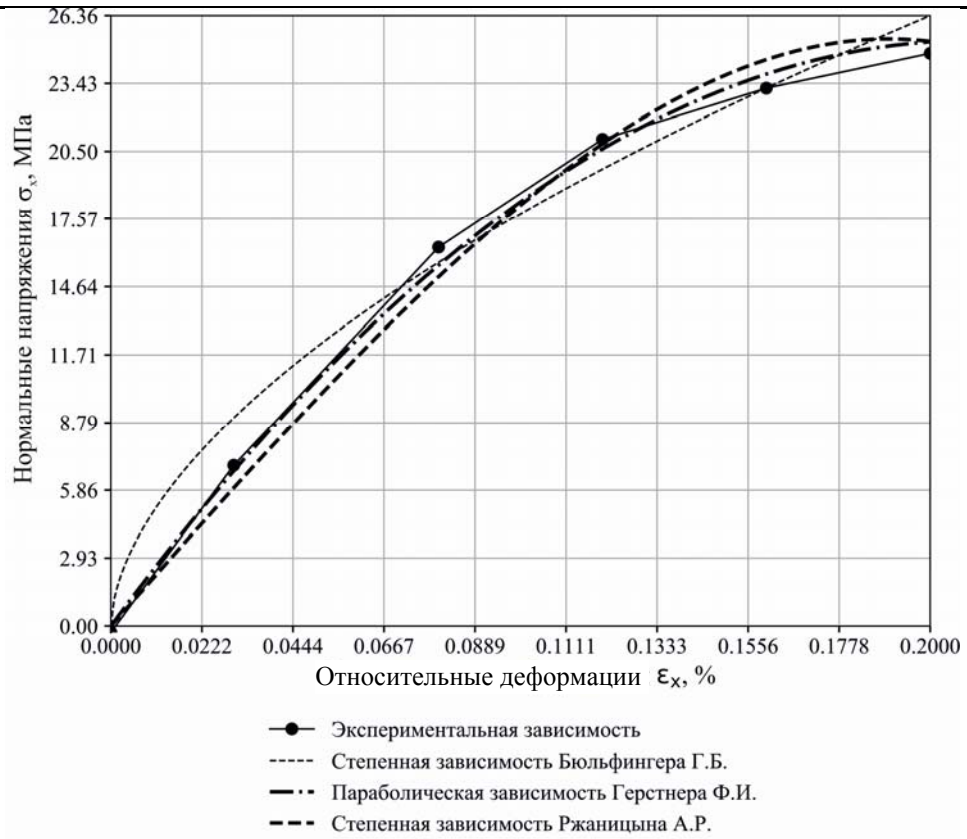


Рис. 1. Отклонение теоретических зависимостей напряжений от деформаций от экспериментальной кривой

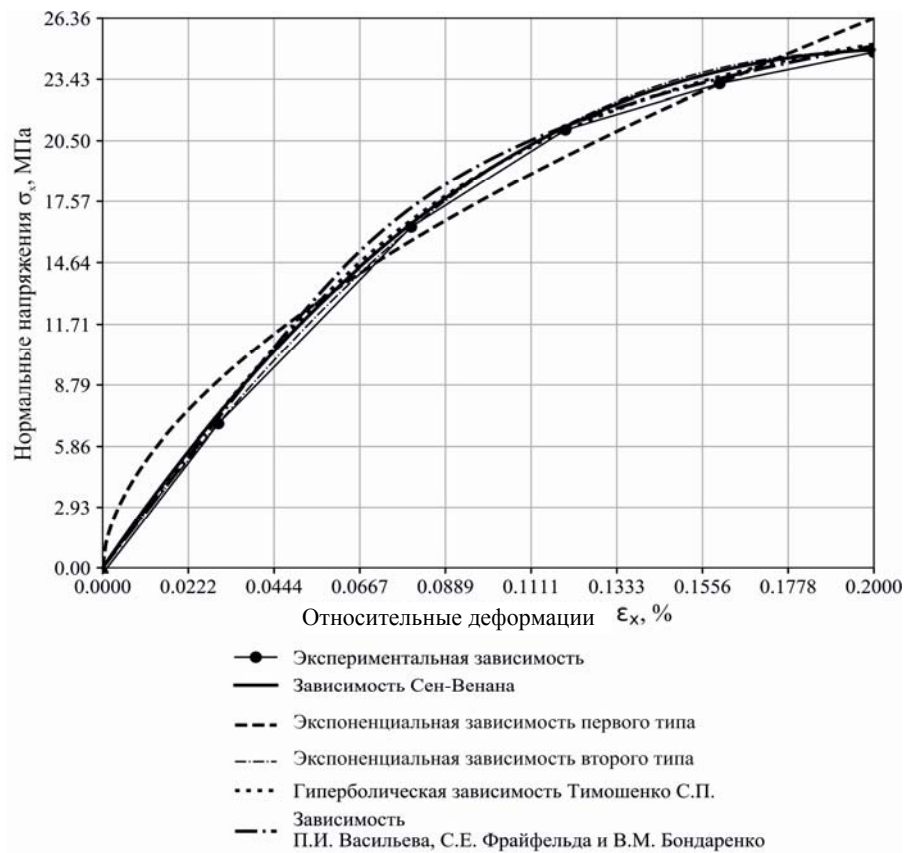


Рис. 2. Отклонение теоретических зависимостей напряжений от деформаций от экспериментальной кривой

Вполне очевидно, что рассматриваемые уравнения с достаточной точностью позволяют оценить связь между напряжениями и деформациями в материале. Расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями находятся в пределах ошибки опыта. Однако дальнейший анализ показал, что не все функциональные зависимости « $\sigma - \varepsilon$ » адекватно отражают работу материала под нагрузкой, в ряде случаев наблюдаются значительные расхождения в теоретическом определении прогибов пластин.

Первое проверенное условие определяет изменения касательного модуля упругости под нагрузкой, который является не чем иным, как первой производной аналитической функции, связывающей напряжения и деформации. Анализ изменения касательного модуля позволяет оценить степень соответствия теоретической зависимости физическим представлениям (рис. 3, 4).

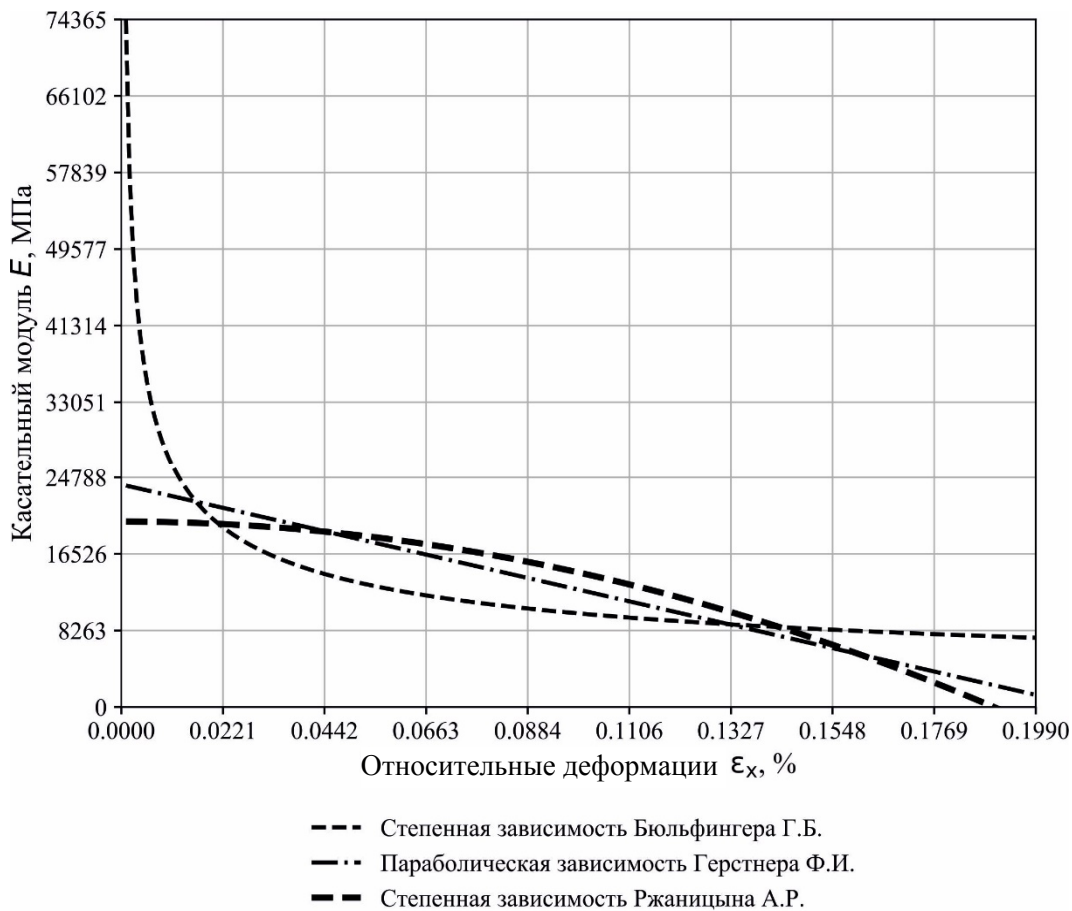


Рис. 3. Зависимость касательного модуля упругости от деформаций

Очевидно, что общий недостаток почти всех функций касательного модуля заключается в том, что они являются монотонно убывающими, тогда как в первоначальный момент времени касательный модуль должен сохранять постоянное значение. Кроме того, степенная зависимость Г.Б. Бюльфингера и экспоненциальная зависимость первого типа (при значении коэффициента  $b < 1$ ) дают существенно завышенные оценки касательного модуля на начальном этапе, что может привести к неточностям при определении прогибов и перемещений конструкций.

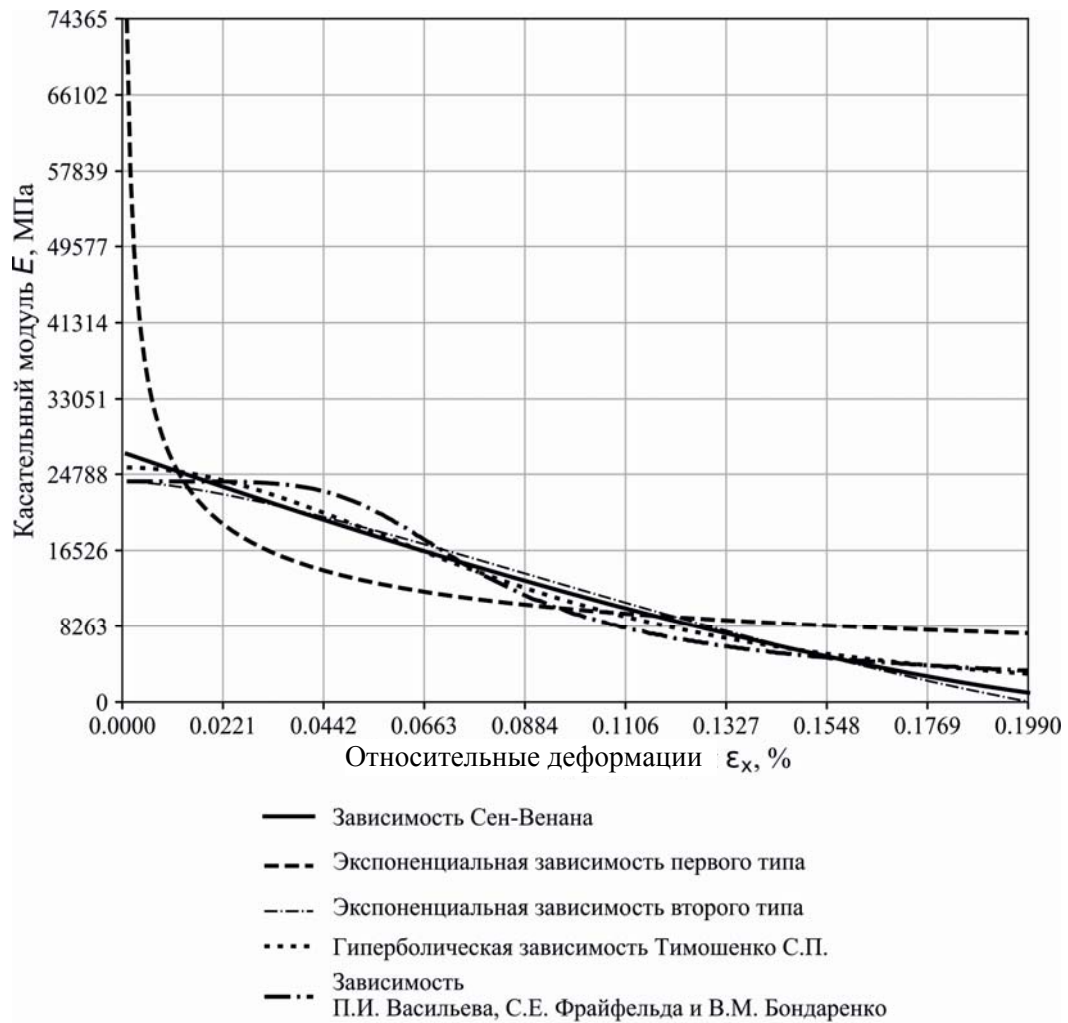


Рис. 4. Зависимость касательного модуля упругости от деформаций

Наиболее точно физическую сущность работы материала отражает уравнение П.И. Васильева, С.Е. Фрайфельда и В.М. Бондаренко. Кривая изменения касательного модуля, построенная на основании данной зависимости, сначала имеет постоянное значение и затем постепенно убывает, асимптотически приближаясь к нулю.

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma \left[ 1 + \eta_k \left( \frac{\sigma}{R_{kt}} \right)^{m_k} \right]}{E_{kt}^0}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_m$  – условно-мгновенные относительные деформации;  $\sigma$  – действующие нормальные напряжения;  $R_{kt}$  – предел кратковременной прочности в расчетный момент времени;  $E_{kt}^0$  – начальный модуль деформаций материала;  $\eta_k, m_k = 5.636$  – параметры нелинейности кратковременно деформируемого материала.

Недостатком уравнения (1) является сложность выражения напряжений через деформации. Бондаренко В. М., Шагин А. Л. [4] предлагают вычислять их по формуле

$$\sigma = A\varepsilon + B\varepsilon^2. \quad (2)$$

Коэффициенты А и В уравнения (2) определяются из условия минимума квадратичных отклонений от диаграмм, экспериментально полученных для бетона различной прочности.

При проведении исследований напряжения определялись методом линейной интерполяции участков графика функции (1).

Для изучения влияния вида функции, описывающей зависимость между напряжениями и деформациями, на результаты расчета прогибов изгибаемого элемента рассмотрим пластину из изотропного материала, шарнирно опертую по сторонам с размерами 2 на 2 метра, с высотой сечения 0.2 м, со следующими характеристика материала:

начальный модуль упругости  $E_0 = 24020$  МПа,  
 коэффициент поперечного расширения  $\nu = 0.2$ ,  
 максимальные относительные деформации материала  $\epsilon_u = 0.003$ ,  
 временное сопротивление материала  $\sigma_u = 25$  МПа,  
 относительные деформации, соответствующие временному сопротивлению,  $\epsilon_\sigma = 0.002$ .  
 Пластина загружена равномерно распределенной нагрузкой.  
 Уравнение изгиба пластинки из нелинейно деформируемого материала имеет вид:

$$\nabla^2 (D_c \nabla^2 W) - \frac{1}{2} L(D_c W) = q(x, y), \quad (3)$$

где

$$L(D_c W) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( D_c \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left( D_c \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) - 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( D_c \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right). \quad (4)$$

Пространственная координата жесткости:

$$D_c(W(x, y)) = \frac{4}{3} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} E_c(\epsilon_i(W)) z^2 dz. \quad (5)$$

Перемещение отдельного элемента пластинки находим из уравнения

$$D_c \left( \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} \right) = q(x, y). \quad (6)$$

При этом деформации отдельного элемента могут быть определены из соотношений:

$$\epsilon_x = -z \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, \quad \epsilon_y = -z \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}, \quad \gamma_{xy} = -2z \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}. \quad (7)$$

Физические соотношения, связывающие деформации и напряжения:

$$\sigma_x = \frac{E(\epsilon_i)}{1-\nu^2} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y), \quad \sigma_y = \frac{E(\epsilon_i)}{1-\nu^2} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x), \quad \tau_{xy} = \frac{E(\epsilon_i)}{2(1-\nu)} \gamma_{xy}. \quad (8)$$

Поставленная задача была решена методом последовательного нагружения. При этом перемещения, необходимые для определения деформаций и напряжений, находились из решения конечно-разностного аналога уравнения (3) при заданных граничных условиях. На каждом этапе нагружения фиксировалась величина максимальных деформаций (7) и соответствующих напряжений (8). Для следующего этапа нагружения, на основании полученных значений и принятой аналитической зависимости, переопределялись нелинейные параметры текущего  $E_c$  и касательного  $E$  модулей, входящих в уравнения (8) и (5).

Для исследования влияния переменной жесткости на работу изгибаемой пластины построены графики зависимости нормальных напряжений от деформаций пластины при различных законах изменения секущего и касательного модулей упругости материала.

Очевидно, что все теоретические кривые с достаточной точностью соответствуют экспериментальной кривой деформирования.

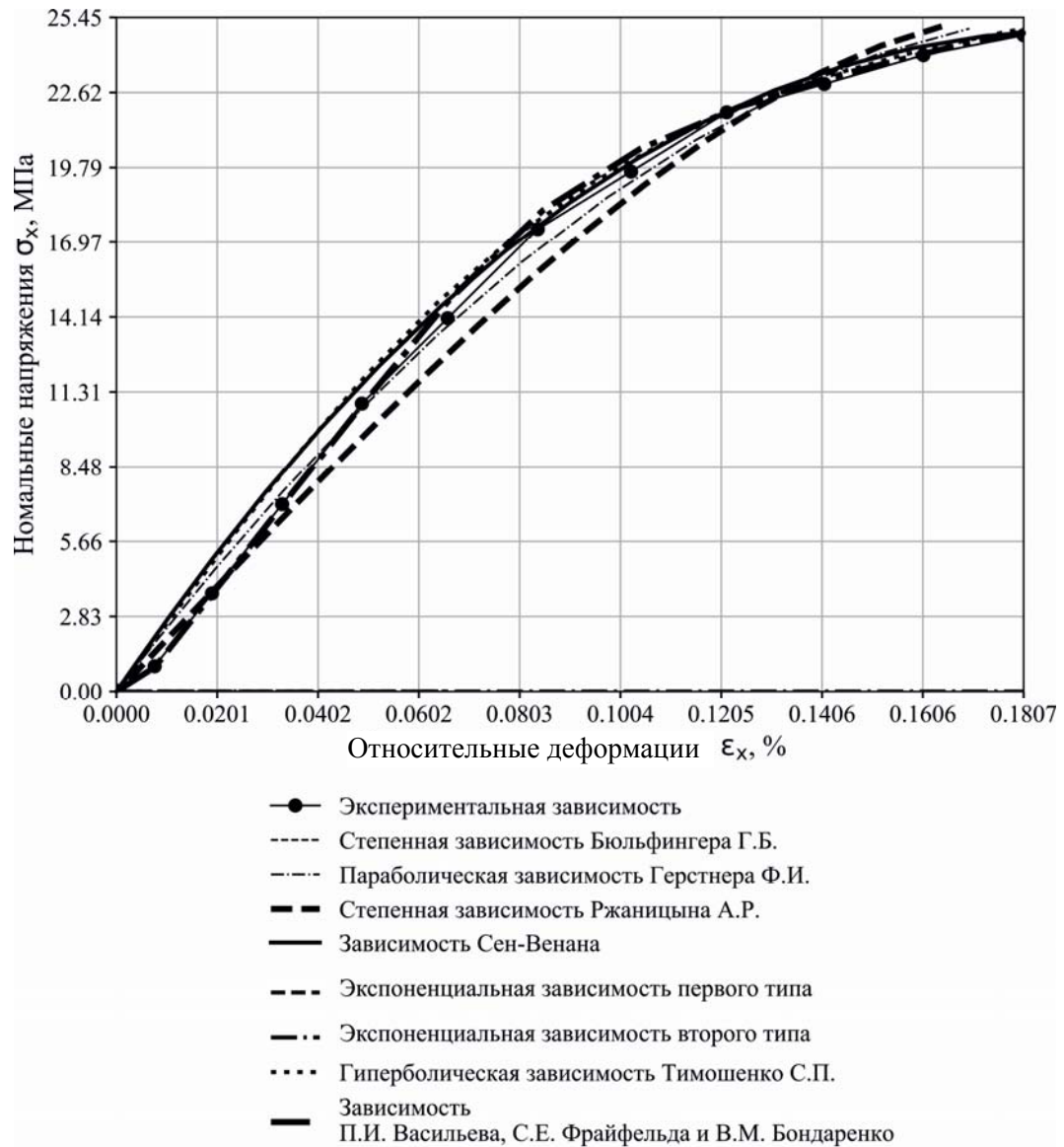


Рис. 5. Расчетные кривые зависимости напряжений от деформаций

Однако если рассматривать кривую зависимости максимальных прогибов плиты от величины нагрузки (рис. 6), то заметны большие расхождения значений прогибов, определенных при анализируемых экспоненциальной первого типа и Г.Б. Бюльфингера зависимостях, от экспериментальных данных. Зависимости Сен-Венана и С.П. Тимошенко также дают несколько заниженные значения прогибов, так как касательные модули упругости, определенные по данным диаграммам, превосходят экспериментальное значение на начальном участке.

Экспоненциальная зависимость А.А. Прокоповича хорошо сходится с экспериментальной зависимостью на начальном этапе. При дальнейшем увеличении нагрузки дает значительные расхождения.

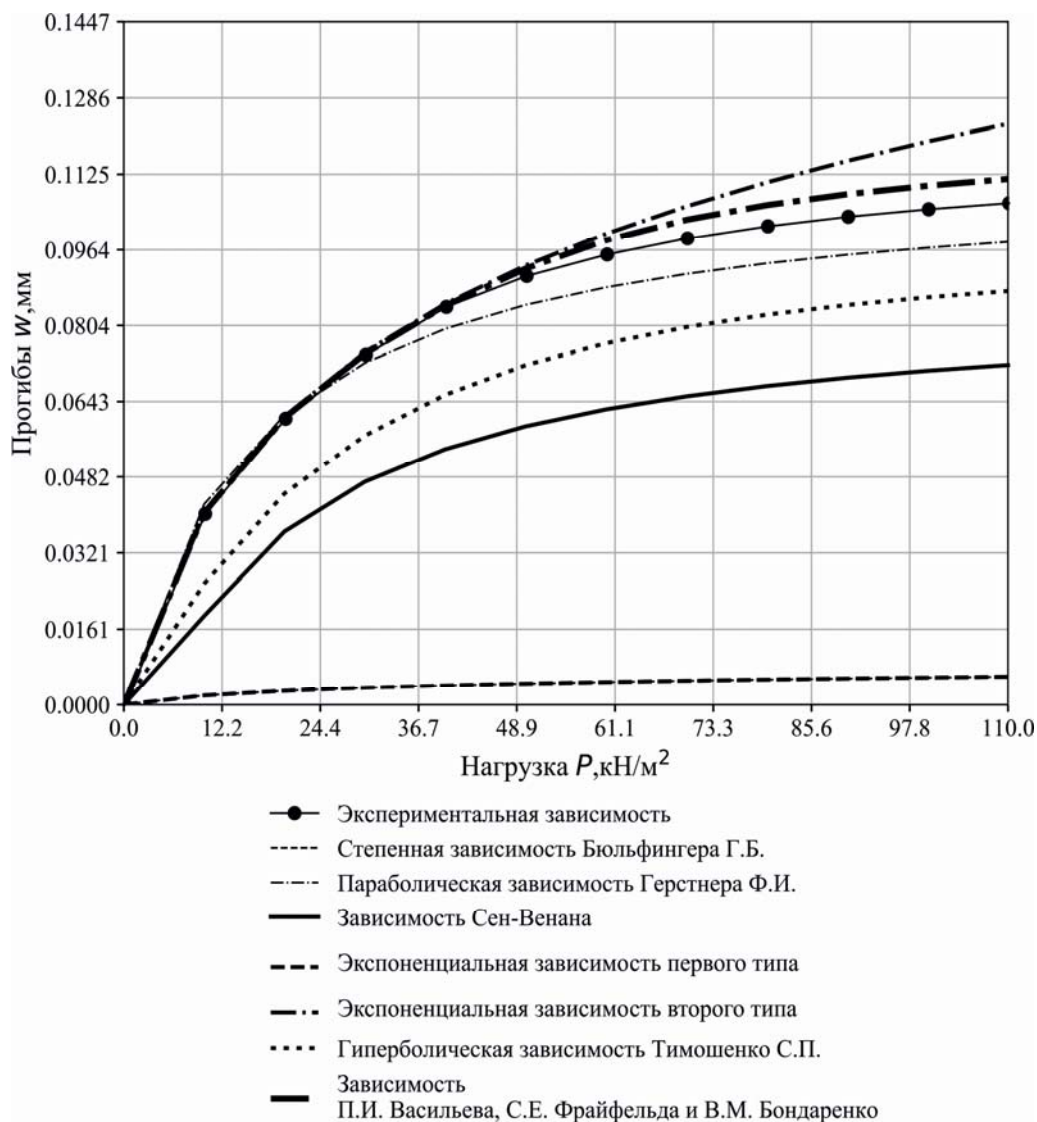


Рис. 6. Расчетные кривые зависимости максимального прогиба от величины нагрузки

Зависимости Ф.И. Герстнера и П.И. Васильева, С.Е. Фрайфельда, В.М. Бондаренко дают наиболее близкие оценки прогибов плиты. Вторая зависимость дает более точные значения, но параболическая зависимость имеет существенное преимущество при определении коэффициентов, входящих в уравнение.

#### В ы в о д ы

Для аналитического описания диаграммы деформирования бетона предложено множество различных зависимостей: степенных, параболических, гиперболических, экспоненциальных, тригонометрических и более сложных. Анализом установлено, что при выборе аналитического выражения для описания функциональной зависимости « $\sigma - \varepsilon$ » необходимо, чтобы выполнялись следующие критерии:

- зависимость должна быть непрерывной дифференцируемой функцией на рассматриваемом участке;
- теоретическая зависимость должна отражать физические представления о работе нелинейно деформируемого тела;
- параметры « $\sigma - \varepsilon$ » функциональной зависимости должны подбираться с учетом нормируемых упругопластических характеристик материала;
- первая производная  $d\sigma/d\varepsilon$  в точке экстремума ( $\varepsilon = \varepsilon_{bu}$ ,  $\sigma = \sigma_{bu}$ ) должна быть равна нулю; при  $\varepsilon \rightarrow 0$   $d\sigma/d\varepsilon \rightarrow E_0$ .



## Список литературы

1. Лукаш, П.А. Основы нелинейной строительной механики / П.А. Лукаш. – М.: Стройиздат, 1978. – 202 с.
2. Столяров, Я.В. Введение в теорию железобетона / Я.В. Столяров. – М.-Л.: Гос. изд-во строит. лит., 1941. – 447 с.
3. Попов, Н.Н. Расчет конструкций специальных сооружений / Н.Н. Попов, Б.С. Расторгуев. – М.: Стройиздат, 1990. – 208 с.
4. Байков, В.Н. Построение зависимости между напряжениями и деформациями сжатого бетона по системе нормируемых показателей / В.Н. Байков, С.В. Горбатов, З.А. Димитров // Изв. вузов. Сер.: Стр-во и архитектура. – 1977. – № 6. – С. 15–18.
5. Мурашкин, Г.В. Моделирование диаграммы деформирования бетона и схемы НДС / Г.В., Мурашкин В.Г. Мурашкин // Изв. вузов. Сер.: Стр-во и архитектура. – 1997. – № 10. – С. 4–6.
6. Мурашкин, Г.В. Тяжело нагруженные полы из бетона, твердеющего под давлением / Г.В. Мурашкин, А.Н. Алешин, К.И. Гимадетдинов // Изв. вузов. Строительство. – 1995, – № 12. – С. 136–139.
7. Прокопович, А.Д. К определению зависимости « $\sigma$ - $\varepsilon$ » с ниспадающим участком для бетона при сжатии железобетонных конструкций / А.Д. Прокопович. – Куйбышев: Куйбышев. гос. ун-т. им. А.И. Микояна, 1979. – С. 33 – 39.
8. Smith, G.M. Ultimate flexural analysis based on Stress – Strain curves of cylinders / G.M. Smith, L.E. Yound // Journal of the American Concrete Institute. – 1956. – Vol. 28(53), part.1. – N6. – P. 597 – 609.
9. Гениев, Г.А. Некоторые задачи расчета стержней при общей нелинейной зависимости напряжений и деформаций / Г.А. Гениев // Сб. статей ЦНИИПС. – М.: Госстройиздат, 1954. – Вып. 13.
10. Бондаренко, В.М. Расчет эффективных многокомпонентных конструкций / В.М. Бондаренко, А.Л. Шагин. – М.: Стройиздат, 1987. – 175 с.

## References

1. Lucas, P.A. The foundations of nonlinear structural mechanics / P.A. Lucas. – M: Stroyizdat, 1978. – 202 p.
2. Stolyarov, Y.V. Introduction to the theory of reinforced concrete / Y.V. Stolyarov. – M.-L.: GOS. Publishing house building. lit., 1941. – 447 p.
3. Popov, N.N. Structural analysis of special structures / N.N. Popov, B.S. Rastorguev. – M: Stroyizdat, 1990. – 208 p.
4. Baykov, V.N. Construction of the dependence between stresses and deformation of compressed concrete according to the system of indicators / V.N. Baykov, S.V. Gorbатов, Z.A. Dimitrov // News of universities. Ser.: The construction and architecture. – 1977. – No. 6. – P. 15–18.
5. Murashkin, G.V. Modeling of the deformation diagram of concrete and the scheme of the stress-strain state / G.V. Murashkin, V.G. Murashkin // News of universities. Ser.: The construction and architecture. – 1997. – No. 10. – P. 4–6.
6. Murashkin, G.V. Heavily loaded floors made of concrete hardening under pressure / G.V. Murashkin, A.N. Aleshin, K.I. Gimazetdinov // News of universities. Construction. – 1995. – No 12. – P. 136–139.
7. Prokopovich, A.D. To the determination of the dependence of « $\sigma$ - $\varepsilon$ » from the drop-down plot for concrete in compression concrete structures / A.D. Prokopovich. – Kuibyshev: Kuibyshev. GOS. UN-t im. A. I. Mikoyan, 1979. – P. 33–39.
8. Smith, G.M. Ultimate flexural analysis based on Stress – Strain curves of cylinders / G.M. Smith, L.E. Yound // Journal of the American Concrete Institute. – 1956. – Vol. 28(53), part.1. – N6. – P. 597 – 609.
9. Geniev, G.A. Some problems of calculation members for General nonlinear dependence of stress and strain / G.A. Geniev // Collection of articles, CSRIIS. – M.: Gosstroizdat, 1954. – Vol. 13.
10. Bondarenko, V.M. Calculation of effective multicomponent structures / V.M. Bondarenko, A.L. Shahin. – M.: Stroyizdat, 1987. – 175 p.

УДК 666.6

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

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

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

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

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

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

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

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

**Snadin Evgeny Valerevich**,  
Postgraduate  
E-mail: techbeton@pguas.ru

## ПСЕВДОРАЗЖИЖЕНИЕ СЫРЬЕВЫХ МАСС В ТЕХНОЛОГИИ ЯЧЕИСТОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ СИЛИЦИТОВ

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

Исследованы особенности процессов тиксотропии керамических шликерных масс на основе природных силицитов. Оптимизация процесса вибровспучивания и подбор химических модификаторов позволили достичь цели минимизации водотвердого отношения сырьевой массы, т.е. получить предельно наполненные, но при этом хорошо вспучиваемые суспензии. Это существенно улучшило качество ячеистой структуры, повысило степень воспроизводимости требуемого технического результата и прочностные показатели керамического материала.

*Ключевые слова: керамика, ячеистая структура, природные силициты, реология минеральных суспензий, псевдообразжжение*

## FLUIDIZATION OF RAW MATERIALS IN THE TECHNOLOGY OF CELLULAR CERAMICS BASED ON NATURAL SILICIDES

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

The features of the flow of thixotropy processes of ceramic masses based on natural silicites are investigated. Optimization of vibration process and correct selection of chemical modifiers allowed to achieve the goal of minimizing the water-solid ratio of the raw material mass. It significantly improved the quality of the formed cellular structure, increased the degree of reproducibility of the required technical result and strength parameters of the ceramic material.

*Keywords: ceramics, natural silicites, fluidization, cellular structure, rheology of mineral suspensions*

Резервом улучшения качества пористой теплоизоляционной керамики является снижение капиллярной микропористости, создаваемой в материале межпоровых перегородок в процессе высушивания. Применение шликеров с повышенными значениями водотвердого отношения приводит к образованию разветвленной сети капиллярных каналов и уменьшению площади сечения несущих элементов макроструктуры. Известно, что замена в структуре материала равных объемов капиллярной пористости на ячеистую пористость сопровождается повышением его прочности в 1,3...1,5 раза [1].

Влияние капиллярной пористости, выраженное через водотвердое отношение, на прочность ячеистого материала было установлено ранее для пенокерамобетонов [2]:

$$V_{\text{возд}} = \left( 1 - \frac{R^{\text{пр}} \cdot m \cdot \left( \frac{B}{T} \right)^n}{0,7 \cdot R_{\text{matrix}}} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{возд}}$  – ячеистая пористость, отн.ед.;  $R_{\text{matrix}}$  – прочность матричного вещества на сжатие, МПа;  $R^{\text{пр}}$  – прогнозируемая прочность, МПа;  $B/T$  – отношение массы воды затворения к массе минерального порошка (капиллярная пористость);  $n$  и  $m$  – числовые коэффициенты.

Оптимизацию ячеистой структуры керамики можно осуществить следующими технологическими факторами:

- достижением оптимального соответствия между реотехнологическими показателями шликера и скоростью формирования газовой фазы;
- снижением водотвердого отношения до минимальных значений, обеспечивающих вспучивание массы;
- созданием условий для уплотнения и обжата материала межпоровых перегородок.

При неизменных величинах дисперсности минеральных частиц и водотвердого отношения регулировку подвижности сырьевой смеси целесообразно производить способом введения разжижающих электролитов, применением внешнего механического воздействия, а также их комбинированием.

Дополнительную корректировку реологических свойств можно осуществить подбором типа газообразователя, формирующего при разложении дополнительное количество жидкой фазы или обладающего поверхностно-активными свойствами. Исходя из этого, при разработке составов на основе природных силицитов вспенивание шликера осуществляли перекисью водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), а для оптимизации кинетики газовыделения использовали тонкомолотый уголь [3].

Важным фактором, способствующим повышению механических показателей ячеистой керамики, является характеристика поверхности пор, определяемая параметрами припорового слоя. В сравнении с основным материалом межпоровой перегородки такой слой может быть рыхлым, равноплотным (гладкая поверхность) или более плотным (глянцевая поверхность). В последнем случае он дополнительно упрочняет систему несущего каркаса ячеистого материала за счет эффекта обжата перегородок.

Шликерные массы в технологиях ячеистой керамики представляют собой водные суспензии с высокой концентрацией частиц твердой фазы. Реотехнологические показатели смесей формируются в зависимости от объемного содержания твердой фазы. Влияние степени наполнения водной фазы на вязкость формируемой суспензии определяется зависимостью

$$\mu_{\text{сусп}} = \mu_{\text{вод}} \cdot (1 + k \cdot \varphi), \quad (2)$$

где  $\varphi$  – объемное содержание твердой фазы;  $k$  – числовой коэффициент.

Оценку величины коэффициента  $k$  производят с учетом удельной поверхности ( $S$ ) и коэффициента формы минеральных частиц ( $0,42$  (пластинчатая)  $\leq k_{\text{ф}} \leq 0,85$  (сферическая)), а также толщины граничного слоя ( $\Omega$ ).

В работе [4] предлагается следующий вид формулы (2):

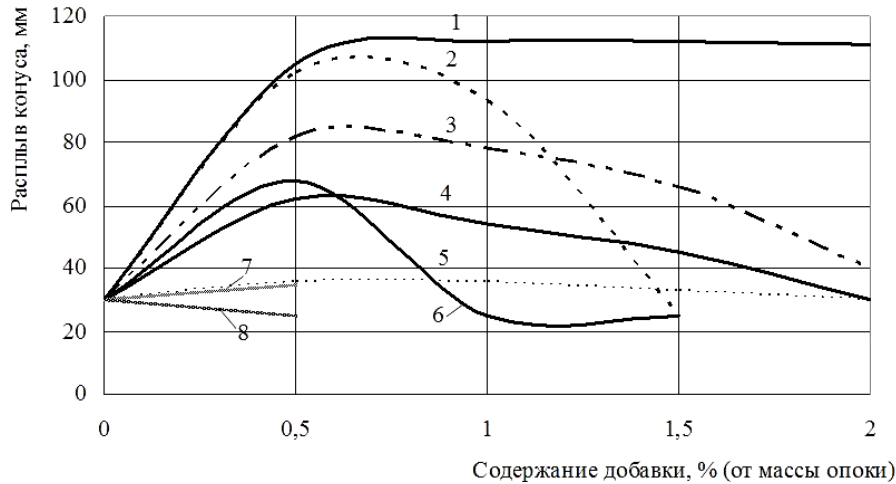
$$\mu_{\text{в}} = \mu_{\text{сусп}} \cdot \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{\varphi \cdot (1 + \Omega \cdot S)}{k_{\text{ф}}}} \right), \quad (3)$$

где  $S$  – удельная поверхность,  $\text{м}^{-1}$ ,  $\varphi$  – объемное содержание твердой фазы, отн.ед.;  
 $\Omega$  – толщина граничного слоя, м.

Шликерную массу для оценки реотехнологических показателей изготавливали путем совмещения порошка опоки и водного раствора, содержащего добавку разжижающего компонента (водорастворимые соли щелочных металлов). Количественную оценку величины возникающего эффекта определяли с использованием видоизмененного вискозиметра Суттарда.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости подвижности шликера до и после механического воздействия ( $B/T=\text{const}$ ).

а



б

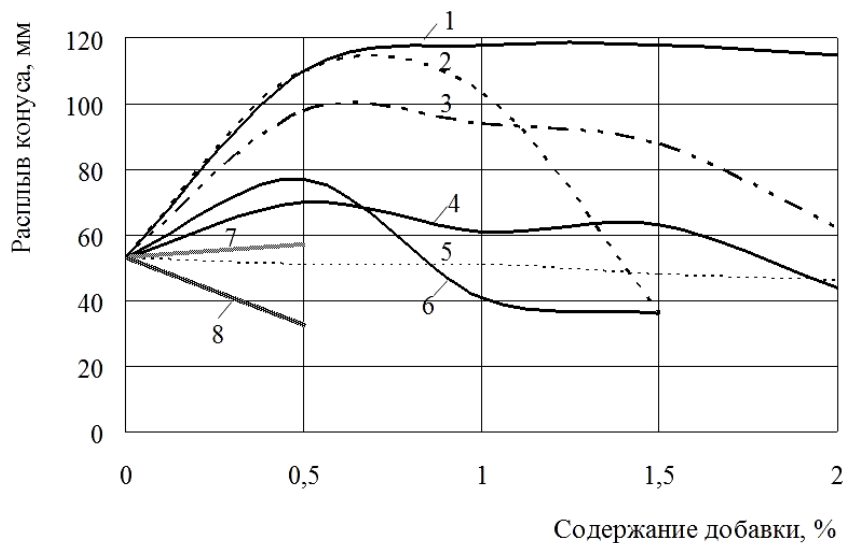


Рис. 1. Влияние добавки на подвижность шликера:

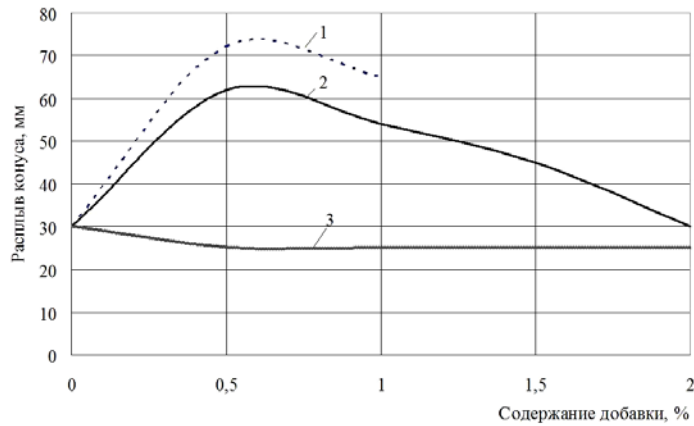
а – первоначальный распыл; б – после механического воздействия;

1 –  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ; 2 –  $\text{NaOH}$ ; 3 –  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ; 4 –  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; 5 –  $\text{NaF}$ ; 6 –  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ; 7 –  $\text{Na}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ ; 8 –  $\text{NaCl}$

Анализ данных показывает, что увеличение содержания добавок  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  в количестве до 1 % значительно повышает подвижность водоопочной суспензии.

Влияние типа катиона разжижителя на подвижность водоопочной суспензии характеризуют кривые на рис. 2.

а



б

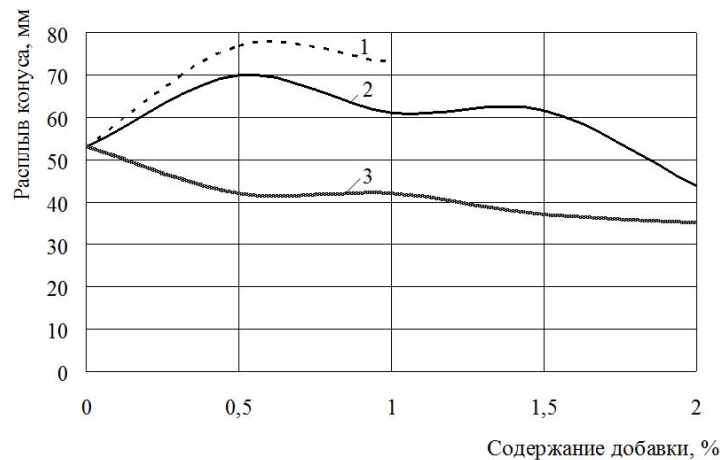


Рис. 2. Влияние вида катиона добавки на подвижность шликера:  
а – первоначальный расплав; б – после механического воздействия;  
1 –  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ; 2 –  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; 3 –  $\text{K}_2\text{CO}_3$

Дальнейшее исследование было направлено на разработку технологических принципов получения высокопористых керамических материалов на основе предельно наполненных шликеров, обратимо переводимых в текучее состояние способом тиксотропного разжижения, усиленного введением в систему добавок электролитов.

Легкая керамика плотностью  $400 \dots 500 \text{ кг/м}^3$  с качественной ячеистой структурой и при хорошей воспроизводимости процесса получения была создана при оптимальных режимах псевдоразжижения: частота  $1200 \dots 1500 \text{ мин}^{-1}$ , амплитуда  $3 \dots 5 \text{ мм}$ , продолжительность – 3 мин. При этом была достигнута цель минимизации водотвердого отношения в шликерной смеси ( $V/T=0,35 \dots 0,40$ ). Через 1 час после окончания процесса вспенивания сырец извлекали из форм и выдерживали перед обжигом в комнатно-сухих условиях в течение 24 часов. Обжиг материала производили при температурах  $930 \dots 950 \text{ }^\circ\text{C}$ , продолжительность процесса  $4 \dots 6$  часов [5].

Влияние относительной плотности ячеистой керамики на ее прочность характеризуют данные, приведенные в таблице, а также уравнение

$$R_{\text{яч. керам}} = R_{\text{max}} \cdot d^k, \quad (4)$$

где  $d$  – относительная плотность керамики;  $R_{\text{max}}$  – прочность пористой керамики (МПа) при максимальной плотности.

С учетом найденных значений постоянных величин выражение (4) можно записать в виде:

$$R_{\text{яч. керам}} = 10,5 \cdot d^{2,07}.$$

Соотношение «плотность – прочность» для легкой керамики

Относительная плотность ( $d$ )	0,4	0,55...0,6	0,7...0,8	1,0...1,1
$R_{\text{яч.керам}}$ , МПа	1,6...1,8	3,5...4,5	7,5...8,0	10,0...10,5

Полученные результаты подтверждают перспективность применения способа вибровспенивания шликера для изготовления легкой керамики с упрочненной ячеистой структурой, формируемой путем управления процессами реотехнологического разжижения и упрочнения. Управляющими параметрами является режим вибрирования вспениваемой смеси, а также количество и вид вводимого химического модификатора.

Использование природных силицитов с естественной нанопористостью обеспечивает получение легкой керамики плотностью 400...450 кг/м<sup>3</sup> и прочностью на сжатие 1,5...2,0 МПа.

### Список литературы

1. Ячеистый бетон для теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и инженерных коммуникаций / А.П. Прошин [и др.] // Строительные материалы. – 2002. – № 3. – С. 14–15.
2. Береговой, В.А. Эффективные теплоизоляционные пенокерамобетоны / В.А. Береговой, Е.В. Королев, Ю.М. Баженов. – М.: МГСУ, 2011. – 264 с.
3. Beregovoi, V.A. Heat-Resistant Porous Composite Based on Ordinary Clay for Thermal Insulation of Hot Surfaces / V.A. Beregovoi, A.M. Beregovoi // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol.736. – P. 166–170.
4. Пилов, П.И. Гравитационная сепарация полезных ископаемых / П.И. Пилов. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2010. – 127 с.
5. Береговой, В.А. Облегченная керамика повышенной прочности для энергоэффективных ограждающих конструкций / В.А. Береговой, Е.В. Снадин // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4. – С. 54–60.

### References

1. Cellular concrete for thermal insulation of buildings and engineering communications / A.P. Proshin [etc.] // Building materials. – 2002. – №3. – P. 14–15.
2. Beregovoi, V.A. Efficient heat insulation foam ceramic concerts / V.A. Beregovoi, E.V. Korolev, Y.M. Bazhenov. – M: MGSU, 2011. – 264 p.
3. Beregovoi, V.A. Heat-Resistant Porous Composite Based on Ordinary Clay for Thermal Insulation of Hot Surfaces / V.A. Beregovoi, A.M. Beregovoi // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol.736. – P. 166–170.
4. Pilov, P.I. Gravity separation of minerals / P.I. Pilov. – Dnepropetrovsk: National mining University, 2010. – 127 p.
5. Beregovoi, V.A. Lightweight ceramics of increased strength for energy-efficient enclosing structures / V.A. Beregovoi, E.V. Snadin // Regional architecture and engineering. – 2017. – № 4. – P. 54–60.

УДК 691.175:678

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

**Воскресенский Алексей Валентинович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Городское строительство  
и архитектура»  
E-mail: voskresenckij.aleksei@yandex.ru

**Гречишкин Александр Викторович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
зав. кафедрой «Городское строительство  
и архитектура»  
E-mail: grechishkin@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

**Voskresenskiy Aleksey Valentinovich**,  
Candidate of Sciences, Associate  
Professor of the department «Urban  
construction and Architecture»  
E-mail: voskresenckij.aleksei@yandex.ru

**Grechishkin Alexandr Victorovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Head of the department «Urban construction  
and Architecture»  
E-mail: grechishkin@mail.ru

## ЭПОКСИДНЫЕ КОМПОЗИТЫ С УПОРЯДОЧЕННОЙ СТРУКТУРОЙ И ПОВЫШЕННОЙ ХИМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТЬЮ С ДОБАВКАМИ ВЫСШИХ ЖИРНЫХ КИСЛОТ

А.В. Воскресенский, А.В. Гречишкин

Изучено влияние добавок высших жирных кислот на структурообразование и химическую стойкость эпоксидных композитов. Определена оптимальная концентрация добавки. Исследовано влияние наполнителя на химическую стойкость эпоксидных композитов. Установлена возможность применения дешевых модификаторов для получения эпоксидных композитов с эластичной структурой и высокой химической стойкостью.

*Ключевые слова: эпоксидные композиты, структура и химическая стойкость, дешевые модификаторы, стоимость*

## EPOXY COMPOSITES WITH ORDERED STRUCTURE AND INCREASED CHEMICAL RESISTANCE WITH HIGH FATTY ACIDS

A.V. Voskresenskiy, A.V. Grechishkin

The influence of additives of higher fatty acids on structure formation and chemical resistance of epoxy composites is studied. Optimum concentration of the additive of higher fatty acids is determined. The influence of filler on the chemical resistance of epoxy composites is investigated. The possibility of using cheap modifiers for producing epoxy composites with elastic structure and high chemical resistance is established.

*Keywords: epoxy composites, structure and chemical resistance, cheap modifiers, additives of higher fatty acids*

При всех достоинствах традиционных строительных материалов, применяемых в строительстве (бетон, железобетон, кирпич и т.д.), они имеют и ряд существенных недостатков. Одним из наиболее значительных является их низкая химическая стойкость.

Известно, что агрессивные среды – газы, щелочи, кислоты – ведут к ускоренному разрушению строительных конструкций. Особо отрицательное действие на строительные конструкции оказывают плавиковая кислота и смесь кислот, которые исполь-

зуются на предприятиях по производству стекла. В состав смеси кислот входят плавиковая (15 %) и серная (65 %) кислоты, взятые в соотношении 1:1.

Так что защита строительных конструкций от действия агрессивных сред стекольных производств – актуальная задача, наиболее перспективным путём решения которой является защита строительных конструкций полимерными композиционными материалами (ПКМ); это обуславливается комплексом их свойств: высокой прочностью, технологичностью, износостойкостью, инертностью ко многим агрессивным средам. Широким спектром этих свойств обладают полимеррастворы и полимербетоны на основе эпоксидных смол. Высокий уровень эксплуатационных свойств эпоксидных композиционных материалов (ЭКМ) обеспечивает их применение для изготовления защитных антикоррозионных покрытий технологического оборудования и строительных конструкций [1,2].

В работе рассматривается влияние модификаторов – высших жирных кислот (стеариновой и пальмитиновой), их концентрации на структурообразование и химическую стойкость эпоксидных полимерных композиций.

Важнейшим фактором, влияющим на физико-механические, реологические и другие параметры полимерного композита, являются процессы структурообразования модифицированной полимерной матрицы.

Свойства эпоксидных полимеррастворов обусловлены строением полимера. Характер образовавшихся при отверждении надмолекулярных структур связан с механическими свойствами полимеров. Поэтому представляет интерес изучение влияния модифицирующих добавок на морфологию поверхностей композитов.

Известно, что основными структурными элементами сетчато-пространственных эпоксидных полимеров являются глобулы. Широкое варьирование строения эпоксидных олигомеров и видов отвердителей не приводит к изменению характера структуры, а значит, и свойств эпоксидных полимеррастворов. Воздействие тепловых, энергетических и механических полей, а также изменение условий структурообразования не способствуют изменению надмолекулярного строения полимеров. Воздействие перечисленных факторов на уже отверждённые эпоксидные композиции не приводит к желаемому изменению физико-механических свойств ЭК.

Наибольший эффект достигается с помощью структурной модификации эпоксидных композиций.

Широко распространённым методом исследования структуры сетчатых полимеров на надмолекулярном уровне является электронно-микроскопический.

Исследования по изучению влияния добавок высших жирных кислот на структуру эпоксидных композитов проводились на электронном микроскопе. Влияние модифицирующих добавок оценивали по фотографиям, сделанным на электронном микроскопе, по сколам наполненных и ненаполненных композитов с применением модифицирующих добавок.

Для контроля изучалась структура слабонаполненных немодифицированных композитов.

Изучая фотографии структуры, можно заключить, что разрушение наполненных композитов происходило не по контактной зоне, а по полимерной матрице. Граница раздела выражена чётко, структура полимерной матрицы малоупорядочена, содержит воздушные включения. Поверхность образует стержни, образующиеся при прохождении фронта трещин в различных параллельных плоскостях. На фотографиях явно виден характерный «ручейковый» рельеф поверхности. При большем увеличении прослеживается зона раздела фаз. Как показали исследования фотографий, разрушение происходило по полимерной матрице.

Для упорядочивания структур полимерной матрицы и для повышения её адгезии к поверхности частиц наполнителя вводились структурирующие добавки высших жирных кислот (ВЖК) – стеариновая и пальмитиновая кислоты. Добавка ВЖК, вводимая в количестве 1,0–3,0 % от массы эпоксидной смолы, сильно влияет на характер разрушения композиционного материала. Разрушение композита происходит более вязко. Ступени сглаживаются, фронт трещины делается короче. Применение ВЖК



упрочняет структуру эпоксидного композита, делает более высокой вязкость разрушения ЭК. Увеличение концентрации применяемых ВЖК способствует разупорядочиванию структуры эпоксидных полимеррастворов.

При введении в качестве модификаторов малых концентраций ВЖК (3,0–5,0 % от массы смолы) появляются вторичные новообразования у поверхности частиц наполнителя, что повышает адгезию полимерной матрицы к поверхности наполнителя, способствует снижению неоднородности структуры ЭК.

Одновременное применение стеариновой и пальмитиновой кислот (3,0–5,0 % соответственно) приводит к упорядочиванию структуры ЭК, повышению адгезии полимерной матрицы к поверхности наполнителя. На фотографиях отсутствуют ступени «ручейкового» рельефа – структура композита стала менее жёсткой и хрупкой. На фотографиях не наблюдается и разрушения по частицам наполнителя, что также говорит о повышении эластичности структуры эпоксидного композита.

Механизм влияния применяемых поверхностно-активных веществ основан на изменении характера взаимодействия между полимерной матрицей и минеральным наполнителем в результате ориентированной адсорбции молекул ПАВ на поверхности частиц наполнителя.

Проводились исследования химической стойкости эпоксидных композитов с более упорядоченной и эластичной структурой в агрессивных средах предприятий по производству оптического стекла. В качестве агрессивных сред была принята рабочая смесь кислот предприятий по производству оптического стекла. В качестве наполнителей применяли фторид магния, отходы после химической полировки стекла (ОПХПС), кварцевый песок (для сравнения). В качестве модификаторов использовались стеариновая и пальмитиновая кислоты. Результаты исследований представлены в таблице.

Влияние добавок высших жирных кислот на химическую стойкость эпоксидных композитов

Вид добавки	Концентрация, % по массе	Коэффициент химической стойкости через 1 год экспозиции в среде		
		Кварцевый песок	Фторид магния	ОПХПС
–	–	0,70	0,88	0,79
Стеариновая кислота	1,0	0,73	0,90	0,81
	3,0	0,89	0,99	0,98
	5,0	0,84	0,98	0,97
	7,0	0,78	0,93	0,91
	10,0	0,72	0,89	0,83
Пальмитиновая кислота	1,0	0,73	0,91	0,92
	3,0	0,81	0,91	0,92
	5,0	0,86	0,99	0,98
	7,0	0,79	0,89	0,85
	10,0	0,77	0,81	0,80
Смесь кислот 1:1	1,0	0,74	0,92	0,82
	3,0	0,78	0,93	0,87
	5,0	0,86	0,97	0,91
	7,0	0,84	0,93	0,85
	10,0	0,75	0,91	0,83

Изучение экспериментальных данных показало, что природа наполнителя оказывает существенное влияние на химическую стойкость эпоксидных композитов. Наибольшей стойкостью к действию плавиковой кислоты обладают эпоксидные композиты, наполненные фторидом магния. Прочность этих композитов в первые месяцы по сравнению с полимеррастворами на других наполнителях снижается незначительно. После годовой экспозиции в 40 % растворе плавиковой кислоты прочность полимерраствора на фториде магния составляет 0,67 % от первоначальной.

Как видно из таблицы, кинетика изменения прочности эпоксидных композитов с наполнителями ОПХПС и фторидом магния имеет одинаковый характер, хотя у эпоксидных композитов с наполнителем ОПХПС изменение прочности происходит более резко.

При более длительной выдержке композитов в агрессивной среде ( $1 \div 1,5$  года) снижение прочности стабилизируется. Для образцов с наполнителем ОПХПС прочность при сжатии после экспозиции в течение 18 месяцев в агрессивной среде составила 0,56 % от первоначальной.

Долговечность ЭК с наполнителями – фторидом магния и ОПХПС – зависит от деструкции полимерной матрицы под действием агрессивной среды. В эпоксидных композитах на основе фторсодержащих наполнителей, помимо физической адсорбции, на взаимодействие в контактной зоне оказывает влияние хемосорбция.

Энергия химических связей на границе полимер – наполнитель превышает энергию разрушения водородных связей и связей, обусловленных ван-дер-ваальсовым взаимодействием. Этим объясняется стабилизация прочности при длительной экспозиции в агрессивной среде.

При экспозиции в течение первых 3,5 месяца в 40 % растворе плавиковой кислоты наименьшую прочность показали ЭК на кварцевом песке. Можно предположить, что интенсивная деструкция эпоксидных композитов, наполненных кварцевым песком, объясняется взаимодействием оксида кремния с раствором плавиковой кислоты и выделением фторида кремния (газообразного продукта), способствующего изменению микроструктуры эпоксидного композита.

При экспозиции полимеррастворов в рабочей смеси серной и плавиковой кислот наибольшая прочность и стойкость наблюдалась у эпоксидных композитов на ОПХПС. Результаты исследований показали, что после полуторогодовой выдержки эпоксидных композитов  $K_{ст}$  составил 0,86 в рабочей смеси и 0,82 в отработанной. Для образцов, наполненных фторидом магния, – 0,79 и 0,676 соответственно.

Наименее стойкими оказались эпоксидные полимеррастворы, наполненные кварцевым песком. После 6 месяцев пребывания ЭК в рабочей смеси плавиковой и серной кислот указанные образцы разрушились.

Проведённые исследования показали, что используемые наполнители (фторид магния и ОПХПС) имеют высокую стойкость к действию раствора плавиковой кислоты и рабочей смеси плавиковой и серной кислот.

Применение в качестве модификаторов стеариновой и пальмитиновой кислот обусловлено их высокой инертностью к растворам плавиковой кислоты и гидрофобизирующим воздействием на поверхность минеральных наполнителей.

Проведенная работа позволяет сделать вывод, что использование в качестве модифицирующих добавок высших жирных кислот (стеариновой и пальмитиновой) приводит к упорядочиванию структуры олигомерной матрицы, появлению вторичных новообразований в структуре полимерной композиции, что способствует повышению адгезии на поверхности полимер – наполнитель.

Высшие жирные кислоты, модифицирующие структуру олигомера, снижают неоднородность структуры, делая характер разрушения композита более вязким.

Анализ результатов показывает, что добавки модификаторов способствуют повышению стойкости эпоксидных композитов на фториде магния на 25–30 % в 40 % растворе плавиковой кислоты.

Максимальный эффект наблюдается при количестве модификаторов –  $3,0 \div 5,0$  % от массы эпоксидной смолы.

Наиболее заметно влияние модифицирующих добавок на стойкость эпоксидных композитов у полимеррастворов на ОПХПС.

Выводы. Применение добавок повышает стойкость эпоксидных композитов в рабочей смеси кислот до 36 %.

Введение в полимерную матрицу в качестве модифицирующих добавок высших жирных кислот способствует получению упорядоченной структуры композита,

повышению адгезии полимерной матрицы к поверхности наполнителя, пластификации структуры эпоксидных композитов.

Использование в качестве добавок стеариновой и пальмитиновой кислот значительно повышает стойкость эпоксидных композитов в рабочей смеси плавиковой и серной кислот (на 22 % у эпоксидных композитов на фториде магния и на 20 % на ОПХПС).

#### Список литературы

1. Воскресенский, А.В. Улучшение реологических характеристик эпоксидных полимеррастворов / А.В. Воскресенский // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2016. – №2. – С.60–64.

2. Воскресенский, А.В. Влияние добавок бутилкаучука и вида наполнителя на технологические свойства эпоксидных композитов / А.В. Воскресенский // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2017. – №6 (13). – С.137–143.

#### References

1. Voskresenskiy, A.V. Improvement of rheological characteristics of epoxy proliferation / A.V. Voskresenskiy // Bulletin of PGWS: construction, science and education. – 2016. – No. 2. – P. 60–64.

2. Voskresenskiy, A.V. Influence of additives of butyl rubber and fillers on the technological properties of epoxy composites / A.V. Voskresenskiy // Russian Education and science in the modern world. Innovations. – 2017. – No. 6 (13). – P. 137–143.

УДК 666.971.022.7: 534-143

*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**Фокин Георгий Александрович,**  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Физика и химия»  
E-mail phisik @ pguas. ru**Вилкова Наталья Георгиевна,**  
доктор химических наук,  
профессор кафедры «Физика и химия»  
E-mail ngvilkova@mail.ru*Пензенский государственный университет*  
Россия, 440046, Пенза, ул.Красная, 40,  
тел.: 8(8412)36 82 09**Тетюшева Ольга Васильевна,**  
доцент кафедры «Общая физика  
и методики обучения физике»  
E-mail: folim1@ 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**Fokin Georgi Aleksandrovich,**  
Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Physics and Chemistry»  
E-mail phisik @ pguas. ru**Vilkova Natalya Georgievna,**  
Doctor of chemistry, Professor of the  
Department «Physics and Chemistry»  
E-mail ngvilkova@mail.ru*Penza State University*  
Russia, 440046, Penza, 40, Krasnaya St.,  
tel. 8(8412)36 82 09**Tetjusheva Olga Vasiljevna,**  
Associate Professor of the department  
«General Physics and Methods of Teaching  
Physics»  
E-mail: folim1@ mail.ru.

## ВЛИЯНИЕ ВИХРЕВОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Г.А. Фокин, О.В. Тетюшева, Н.Г. Вилкова

Исследовано воздействие вихревого динамического поля (ВДП) на изменение свойств растворов затворения и воды. Обнаружены увеличение водородного показателя воды, ускорение процесса схватывания и твердения гипса, а также изменение структуры и прочности полученных контрольных образцов.

*Ключевые слова: вихревое динамическое поле, раствор затворения, гипс, прочность*

## INFLUENCE OF A VORTEX DYNAMIC FIELD ON THE PROPERTIES OF BUILDING MATERIALS

G.A. Fokin, O.V. Tetjusheva, N.G. Vilkova

The effect of a vortex dynamic field (VAR) on the change of water and mixing solutions properties is studied. An increase of the water hydrogen index, acceleration of the setting process and gypsum hardening, as well as a change in the structure and strength of the obtained control samples were observed.

*Keywords: vortex dynamic field, mixing solution, gypsum, strength*

На сегодняшний день актуальным является вопрос о разработке методов активации процесса твердения систем на минеральном вяжущем. Долгое время совершенствование технологии строительных материалов шло по пути изучения свойств и возможностей эффективного использования вяжущих и заполнителей. Меньше внимания уделялось вопросам, связанным с подготовкой воды затворения и растворов. Вместе с тем вода является равноправным участником формирования структуры материалов, а ее состояние и способ подготовки во многом определяют характер процессов гидратации и структурообразования дисперсных систем. Решение этой задачи может быть самым разным. Выполненные к настоящему времени исследования

показали целесообразность использования технологии воздействия вихрединамических полей на свойства растворов и растворителя (воды затворения).

Ранее установлено [1-14], что вода может менять свою объемно-молекулярную структуру под воздействием факторов, имеющих различные характеристики и природу (например, электромагнитные поля, механические вибрации, свет, звуковые колебания, энергетические вибрации кристаллов и др.). К настоящему времени накоплены экспериментальные данные, доказывающие эффективность воздействия магнитного поля на свойства воды и водных растворов. Кратковременное воздействие магнитных полей увеличивает скорость химических процессов и кристаллизации растворенных веществ, интенсифицирует процессы адсорбции, улучшает коагуляцию примесей и способствует быстрому образованию осадков.

Известны результаты исследования изменения показателя преломления бидистиллята после действия на него в течение шести часов постоянного магнитного поля. Максимальная величина изменения показателя преломления  $\Delta n = 5 \cdot 10^{-5}$  сохранялась в течение часа [11]. Было показано, что после выдерживания бидистиллята в течение указанного времени в геомагнитном поле (вертикальная составляющая  $H_{\text{гео}} \approx 5 \cdot 10^5$  Тл), модулированном низкочастотным магнитным полем ( $H_0 = 10^{-7} - 2,7 \cdot 10^{-4}$  Тл,  $f = 10^{-2} - 10^2$  Гц), наблюдали изменение электропроводности, теплопроводности, светопропускания водного раствора красителя.

Было установлено [3], что изменения макроскопических свойств  $H_2O$  и  $D_2O$ , индуцированные переменным магнитным полем, зависят от его величины, частоты, длительности действия и температуры.

Обработка магнитным полем (0,3 Тл) [12] проточной высокоомной воды приводит к ее более плотной структурной упаковке. Предполагается, что образование ассоциатов воды происходит за счет преимущественного образования более сильных водородных связей и упорядочения их трехмерной сетки. Экспериментальные исследования показали, что кластеры, содержащие 3–18 молекул воды, имеют большой дипольный момент, создавая вокруг электрическое поле [13]. В магнитном поле, под действием силы Лоренца, образуются пластинчатые домены ориентированных молекул воды. Движущаяся вода с дипольными структурами во внешнем магнитном поле подобна проводнику. Для получения эффекта активации необходимо либо проточное движение воды в постоянном магнитном поле, либо импульсное электромагнитное поле [14].

Изучалось действие постоянного магнитного поля (2–11 мкТл) и низкочастотного магнитного поля на электрическое сопротивление воды [6, 7]. Существует связь между магнитным воздействием и растворенными в воде газами. Струю воды пропускали со скоростью 3–4 м/с через магнитное поле 0,2 Тл [3]. В результате воздействия водородный показатель смещался в щелочную сторону, а растворимости газов  $O_2$  и  $CO_2$  уменьшались.

В настоящее время существует несколько гипотез, объясняющих механизм воздействия магнитного поля на воду и водные растворы:

- воздействие магнитного поля на водородные связи между молекулами воды;
- формирование под действием магнитного поля центров фазовых превращений примесей, что способствует их ускоренной седиментации и коагуляции;
- непосредственное воздействие магнитного поля на структуру ассоциатов воды (деформация водородных связей, дробление ассоциатов-кластеров).

Отметим, что, хотя физическая сущность этих явлений пока точно не выяснена и их объяснение существует в виде перечисленных гипотез, активация водных растворов магнитным полем используется и является основой технологии получения новых строительных материалов. Развитие исследований в данном направлении отражено в работах [15-18]. Активация воды и растворов затворения является одним из перспективных путей совершенствования технологии получения материалов на основе минерального вяжущего [18]. На базе Пензенского государственного университета архитектуры и строительства были выполнены работы по поиску способов активации воды и растворов, а также созданию аппаратных комплексов получения строительных материалов нового поколения. В частности, были проведены исследования по активации

воды затворения ультразвуковым методом в докавитационный период, а также по получению активированного маточного раствора волновым методом, показавшие хорошие результаты по улучшению физико-механических характеристик материалов на основе цементного вяжущего [15-18].

Целью приведенных исследований являлось изучение воздействия вихревого динамического поля на воду и раствор затворения, а также на процесс схватывания, твердения гипса и прочность полученного материала.

Для осуществления необходимых операций по активации и изучению свойств активированной воды и растворов была создана комплексная установка, включающая аппарат для активации (рис.1), компьютер, аналого-цифровой преобразователь, набор датчиков (датчики электропроводности, рН, температуры и т.д.).



Рис. 1. Лабораторный аппарат, предназначенный для воздействия на воду затворения и растворные смеси в лабораторных условиях при приготовлении образцов для испытаний

Данный аппарат состоит из следующих основных частей: активатора, электрического привода, станины, массивного основания, механизма для перемещения устройства вдоль вертикальной оси, направляющей, винта стопорного для фиксации положения устройства, реактора.

Активатор представляет собой крестообразный ротор, на котором закреплены постоянные магниты (рис. 2). Использованные в экспериментах магниты изготовлены из феррита стронциевого, остаточная индукция  $B_r=0,38$  Тл, коэрцитивная сила  $H_{cb}=240$  кА/м; магниты имеют цилиндрическую форму с диаметром 18 мм, высотой, равной 5 мм, и установлены с чередованием полярности (рис. 3 и 4).

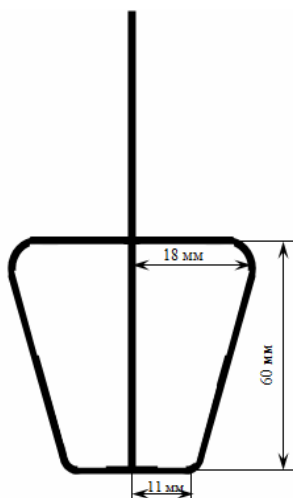


Рис. 2. Характерные размеры активатора

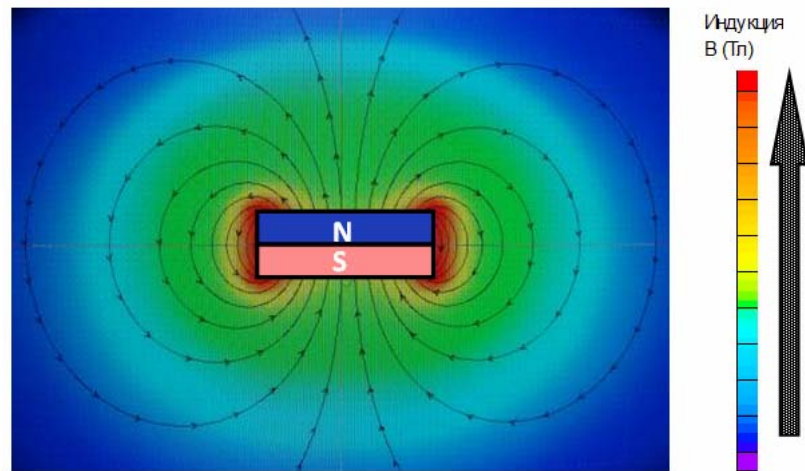


Рис. 3. Изображение силовых линий поля, созданного одним магнитом

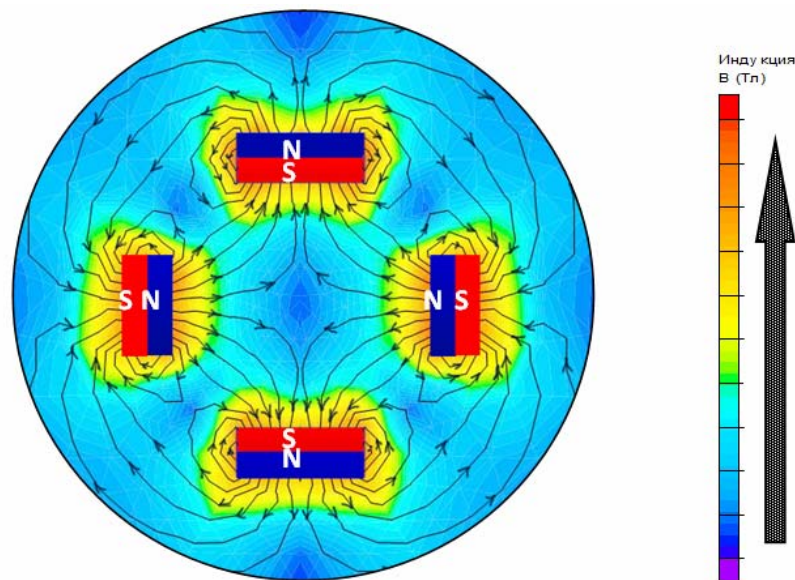


Рис. 4. Изображение силовых линий поля, созданного кольцом из четырех взаимодействующих постоянных магнитов

Применяют вращающийся активатор не только для того, чтобы создать особую форму магнитного поля, но и для того, чтобы обеспечить быстрое движение обрабатываемой жидкой системы в этом поле. Быстрое движение активатора (1200 оборотов в минуту) в сильном магнитном поле (порядка 0,1 Тл) дает более существенный результат по сравнению с использованием только механической или только магнитной обработки раствора затвердения.

Как отмечалось, вода представляет собой ассоциированную жидкость с большой диэлектрической проницаемостью и большим дипольным моментом молекул, который приводит к тому, что в жидком состоянии при взаимодействии молекул друг с другом образуются отдельные связанные структуры. Нарушение системной организации воды, водных растворов через изменение соотношения полимерных и ассоциированных в незначительной степени молекул может приводить к интенсификации протекающих в ней процессов.

Нами проводилось исследование влияния вихревого динамического поля на изменение свойств водопроводной воды, а именно зависимости изменения её плотности, проводимости, водородного показателя и температуры от времени воздействия вихревого динамического поля, а также от угловой скорости вращения магнитного поля.

В ходе исследований были обнаружены рост плотности воды и увеличение её водородного показателя (рис. 5).

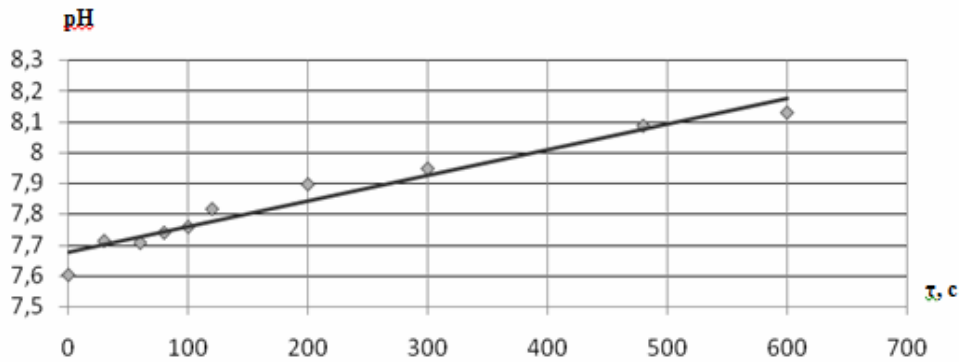


Рис. 5. Зависимость pH воды от времени обработки ее вихрединамическим полем

Увеличение плотности и рост pH воды можно объяснить изменением ионного состава и структуры воды. Предполагается, что вода состоит из сложных молекулярных ассоциатов  $(\text{H}_2\text{O})_n$  (при нормальных условиях  $n = 50 \div 1000$ ), среди которых есть и простые молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  (гидроли). Результаты попыток определения числа гидролей в воде противоречивы: по одним данным, при 0, 100, 250°C оно составляет 25, 40 и 90 %, по другим – менее 1 % (при обычной температуре). Можно предположить, что воздействие вихревых полей на воду влечет за собой переход ассоциатов  $(\text{H}_2\text{O})_n$  в  $(\text{H}_2\text{O})_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Разрушение ассоциатов  $(\text{H}_2\text{O})_n$  сопровождается разрушением и деформацией водородных связей, что приводит к уменьшению расстояний между молекулами воды и росту плотности.

Из результатов эксперимента следует, что при активировании воды затворения вихревым динамическим полем наблюдаются рост скорости кристаллизации и увеличение максимума температуры кристаллизации, что говорит об увеличении степени гидратации и дисперсности.

Активация раствора гипса также ускоряет процессы схватывания и твердения гипса. Особенно эти процессы интенсифицируются при обработке ВДП раствора затворения. При 1,5 мин его обработки время кристаллизации сокращается почти на треть. Структура полученных образцов при таком виде приготовления раствора становится более однородной, уменьшается общее количество пор (рис. 6, а, б).

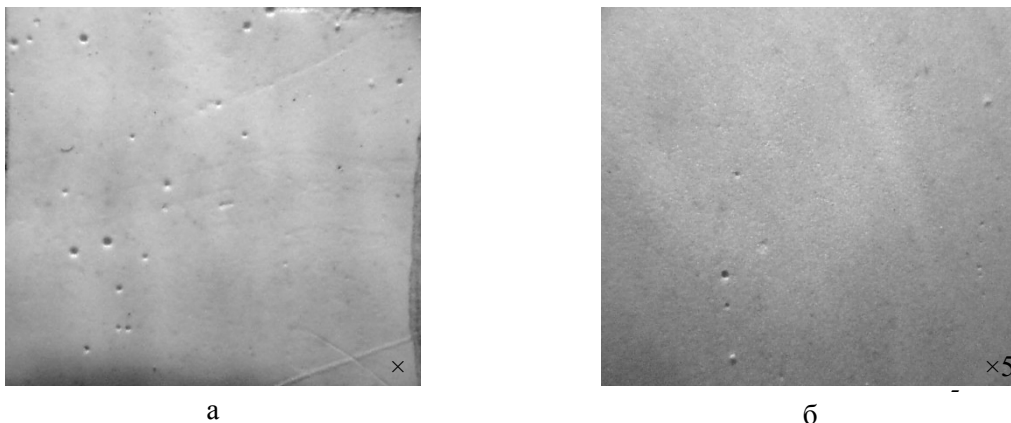


Рис. 6. Поверхность образца, изготовленного с использованием: а – водопроводной воды; б – воды, обработанной ВДП

Также стоит отметить, что изменяется прочность образцов на сжатие. Для исследования влияния воды, обработанной ВДП, образцы гипсового теста с различным значе-



нием В/Г затворяли водопроводной и водой, подвергавшейся различному времени воздействия ВДП. В качестве вяжущего использовались строительный гипс Г5 Б II производства ООО “Унистром-Трейдиг” и строительный гипс Г3 Б II производства ЗАО “Максмел”. Полученные данные свидетельствуют о том, что активация воды ускоряет процессы твердения гипсового теста. Максимальная прочность образцов достигается после 20 мин обработки воды затворения ВДП (рис. 7 и 8).

Так, прочность при сжатии контрольного образца, изготовленного из гипсового теста нормальной плотности (вяжущее – гипс строительный Г3 Б II), высушенного до постоянной массы, составляла  $R=5,9$  МПа, а образцов гипсового камня, приготовленных на активированной в течение 20 минут воде затворения, была равна 6,95 МПа. Таким образом, использование активированной воды приводит к увеличению прочности при сжатии на 18 %.

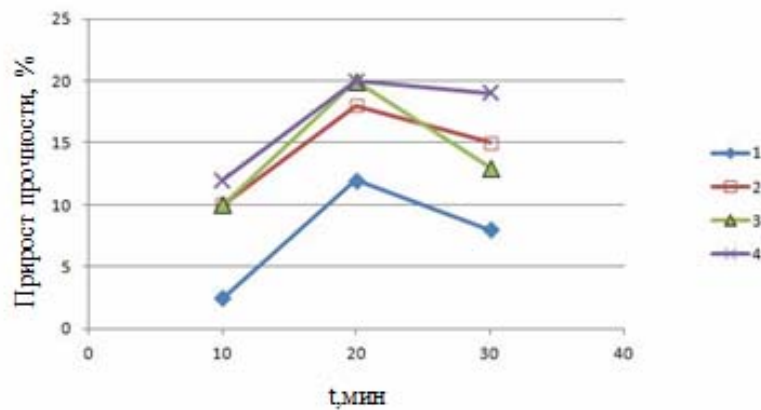


Рис. 7. Влияние В/Г на прирост прочности при различном времени воздействия ВДП на воду затворения для образцов, высушенных до постоянной массы, на основе строительного гипса Г3 Б II: 1 – В/Г=0,6; 2 – В/Г=0,7; 3 – В/Г = 0,8; 4 – В/Г = 0,9

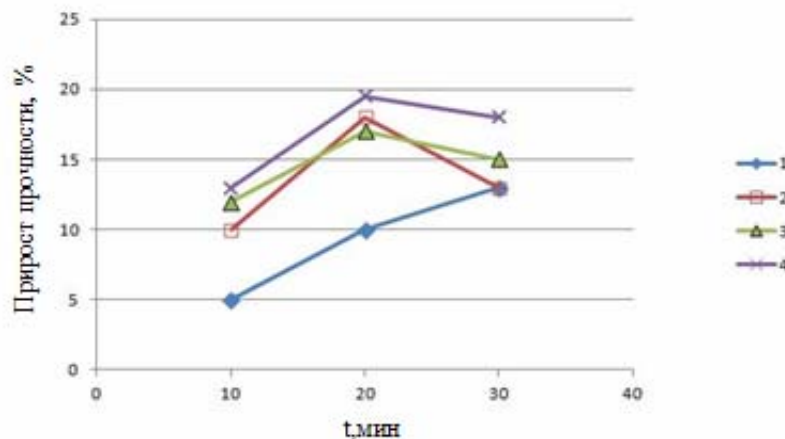


Рис. 8. Влияние В/Г на прирост прочности при различном времени воздействия ВДП на воду затворения для образцов, высушенных до постоянной массы, на основе строительного гипса Г5 Б II: 1 – В/Г=0,5; 2 – В/Г=0,55; 3 – В/Г = 0,6; 4 – В/Г = 0,7

Также по данным приведенных графиков можно сделать вывод, что эффект от активации воды затворения зависит не только от времени воздействия на нее ВДП, но и от характеристики самой гипсовой суспензии, для приготовления которой она используется, а именно от водогипсового отношения. Как следует из приведенных данных, эффект от активации воды затворения ВДП увеличивается при повышении В/Г. Это объясняется тем, что, как уже указывалось, вода затворения меняет свои свойства под действием ВДП, а следовательно, при увеличении её количества в суспензии естественно ожидать закономерного увеличения прироста прочности.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Установлено, что с помощью вихрединамического метода обработки воды можно направленно изменять реакционную способность дисперсионной среды и ее физико-химические свойства. Использование рассмотренной методики приводит к изменению кинетики твердения гипса, влекущему за собой улучшение структуры получаемого материала, что не может не отразиться на его свойствах. В ходе исследований выявлено также положительное влияние вихрединамической активации воды затворения и растворных смесей на прочность материалов на основе воздушных вяжущих. Эффект от данного вида активации воды затворения и растворных смесей растет при повышении водотвердого отношения.

Технико-экономический эффект от применения предложенной методики может существенно сократить расходы на производство строительных материалов на минеральном вяжущем.

### Список литературы

1. Шишелова, Т.И. Перспективы и направления в исследовании воды / Т.И. Шишелова, Н.Л.Корзун, М.Ю. Толстой // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 3(ч.2). – С. 231–233.
2. Колтовой, Н.А. Структура и свойства воды / Н.А. Колтовой, С.А.Краевой. – М.: Bookvika.ru, 2014. – 132 с.
3. Власов, В.А. Анализ процессов, обуславливающих влияние магнитного поля на структуру и свойства воды / В.А. Власов, В.Ф. Мышкин, В.А. Хан // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – №81(07).
4. Коваленко, В.Ф. Определение формы кластеров воды / В.Ф. Коваленко, А.Ю. Бордюк, С.В. Шутов // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т.24. – №7. – С.601–605.
5. Высоцкий, В.И. Физические основы долговременной памяти воды/ В.И. Высоцкий, А.А. Корнилова // Вестник МГУ. Серия физика и астрономия. – 2004. – №3. – С.58–62.
6. Санкин, Г.Н. Инерционность изменения электропроводности воды в слабых постоянных магнитных полях / Г.Н.Санкин, В.С. Тесленко // ЖТФ. – 2000. – Т.70. – Вып. 3. – С.64–65.
7. Агеев, И.М. Изучение влияния низкочастотного магнитного поля на воду / И.М. Агеев, Г.Г. Шишкин, С.М. Еськин // Труды МАИ. – 2007. – №28. – С.1–8.
8. Арадовский, Я.Л. Свойства бетона на магнитнообработанной воде/ Я.Л. Арадовский, Р.Г. Тер-Осипянц, Э.М. Арадовская // Бетон и железобетон. – 1972. – N 4. – С. 32–34.
9. Черников, Ф.Р. Низкопериодические процессы в водных системах и их реакция на магнитное поле. Хронобиология сердечно-сосудистой системы / Ф.Р. Черников. – М.: Изд-во Ун-та дружбы народов им П. Лумумбы, 1988. – С. 86–87.
10. Березин, М.В. Влияние слабых переменных магнитных полей на рассеяние света водными системами / М.В.Березин, Р.Р. Ляпин, Ф.М. Салецкий // МГУ Физ. фак. – 1988. – №21. – С. 41.
11. Семихина, Л.П. Изменение показателей преломления воды после магнитной обработки / Л.П.Семихина // Коллоидный журнал. – 1981. – Т. 43. – №2. – С. 401–404.
12. Караваева, А.П. Некоторые свойства омагниченной глубокообессоленной воды / А.П. Караваева, И.К. Маршаков, А.А. Жидконожкина // Теория и практика сорбционных процессов. – Воронеж. – 1976. – Вып. 11. – С. 78–83.
13. R. Mogo et al. // Physical Review Letters. 97, 123401, 2006.
14. Уманский, Д.И. Влияние магнитного поля на диэлектрическую проницаемость технической воды / Д.И. Уманский // ЖТФ. – 1965. – Вып.2. – С.2245–2248.
15. Фокин, Г.А., Акустические и вихревые поля в водосодержащих системах: монография / Г.А. Фокин, О.В. Тетюшева, А.С. Гуськов. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 259 с.

16. Карасева, Я.А. Повышение эффективности цементных дисперсных систем водой в метастабильном состоянии: дис.... канд. техн. наук 05.23.05 / Я.А. Карасева. – Пенза, 2008.
17. Фолимагина, О.В. Исследование влияния вихрединамического поля на свойства воды затворения и гипсового теста / О.В. Фолимагина, Г.А. Фокин // Известия ВУЗов. Строительство. – Новосибирск: НГСУ, 2011. – С. 29–35.
18. Родионов, Р.Б. Инновационный материал нанотехнологий в производстве строительных материалов / Р.Б. Родионов // Строительные материалы, оборудование XXI века. – 2006. – №8. – С. 72–75.
19. Зацепина, Г.Л. Физические свойства и структура воды / Г.Л. Зацепина. – М.: Изд-во Московского университета, 1998. – 185 с.

## References

1. Shishelova, T.I. Perspectives in the study of water / T.I. Shishelova, N.L.Korzun, M.Y. Colon // international journal of applied and fundamental research. – 2014. – No. 3(part 2). – P. 231–233.
2. Koltova, N.A. Structure and properties of water / N.A. Koltova, S.A. Kraeva. – M.: Bookvika.ru, 2014. – 132 p.
3. Vlasov, V.A. Analysis of the processes underlying the influence of magnetic field on the structure and properties of water / V.A. Vlasov, V.F. Myshkin, V.A. Khan // Scientific journal of the Kuban state agrarian University. – 2012. – No. 81 (07).
4. Kovalenko, V.F. determination of the shape of water clusters / V.F. Kovalenko, Y.A. Bordyuk, S.V. Shutov // Optics of atmosphere and ocean. – 2011. – Vol. 24. – No. 7. – P. 601–605.
5. Vysotsky, V.I. Physical basis of long-term memory of water / V.I. Vysotskii, A.A. Kornilova // Vestnik MGU. A series of physics and astronomy. – 2004. – No. 3. – P. 58–62.
6. Sankin, G.N. The inertia of changes of electrical conductivity of water in weak constant magnetic fields / G.N. Sankin, V.S. Teslenko // ZhTF. – 2000. – P. 70, vol. 3. – P. 64–65.
7. Ageev, I.M. Study of the effect of low-frequency magnetic field on water / I.M. Ageev, G.G. Shishkin, S.M. Eskin // Proceedings of MAI. – 2007. – No. 28. – P. 1–8.
8. Aradowskii, J.L. Properties of concrete magnetoresistance water/ J.L. Aradowskii, R.G. Ter-Osipyan, E.M. Aradowskaya // Concrete and reinforced concrete. – 1972. – N 4. – P. 32–34.
9. Chernikov, F.R. Low-Periodical processes in water systems and their reaction to the magnetic field. Chronobiology of the cardiovascular system / F.R. Chernikov. – M.: publishing House of friendship of peoples of p. Lumumba, 1988. – P. 86–87.
10. Berezin, M.V. Influence of weak magnetic field variables on light scattering by water systems / M.V. Berezin, R.R. Lyapin, F.M. Saletsky // MSU Phys. FAK. – 1988. – No. 21. – P. 41.
11. Semihina L.P. Change of refractive indices of water after magnetic treatment / L.P. Semihina // Colloid journal. – 1981. – Vol. 43. – No. 2. – P. 401–404.
12. Karavaeva, A.P. Some properties of magnetic glubokovodnoi water / A.P. Karavaeva, I.K. Marshakov, A.A. Reconocen // Theory and practice of sorption processes. – Voronezh, 1976. – Vol. 11. – P. 78–83.
13. R. Moro et al. // Physical Review Letters. 97, 123401, 2006.
14. Umansky, D.I. Influence of magnetic field on dielectric permittivity of industrial water / D.I. Umansky // ZhTF. – 1965. – Vol.2. – P. 2245–2248.
15. Fokin, G.A. Acoustic and vortex fields in water-containing systems: monograph / G.A. Fokin, O.V. Tetyusheva, A.S. Guskov. – Penza: PGAS, 2013. – 259 p.
16. Karasev, J.A. Improving the efficiency of cement dispersion systems with water in a metastable state: dis.... kand. tech. Sciences 05.23.05 / Y.A. Karasev. – Penza, 2008.

17. Folimagina, O.V. Study of the influence of viridimicus fields on the properties of mixing water and gypsum test / O.V. Folimagina, A.G. Fokin // News of higher educational institutions. Construction. – Novosibirsk: NGSU, 2011. – P. 29–35.

18. Rodionov, R.B. Innovative material of nanotechnology in the production of building materials / R.B. Rodionov // Building materials, equipment of the XXI century. – 2006. – No. 8. – P. 72–75.

19. Zatsepina, G.L. Physical properties and structure of water / G.L. Zatsepina. – M.: Publishing house of Moscow University, 1998. – 185 p.

УДК 691.31:699.86

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

**Викторова Ольга Леонидовна,**  
доцент кафедры «Городское строительство  
и архитектура»  
E-mail: gsia@pguas.ru

Penza State University of Architecture  
and Construction

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

**Viktorova Olga Leonidovna,**  
Associate Professor of the department «Urban  
construction and architecture»  
E-mail: gsia@pguas.ru

## ОЦЕНКА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ КАРБОНАТНО-ШЛАКОВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

О.Л. Викторова

Рассматривается применение карбонатно-шлакового композита в качестве материала наружной ограждающей конструкции стены. Разработан композиционный материал с более высокими теплозащитными свойствами по сравнению с цементно-известковым композитом и традиционным материалом – кирпичом глиняным обыкновенным. Показана возможность увеличения термического сопротивления конструкции и повышения тепловой защиты здания в целом на основе применения разработанного материала.

*Ключевые слова: тепловая защита здания, наружные ограждающие конструкции, композиционный материал, теплозащитные свойства, термическое сопротивление, коэффициент теплопроводности, шлак, карбонат, цементно-известковый композит, кирпич глиняный обыкновенный*

## ASSESSMENT OF HEAT-SHIELDING PROPERTIES OF CARBONITE-SLAG COMPOSITE MATERIAL

O.L. Viktorova

Application of carbonate-slag composite as an external wall enclosing structure is considered. A composite material with higher thermal protection properties in comparison with cement-lime composite and traditional material – ordinary clay brick is developed. The possibility of increasing the thermal resistance of the structure and improving thermal protection of a building as a whole on the basis of the developed material is shown.

*Keywords: thermal protection of a building, external enclosing structures, composite material, thermal protection properties, thermal resistance, coefficient of thermal conductivity, slag, carbonate, cement-lime composite, ordinary clay brick*

Особый интерес при производстве стеновых материалов с высокими теплозащитными свойствами, позволяющими повысить термическое сопротивление наружной ограждающей конструкции, представляет использование техногенных отходов, таких, как шлак, и местных дешевых сырьевых материалов – известняков.

При новом строительстве, а также реконструкции объектов необходимо соблюдать требования по тепловой защите здания, обеспечивающей при дальнейшей эксплуатации объекта значительную экономию материальных средств, так как снижаются затраты на отопление. Этот вопрос решается комплексно, учитывая теплопотери через все виды ограждающих конструкций. Установлено, что около 30 % теплопотерь происходит через наружные стены, поэтому чем выше теплозащитные свойства конструкции, тем выше тепловая защита здания в целом, и использование материала с низким коэффициентом теплопроводности будет актуально.

Под руководством профессора В.И. Калашникова был изобретен карбонатно-шлаковый композиционный материал, при производстве которого используются экологически чистые малоэнергоёмкие технологии [1], исключаяющие сушку сырьевых материалов, обжиг изделий с сопутствующими выбросами газовых смесей, и местные сырьевые материалы. В качестве основного компонента вяжущего используется доменный гранулированный шлак Липецкого металлургического комбината, в качестве наполнителя – известняки Иссинского месторождения, для активации твердения шлако-карбонатной смеси – едкий натр технический, для затворения смесей применяли воду из хозяйственно-питьевого водопровода. Данный материал получается методом полусухого прессования, твердение происходит в нормально-влажностных условиях. Результаты, подтверждающие высокую реакционную поверхностную активность шлака и известняка, отражены в [1–3]. При производстве композиционного материала используются ресурсосберегающие технологии на предприятиях стройиндустрии без проведения кардинальных реконструкционных мероприятий, что позволяет существенно снизить себестоимость данной продукции. Экспериментально-теоретическим путем подобраны рецептурные параметры и технологии, позволяющие использовать данный материал для изготовления стеновых изделий [1, 3]. Для стенового материала важнейшим физико-техническим параметром, по которому оценивается теплоизолирующая способность, является его теплопроводность. Поэтому для установления возможности использования карбонатно-шлакового материала в качестве стенового, необходимо экспериментально определить величину этого коэффициента и в дальнейшем использовать данный параметр для оценки теплозащитных свойств наружных стен здания.

При проведении эксперимента решалась задача выявления зависимости коэффициента теплопроводности материала от ряда структурообразующих факторов: количества связующего (шлака), величины удельной поверхности наполнителя (известняка), плотности материала.

При проведении эксперимента использовались образцы из шлака Липецкого с удельной поверхностью  $S_{уд} = 300,0 \text{ м}^2/\text{кг}$  и известняка Иссинского с удельной поверхностью  $S_{уд} = 300,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ ,  $S_{уд} = 600,0 \text{ м}^2/\text{кг}$  и  $S_{уд} = 900,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Соотношение компонентов вяжущего представлено в табл. 1; количество NaOH во всех составах – 3 % от массы композиционного вяжущего, В/В-отношение – 0,12. Давление прессования образцов составляло 8,3 МПа. Для сравнения был определен коэффициент теплопроводности прессованного карбонатно-цементного вяжущего.

Сырьевые материалы в начальном состоянии имели следующие коэффициенты теплопроводности [4]:

- известняк при  $\rho = 1900 \text{ кг/м}^3$  –  $\lambda = 0,81 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$ ;
- шлак гранулированный при  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$  –  $\lambda = 0,14 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$ .

Значения коэффициента теплопроводности, существенно влияющей на теплозащитные свойства конструкции, для некоторых строительных материалов, в том числе близких по составу к исследуемому, приведены в табл. 2 [4].

Коэффициент теплопроводности карбонатно-шлакового композиционного материала определялся экспериментальным методом на приборе ИТЭМ – 1М. Экспериментальный метод определения коэффициента теплопроводности базируется на определенных теоретических предпосылках и основан на измерении количества тепла, проходящего через испытываемый образец нормированных размеров за определенное время при заданном перепаде температур. Для определения коэффициента теплопроводности испытывали по три образца каждого состава. Испытания проводили на установке, предусмотренной ГОСТ 7076-99 «Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме». Электронный блок прибора производил определение величины коэффициента теплопроводности в соответствии с известной формулой

$$\lambda = K \cdot h (E_1 / E_2),$$

где  $K$  – константа, определяемая в результате градуировки прибора по образцовой мере;  $h$  – высота исследуемого образца, м;  $E_1$  и  $E_2$  – значения э.д.с. тепломера и термопары «верх-низ», пропорциональные соответствующему перепаду температуры.

Вычисления отношения  $E_1 / E_2$  и умножение его на заданное значение  $K \cdot h$  выполнялись в автоматическом режиме.

В соответствии с параметрами используемого прибора для эксперимента необходимы образцы-таблетки  $\varnothing 15$  мм,  $h=5$  мм, которые должны иметь ровные, гладкие параллельные поверхности.

Измерения коэффициента теплопроводности проводили для материала, находившегося в естественном сухом состоянии (при  $t = 20^\circ\text{C}$  и  $\varphi \approx 60\%$ ). Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Значения коэффициента теплопроводности карбонатно-шлакового материала

№ п/п	% соотношение компонентов вяжущего	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/м·°C
1	Шлак – 50 % Известняк – 50 % ( $S_{\text{вд}} = 900,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ )	1700	0,47
2	Шлак – 60 % Известняк – 40 % ( $S_{\text{вд}} = 900,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ )	1700	0,44
3	Шлак – 70 % Известняк – 30 % ( $S_{\text{вд}} = 900,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ )	1700	0,42
4	Шлак – 50 % Известняк – 50 % ( $S_{\text{вд}} = 600,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ )	1650	0,43
5	Шлак – 60 % Известняк – 40 % ( $S_{\text{вд}} = 600,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ )	1650	0,41
6	Шлак – 70 % Известняк – 30 % ( $S_{\text{вд}} = 600,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ )	1650	0,39
7	Шлак – 50 % Известняк – 50 % ( $S_{\text{вд}} = 300,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ )	1610	0,39
8	Шлак – 60 % Известняк – 40 % ( $S_{\text{вд}} = 300,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ )	1610	0,38
9	Шлак – 70 % Известняк – 30 % ( $S_{\text{вд}} = 300,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ )	1610	0,37
10	Шлак – 100 % молотый ( $S_{\text{вд}} = 300,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ )	1670	0,37
11	Шлак – 10 % Известняк – 90 % ( $S_{\text{вд}} = 600,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ )	1720	0,47
12	Цемент (М-400) – 60 % Известняк – 40 % ( $S_{\text{вд}} = 600,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ )	1800	0,54

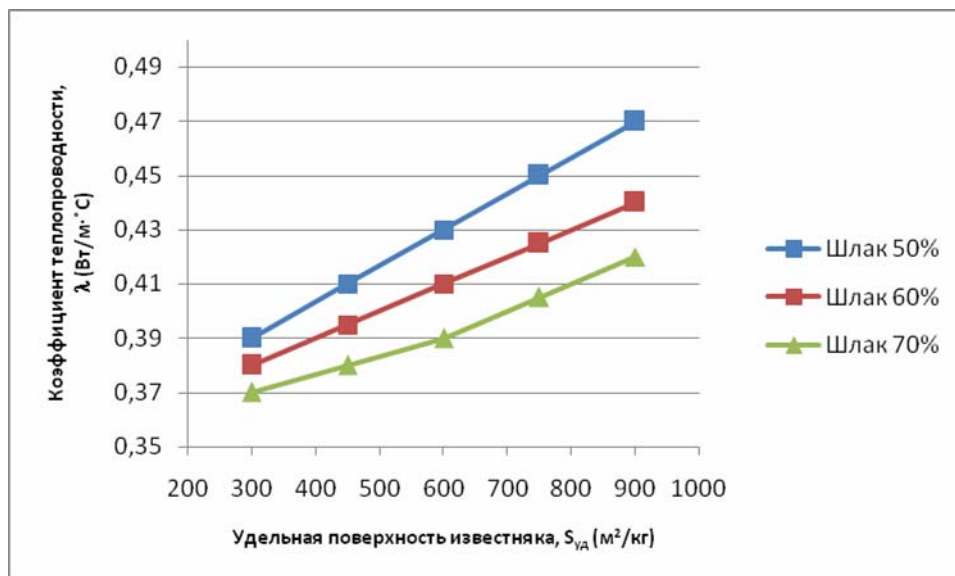
Т а б л и ц а 2

Коэффициенты теплопроводности материалов

№ п/п	Материал	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/м·°C
1	Кирпич шлаковый	1200	0,37
2	Кирпич шлако-силикатный	1508	0,41
3	Кирпич сухого прессования	1630	0,51
4	Кирпич красный	1790	0,456
5	Кирпич красный	1826	0,528

По результатам эксперимента установлено, что на теплопроводность карбонатно-шлакового материала оказывает влияние удельная поверхность известняка и процентное соотношение компонентов вяжущего (шлак – известняк).

Зависимость коэффициента теплопроводности от удельной поверхности известняка при различном процентном соотношении шлака с известняком представлена на рисунке.



Зависимость коэффициента теплопроводности от удельной поверхности известняка с различным % соотношением компонентов вяжущего

Образцы с большим содержанием шлака показали более низкую теплопроводность, поскольку ее величина у шлака меньше, чем у известняка, в 2,4 раза.

С уменьшением удельной поверхности заполнителя в целом наблюдалось снижение плотности композита, что обуславливает понижение величины теплопроводности соответствующих образцов. С повышением плотности материала его теплопроводящие свойства увеличиваются.

При одинаковом соотношении компонентов вяжущего и одинаковой величине удельной поверхности известняка образцы на шлаковой основе имели в 1,3 раза меньшую теплопроводность по сравнению с образцами на основе портландцемента.

Наименьшую теплопроводность (0,37 Вт/м·°С) имели образцы с плотностью  $\rho = 1610 \text{ кг/м}^3$  следующих составов:

- шлак – 100 % (молотый  $S_{уд} = 300,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ );
- шлак – 70 % (молотый  $S_{уд} = 300,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), известняк – 30 % ( $S_{уд} = 300,0 \text{ м}^2/\text{кг}$ ).

Полученные экспериментальные данные могут использоваться для оценки энергетической эффективности объектов при использовании карбонатно-шлакового композиционного материала в качестве наружной ограждающей конструкции стены на стадии проектирования по методике изложенной в работе [5].

Таким образом, применение карбонатно-шлакового композиционного стенового материала позволило использовать техногенные отходы металлургического производства в качестве вяжущего с добавлением местных наполнителей – известняков. Проведенная оценка теплофизических свойств карбонатно-шлакового материала свидетельствует о его более высоких теплозащитных свойствах, чем у кирпича глиняного обыкновенного. Коэффициент теплопроводности карбонатно-шлакового прессованного материала в зависимости от соотношения компонентов вяжущего и удельной поверхности известняка меняется в пределах 0,37÷0,47 Вт·м/°С; для карбонатно-цементного прессованного материала коэффициент составляет 0,54 Вт·м/°С. При этом термическое сопротивление однородной стены толщиной в два кирпича возрастает с 0,67 м<sup>2</sup>°С/Вт для кирпича глиняного обыкновенного до 1,38 м<sup>2</sup>°С/Вт для стенового материала из карбонатно-шлакового композита, что повышает тепловую защиту здания в целом.



## Выводы:

1. Разработан карбонатно-шлаковый композит, который может использоваться в качестве стенового материала с высокими теплозащитными свойствами.
2. Использование шлака в качестве основного компонента вяжущего в наружных ограждающих конструкциях позволяет утилизировать техногенные отходы металлургических производств.
3. Произведена оценка теплозащитных свойств карбонатно-шлакового композиционного материала.
4. Коэффициент теплопроводности разработанного материала позволяет повысить термическое сопротивление конструкции наружной стены по сравнению с традиционным решением (кирпичом глиняным обыкновенным).
5. Разработанный материал прошел апробацию.

## Список литературы

1. Карбонатно-шлаковые композиционные строительные материалы: монография / В.И. Калашников, О.Л. Викторова, В.Л. Хвастунов, В.С. Демьянова. – Пенза: ПГУАС, 2006. – 234 с.
2. Викторова, О.Л. Экспериментальное обоснование теоретических предпосылок высокой поверхностной реакционной активности карбонатов и формирование прочности карбонатно-цементных и карбонатно-шлаковых вяжущих / О.Л. Викторова // *Science and Civilization*. – 2018. – Т.4. – С.038–044.
3. Хвастунов, В.Л. Экспериментально-теоретические основы получения композиционных вяжущих и строительных материалов из шлаков и высокодисперсных горных пород: дис... докт. техн. наук / В.Л. Хвастунов. – Пенза, 2005. – 534 с.
4. СП 50.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 Тепловая защита здания. – М.: Госстрой России, 2012. – 40 с.
5. Оценка энергетической эффективности зданий при проектировании: монография / О.Л. Викторова, Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина, В.В. Викторова. – Пенза: ПГУАС, 2014. – С.65–79.

## References

1. Carbonate-slag composite building materials: monograph / V.I. Kalashnikov, O.L. Viktorova, V.L. Khvastunov, V.S. Demyanova. – Penza: PGUAS, 2006. – 234 p.
2. Viktorova, O.L. Experimental substantiation of theoretical assumptions of high surface reactivity of carbonates and formation of strength of carbonate-cement and carbonate-slag binders / O.L. Viktorova // *Science and Civilization*. – 2018. – Vol. 4. – P. 038–044.
3. Khvastunov, V.L. Experimental and theoretical bases of production of composite binders and building materials from slag and highly dispersed rocks: Dis... doctor. tech. sciences / V.L. Khvastunov. – Penza, 2005. – 534 p.
4. JV 50.13330.2012. Updated edition SNiP 23-02-2003 Thermal protection of the building. – M.: GosstroyOf Russia, 2012. – 40 p.
5. Evaluation of the energy efficiency of buildings in the design: monograph / O.L. Viktorova, L.N. Petryanina, M.A. Derina, V.V. Viktorova. – Penza: PGUAS, 2014. – P. 65–79.

УДК 519.7: 691

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

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

**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

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

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

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

## ПОЛИНОМИАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ: СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ

И.А. Гарькина, А.М. Данилов

Анализируется эффективность использования полиномиальных моделей в прогнозировании свойств композитов. Отмечается однобокость в исследовании качества материалов: основное внимание уделяется лишь однокритериальной оптимизации ряда выделенных свойств. Крайне редко осуществляется оптимизация обобщенного критерия качества; отсутствие решения многокритериальной оптимизации сводит на нет полученные решения задач однокритериальной оптимизации. Показывается необходимость решения задач многокритериальной оптимизации при противоречивых критериях выбора рецептурно-технологических параметров.

*Ключевые слова: сложные системы, композиты, оценка качества, частные критерии, обобщенный критерий качества, оптимизация свойств*

## POLYNOMIAL MODELS FORECASTING THE PROPERTIES OF COMPOSITES: CONDITION, PROSPECTS

I.A. Garkina, A.M. Danilov

Efficiency of using polynomial models in predicting the properties of composites is analyzed. Inadequacy in the study of the quality of materials is indicated. Main attention is paid only to one-criterion optimization of a number of selected properties. Optimization of the generalized quality criterion is rarely carried out; the absence of a multi-criteria optimization solution negates the obtained solutions of one-criterion optimization problems. There is the urgent need to solve multicriterion optimization problems with conflicting criteria for selecting prescription and technological parameters.

*Keywords: complex systems, composites, quality assessment, partial criteria, generalized quality criterion, property optimization*

Традиционно под *оптимальной системой* понимается *наилучшая в принятом смысле система*. Оценка качества сложной системы в общем случае является *многокритериальной и противоречивой*. В простейшем случае (однокритериальная система) среди всех возможных вариантов системы требуется найти оптимальный (наилучший при принятом критерии, однозначно характеризующий возможный вариант реализации системы). При однокритериальной оптимизации каждому варианту исполнения системы может быть поставлено в соответствие некоторое число. *Цель управления – достижение экстремума критерия оптимальности*. Для многокритериальной системы в общем случае выбранное решение всегда будет компромиссным (противоречивость частных критериев: значения одних критериев улучшаются, а других – ухудшаются).

Обычно в строительном материаловедении аналитические зависимости частных критериев (отдельные свойства) аппроксимируются *полиномиальными моделями*

$$\bar{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots + \varepsilon,$$

где  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  определяются с использованием статистических методов планирования эксперимента;  $\varepsilon$  – случайная величина, учитывающая совокупность ошибок эксперимента. Решаются задачи однокритериальной оптимизации свойств. К сожалению, *очень редко производится многокритериальная оптимизация*; анализируется зависимость лишь отдельных свойств, а не *обобщенного критерия* качества материала.

Свойства материала определяются рецептурно-технологическими параметрами (факторами) [1]; их прогнозирование требует решения двух задач:

- оптимизация параметров принятой модели для выбранного вида критерия качества (*параметрическая идентификация* целевой функции);
- составление интерполяционной модели коэффициентов целевой функции от рецептурно-технологических параметров.

При решении этих задач обычно используются методы математического планирования эксперимента: строятся модели для каждого из частных критериев, определяются интерполяционные полиномы для линий равного уровня (эллипс, гипербола, парабола в двухфакторном пространстве). В частности, зависимость частного критерия  $Z$  от рецептурно-технологических параметров  $X_1, \dots, X_m$  можно описать при их малых изменениях линейной моделью вида

$$Z = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_m X_m. \quad (1)$$

Используя серию измерений величин  $Z, X_j$ , можно определить параметры  $a_i$ . По совокупностям измерений вычисляются  $\bar{Z}$  и  $\bar{X}_j$  – средние значения  $Z, X_j$  для указанных серий измерений.

Введём  $z = Z - \bar{Z}, x = X - \bar{X}$ . Тогда соотношение (1) примет вид

$$z = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_m x_m,$$

или в векторной форме

$$\mathbf{z} = \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{a},$$

где  $\mathbf{x}, \mathbf{a}$  – вектор-столбцы с элементами  $x_j, a_j$  соответственно.

Количество  $r$  последовательных измерений удовлетворяет соотношениям

$$\begin{aligned} \mathbf{z}^{(1)} &= \mathbf{x}^{(1)T} \mathbf{a}, \\ &\vdots \\ \mathbf{z}^{(\mu)} &= \mathbf{x}^{(\mu)T} \mathbf{a}, \\ &\vdots \\ \mathbf{z}^{(r)} &= \mathbf{x}^{(r)T} \mathbf{a}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\mathbf{x}^T (\mu = \bar{1}, r).$$

Введём вектор  $\chi$  и матрицу  $U$  следующим образом:

$$\chi = [z^{(1)} \dots z^{(\mu)} \dots z^{(r)}]^T;$$

$$U = \begin{bmatrix} x^{(1)T} \\ \vdots \\ x^{(\mu)T} \\ \vdots \\ x^{(r)T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & \dots & x_j^{(1)} & \dots & x_m^{(1)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_1^{(\mu)} & \dots & x_j^{(\mu)} & \dots & x_m^{(\mu)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_1^{(r)} & \dots & x_j^{(r)} & \dots & x_m^{(r)} \end{bmatrix}.$$

Тогда система уравнений (2) может быть записана в векторной форме:

$$\chi = Ua. \tag{3}$$

Предполагая, что компоненты вектора  $a$  в уравнении (3) являются оценками  $\hat{a}$  истинного вектора  $a$ , можно с помощью уравнения (3) получить такие оценки  $\hat{\chi}$  вектора  $\chi$ , что

$$\hat{\chi} = U\hat{a}.$$

Легко показать, что наилучшая в смысле наименьших квадратов оценка  $\hat{a}$  вектора  $a$  удовлетворяет уравнению

$$U^T U \hat{a} = U^T \chi,$$

так что

$$\hat{a} = (U^T U)^{-1} U^T \chi = [\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m]^T,$$

что и позволяет построить процедуру идентификации вектора  $a$  на основе линейной регрессии и метода наименьших квадратов. Отметим, что матрица  $(U^T U)^{-1}$  существует только тогда, когда матрица  $U$  не является особенной.

Число измерений  $r$  должно быть больше числа идентифицируемых параметров ( $r \geq m$ ). Если  $r = m$ , то в оценке  $\chi$  шум измерений не будет сглажен. Поэтому для адекватной идентификации требуется, по крайней мере,  $m + 1$  измерение, причём в течение этого периода система предполагается стационарной.

Так, указанным подходом [2, 3] определялась зависимость предела прочности при сжатии  $R_{сж}$  от твёрдости  $T$  и модуля деформации  $E$  эпоксидных композитов по данным эксперимента (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

$Z$	117	100	120	57	99	102	79	64	74	87
$X_1$	6,01	5,05	6,15	2,94	5,06	5,23	4,05	3,40	3,79	4,44
$X_2$	$3,62 \cdot 10^4$	$4,71 \cdot 10^4$	$3,51 \cdot 10^4$	$1,06 \cdot 10^4$	$4,71 \cdot 10^4$	$4,48 \cdot 10^4$	$6,57 \cdot 10^4$	$8,52 \cdot 10^4$	$7,25 \cdot 10^4$	$5,71 \cdot 10^4$

Принято:  $X_1 = T, X_2 = E, Z = R_{сж}$ .

Имеем:  $\bar{X}_1 = 4,61; \bar{X}_2 = 5,01 \cdot 10^4; \bar{Z} = 89,9$ .

Для центрированных значений переменных данные эксперимента приводятся в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

$Z$	27,1	10,1	30,1	-32,9	9,1	12,1	-10,9	-25,9	-15,9	-2,9
$X_1$	1,40	0,44	1,54	-1,67	0,45	0,62	-0,56	-1,21	-0,82	-0,17
$X_2$	$-1,39 \cdot 10^4$	$-0,3 \cdot 10^4$	$-1,5 \cdot 10^4$	$-3,95 \cdot 10^4$	$-0,3 \cdot 10^4$	$-0,53 \cdot 10^4$	$1,56 \cdot 10^4$	$3,51 \cdot 10^4$	$2,24 \cdot 10^4$	$0,7 \cdot 10^4$

В соответствии с предыдущим значение  $z^{(\mu)}$  при  $\mu$ -измерении

$$z^{(\mu)} \approx a_1 x_1^{(\mu)} + a_2 x_2^{(\mu)},$$

и для параметров линейной модели будем иметь:

$$\hat{\mathbf{a}} = (\hat{a}_1, \hat{a}_2) = (19,1; -1,26 \cdot 10^{-5}).$$

Окончательно получим

$$R_{\text{сж}} = 2,48 + 19,1 T - 1,26 \cdot 10^{-5} E.$$

Как видим, относительная ошибка вычисления по модели  $R_{\text{сж}}$  не превышает приблизительно 1 %. Одновременно отметим, что исходная таблица измерений обладает избыточностью (достаточно знания одного из двух параметров  $R_{\text{сж}}$  или  $T$ ). При этом  $R_{\text{сж}}$  и  $T$  практически от  $E$  не зависят.

Заметим, предлагаемая методика в основном ориентирована на изучение *свойств материалов в локальных областях* факторного пространства. Метод легко обобщается и на случай систем со многими входами и выходами, а также на случай идентификации динамических процессов, описываемых нормальной системой обыкновенных дифференциальных уравнений.

Все вычислительные процедуры сводятся к простому вычислению неизвестных коэффициентов с доступностью математических выводов. Недостатки определяются чувствительностью оценок метода наименьших квадратов к резким выбросам, встречающимся в экспериментальных данных. Естественно, всегда предполагается, что используемая в ходе регрессионного анализа форма связи наилучшим образом отражает зависимость выходных переменных  $Z$  от факторной переменной  $X$ .

В заключение приведем пример многокритериального синтеза эпоксидных композитов повышенной плотности.

Использование математических методов планирования эксперимента позволило получить следующие аналитические зависимости средней плотности  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, и предела прочности  $R_{\text{сж}}$ , Мпа, на сжатие образцов 20×20×20 см:

$$\rho(X_1, X_2) = 3642,8 - 129,1X_1 + 668,5X_2 + 53,2X_1X_2 - 513,7X_2^2,$$

$$R_{\text{сж}}(X_1, X_2) = 118,5 - 19,5X_1 + 20,9X_2 - 3,2X_2^2,$$

где  $X_1, X_2$  – кодированные значения соответственно концентрации  $x_1$  пластификатора (в % от массы смолы) и степени наполнения  $x_2$  (П:Н по массе);  $x_{10} = 25, I_1 = 25; x_{20} = 1/7, I_{2H} = 5$ . Линиями уровня  $\rho(X_1, X_2) = \text{const}$  и  $R_{\text{сж}}(X_1, X_2) = \text{const}$  являются соответственно ветви гиперболы и параболы (квадратичные модели целевых функций). В качестве оптимальных значений факторов будут:  $x_1 = 2,5; x_2 = 10,2$  (им соответствуют значения плотности  $\rho = 3955$  кг/м<sup>3</sup> и предела прочности  $R_{\text{сж}} = 145$  МПа).

Аналогично решается задача и в случае большего числа переменных и частных критериев качества [4...9].

### Список литературы

1. Гарькина, И.А. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2018. – №1–2. – С.60–63.
2. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: МГСУ: Библиотека научных разработок и проектов, 2012. – 432 с.
3. Данилов, А.М. Математическое и компьютерное моделирование сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, Э.Р. Домке. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 296 с.
4. Данилов, А.М. Методология проектирования сложных систем при разработке материалов специального назначения / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 1. – С. 80–85.

5. Гарькина, И.А. Опыт разработки композиционных материалов: некоторые аспекты математического моделирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 8 (656). – С. 28–33.
6. Гарькина, И.А. Формализация оценки структуры и свойств композиционных материалов специального назначения / И.А. Гарькина // Строительные материалы. – 2007. – № 1. – С. 70–72.
7. Garkina, I.A. Modeling of kinetic processes in composite materials / I.A. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8. – № 9. – P. 421–425.
8. Garkina, I.A. Modeling of building materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, Y.P. Skachkov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 730. – P. 412.
9. Данилов, А.М. Математическое моделирование сложных систем: состояние, перспективы, пример реализации / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 2. – С. 333–337.

### References

1. Garkina, I.A. Evolution of the concept of composite materials from the standpoint of changing paradigms / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Construction materials. – 2018. – №1–2. – P. 60–62.
2. The system analysis in construction materials science: monograph / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – M.: MGSU: Library of scientific developments and projects, 2012. – 432 p.
3. Danilov, A.M. Mathematical and computer modeling of difficult systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina, E.R. Domke. – Penza: PGUAS, 2011. – 296 p.
4. Danilov, A.M. Methodology of design of difficult systems when developing materials of a special purpose / A.M. Danilov, I.A. Garkina // News of higher educational institutions. Construction. – 2011. – №1. – P. 80–85.
5. Garkina, I.A. Experience of development of composite materials: some aspects of mathematical modeling / I.A. Garkina, A.M. Danilov // News of higher educational institutions. Construction. – 2013. – № 8 (656). – P. 28–33.
6. Garkina, I.A. Formalization of assessment of structure and properties of composite materials of a special purpose / I.A. Garkina // Construction materials. – 2007. – № 1. – P. 70–72.
7. Garkina, I.A. Modeling of kinetic processes in composite materials / I.A. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8. – № 9. – P. 421–425.
8. Garkina, I.A. Modeling of building materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, Y.P. Skachkov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 730. – P. 412.
9. Danilov, A.M. Mathematical modeling of difficult systems: state, prospects, example realization / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Herald of Civil Engineers – 2012. – № 2. – P. 333–337.

УДК 519.7: 691

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

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

**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

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

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

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

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ

И.А. Гарькина, А.М. Данилов

Предлагаются эффективные методы аппроксимации кинетических процессов формирования физико-механических характеристик композиционных материалов для решения задач как однокритериальной, так и многокритериальной оптимизации их структуры и свойств. Подробно рассматривается аппроксимация кинетических процессов на заданном интервале с определением частичных интервалов аппроксимации максимальной длины. Приводится алгоритм аппроксимации кубическими сплайнами. Для определения передаточных функций композитов как динамических систем со многими входами и выходами рекомендуется использовать полиномы Лагерра. Не исключается возможность и когнитивного подхода при непосредственном подборе вида аппроксимирующей функции.

*Ключевые слова:* композиционные материалы, свойства, кинетические процессы, параметры, аппроксимация, методы

## FORMALIZATION THE PROCESSES OF COMPOSITES PROPERTIES FORMATION

I.A. Garkina, A.M. Danilov

Effective methods are proposed for approximating the kinetic processes formation of physical and mechanical characteristics of composite materials for solving the problems of both single-criterion and multi-criteria optimization of their structure and properties. The approximation of kinetic processes on a given interval with definition of partial intervals of the maximum length approximation is considered in detail. An approximation algorithm on cubic splines is given. To determine the transfer functions of composites, as dynamic systems with many inputs and outputs, it is recommended to use Laguerre polynomials. The possibility of a cognitive approach is not excluded with direct selection of the form of the approximating function.

*Keywords:* composite materials, properties, kinetic processes, parameters, approximation, methods

Можно считать общепринятым подход к оптимизации структуры и свойств композиционных материалов по аналитическому описанию кинетических процессов формирования их физико-механических характеристик. Среди целого ряда методов аппроксимации этих процессов особое место в силу его простоты занимает кусочно-линейная аппроксимация, как правило, с равномерным шагом. Однако во многих

случаях целесообразна разбивка кинетических процессов на отдельные участки, исходя из обеспечения *максимальной длины участков аппроксимации*. В качестве параметров кинетических процессов могут использоваться различные характеристики, интегрально определяющие процессы формирования свойств [1...4]. Часто выход параметров на эксплуатационное значение носит экспоненциальный аperiodический характер (рис. 1).

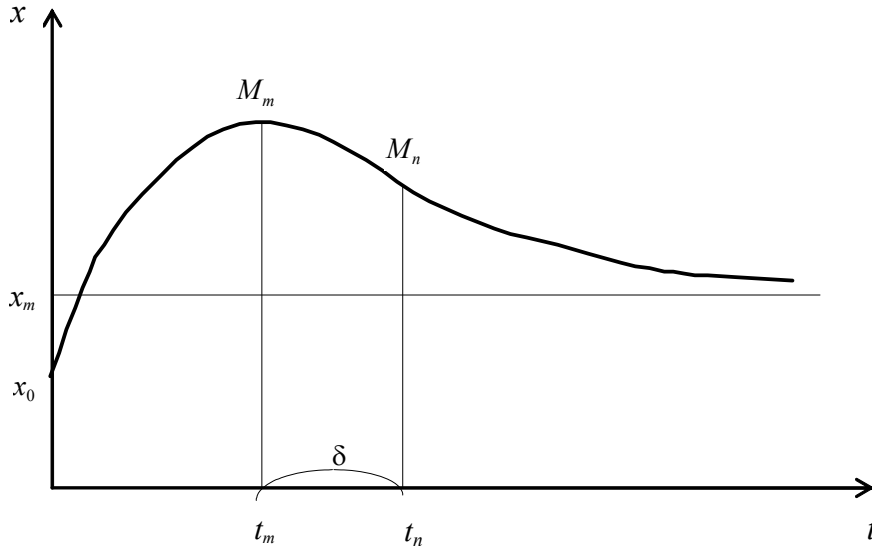


Рис. 1. Аperiodический кинетический процесс

Ниже предлагается алгоритм *кусочно-линейной аппроксимации кинетического процесса*  $f(x)$  с интервалами максимальной длины на отрезке  $[a, b]$ .

*Ввод данных.* Задается интервал  $[a, b]$ , относительная погрешность аппроксимации  $\varepsilon_0$  в процентах. Функция  $f(x)$  реализуется в виде программы вычисления ее значений в любой точке  $x \in [a, b]$  или хотя бы в точках  $x_j, j = \overline{0, N}; x_0 = a, x_N = b$ , таких, что

$$|f_j - f_{j-1}| \leq \frac{2\varepsilon_0}{1000} f_{cp}; f_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |f_j|, f_j = f(x_j).$$

Реализация алгоритма осуществлялась по табличным значениям  $\{x_j, f_j\}_{j=0}^N$  при абсолютной погрешности  $\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{100} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |f_j|$  при плотности табулирования  $|f_j - f_{j-1}| \leq 0,2\varepsilon$ .

*Табулирование.* Здесь реализована программа получения информации. Использовался нижеприведенный алгоритм.

Для  $h = 0,04(b - a)$ ,  $N = \frac{b - a}{h}$  вычисляются:

$$x_j = a + jh,; f_j = f(x_j), j = \overline{0, N}; \varepsilon_h = \max_{1 \leq j \leq N} |f_j - f_{j-1}|; f_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |f_j|; \varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{100} f_{cp}.$$

При  $\varepsilon_h > 0,2\varepsilon$  в два раза уменьшалось значение  $h$ .



Кусочно-линейная аппроксимация. Аппроксимирующая функция  $\tilde{f}(x)$  представлялась в виде

$$\tilde{f}(x) = A_r + K_r(x - z_r), z_r \leq x \leq z_{r+1}, r = \overline{0, N_a - 1},$$

причем  $z_0 = x_0, z_{N_a} = x_N, \tilde{f}(z_r) = f(z_r); |\tilde{f}(x) - f(x)| \leq \varepsilon$  для  $x \in [a, b]$ .

Функция  $\tilde{f}(x)$  определяется таблицей  $\{z_r, A_r, K_r\}_{r=0}^{N_a}$ ;  $z_r$  – узлы,  $N_a$  – число узлов,  $H_r = z_{r+1} - z_r$  – интервалы аппроксимации,  $K_r$  – угловые коэффициенты,  $z_0 = x_0, A_0 = f_0, A_{r+1} = A_r + K_r H_r$  (непрерывность  $\tilde{f}(x)$ ).

Таким образом, кусочно-линейная аппроксимация определяется параметрами  $K_r, H_r, r \geq 0$ . Максимальность  $H_r$  определяется выбором точки  $z_{r+1}, r \geq 0$ , максимально удаленной от  $z_r$ ;  $|\tilde{f}(x) - f(x)| \leq \varepsilon, x \in [z_r, z_{r+1}]; \tilde{f}(x) = f(x), \tilde{f}(z_{r+1}) = f(z_{r+1})$ .

Вычисление  $z_r, A_r, K_r$ . Принимается  $z_0 = x_0, A_0 = f_0$ . По вычисленным значениям  $z_r, A_r$  находятся  $z_{r+1}, H_r = z_{r+1} - z_r, A_{r+1} = f(z_{r+1}), K_r = \frac{A_{r+1} - A_r}{H_r}$  (точка  $z_{r+1}$  является одной из точек табулирования  $x_j$ ).

Алгоритм вычисления  $z_{r+1}$  сводится к выбору точки табулирования  $x_j > z_r$  с учетом условия

$$\max_{j_r < i < j} \left| f_i - A_r - \frac{f_j - A_r}{x_j - z_r} (x_i - z_r) \right| \leq \varepsilon; \quad (1)$$

$j_r$  – номер точки табулирования  $x_{j_r}$ , соответствующей  $z_r (z_r = x_{j_r})$ .

Как только при некотором  $j$  условие (1) нарушится, то запоминаем  $x_j$  как  $z_{r+1}^0$  (номер запоминается как  $j_{r+1}^0$ ) и принимается  $K_r^0 = \frac{f_j - A_r}{x_j - z_r}, A_{r+1}^0 = f_j$ . Далее проверяется условие (1) для  $x_j > z_{r+1}^0$ .

Если  $\forall x_j \in (z_{r+1}^0, x_N]$  условие (1) не выполнено, принимается  $z_{r+1} = z_{r+1}^0, A_{r+1} = A_{r+1}^0, K_r = K_r^0, j_{r+1} = j_{r+1}^0$  и переходим к вычислению  $z_{r+2}$ .

Если для некоторого  $x_j \in (z_{r+1}^0, x_N]$  выполняется условие (1), то осуществляется переход к предыдущему этапу ( $r$  не увеличивается).

Так будут определены все триады  $\{z_r, A_r, K_r\}_{r=0}^{N_a-1}$ . В последней триаде  $\{z_{N_a}, A_{N_a}, K_{N_a}\}$  достаточно вычисления  $z_{N_a} = z_{r+1} = x_N, K_r = K_{N_a-1}$ .

Заметим, если  $f(x)$  удовлетворяет условию  $|f(x)| \geq \alpha \forall x \in [a, b]$ , то вместо условия (1) (используется усредненная относительная погрешность  $\bar{\varepsilon}_o = \frac{|\tilde{f} - f|}{f_{cp}} 100\%$ ) можно воспользоваться и условием

$$\max_{j_r \leq i \leq j} \left| f_i - A_r - \frac{f_j - A_r}{x_j - z_r} (x_i - z_r) \right| \leq \frac{\varepsilon_0}{100} |f_i|.$$

Если при выполнении условия (1)  $x_j = x_N$ , то

$$z_{N_a} = z_{r+1} = x_N, K_r = K_{N_a-1} = \frac{f_N - A_r}{x_N - z_r};$$

вычисления завершаются.

Приведем и другой возможный вариант аппроксимации кинетического процесса, основанный на использовании *интерполяции многочленами на отдельных участках*, а не на основе построения глобального интерполяционного многочлена на всём промежутке. Получаемые при этом гладкие кусочно-многочленные функции (составленные из многочленов *одной и той же степени*) являются *сплайнами*. Ограничимся *кубическими сплайнами* (составлен из *многочленов третьей степени*). Ниже предлагается алгоритм построения *кубических сплайнов* класса  $C^2$  (дважды непрерывно дифференцируемые функции).

Здесь предполагается, что на отрезке  $[a, b]$  в узлах сетки  $\omega\{a = x_1 < x_2 < \dots, x_N = b\}$  заданы значения функции  $f(x) : f_i = f(x_i), i = \overline{1, N}$ . По предыдущему *интерполяционный кубический сплайн*  $S(x)$  должен удовлетворять условиям:

$$S(x_i) = f_i, S'(x_i) = f'(x_i), S''(x_i) = f''(x_i). \quad (2)$$

Кубический сплайн  $S(x)$  на каждом из отрезков  $[x_i, x_{i+1}]$  определяется четырьмя коэффициентами; для его построения на всём промежутке  $[a, b]$  требуется определить  $4 \cdot N$  коэффициента. Из условия принадлежности сплайна классу  $C^2$  предполагается непрерывность во всех внутренних узлах интерполяции  $x_i, i = \overline{1, N-1}$  не только сплайна  $S(x)$ , но и его производных  $S'(x)$  и  $S''(x)$ . Из этих условий получим  $3(N-1)$  уравнений для определения неизвестных коэффициентов сплайна. Добавив  $N+1$  уравнение из (2), будем иметь  $4N-2$  уравнения; два недостающих уравнения получим из *краевых условий* (ограничения на значения сплайна и его производных на концах промежутка  $[a, b]$ ). Наиболее употребительны следующие краевые условия:

- I.  $S'(a) = f'(a), S'(b) = f'(b)$ .
- II.  $S''(a) = f''(a), S''(b) = f''(b)$ .
- III.  $S^k(a) = S^k(b), k = 1, 2$ .
- IV.  $S'''(x_p + 0) = S'''(x_p - 0), p = \overline{1, N-1}$ .

(так называемые “естественные” условия имеют вид:  $S'(a) = 0, S''(b) = 0$ ).

На каждом из промежутков  $[x_i, x_{i+1}]$  сплайн представим не в общем виде

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

а в некотором специальном, позволяющем уменьшить число неизвестных коэффициентов сплайна. Для этого введём обозначения:

$$S'(x_i) = m_i, i = \overline{0, N}; h_i = x_{i+1} - x_i, t = \frac{x - x_i}{h_i}.$$

На отрезке  $[x_i, x_{i+1}]$  кубический сплайн можно записать в виде

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

На каждом из промежутков  $[x_i, x_{i+1}]$  он непрерывен вместе со своей первой производной всюду на  $[a, b]$ . Выберем параметры таким образом, чтобы и вторая

производная была непрерывна во всех внутренних узлах. Получим следующую систему уравнений:

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

где

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

К уравнениям (3) следует добавить уравнения

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

полученные из граничных условий.

Задача построения кубического сплайна свелась к решению линейной системы для неизвестных коэффициентов  $m_i$ :

$$\begin{aligned} 2m_0 + m_1 &= 3 \frac{f_1 - f_0}{h_0}, \\ \lambda_i m_{i-1} + 2m_i + \mu_i m_{i+1} &= 3 \left( \mu_i \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i} + \lambda_i \frac{f_i - f_{i-1}}{h_{i-1}} \right), \\ m_{N-1} + 2m_N &= 3 \frac{f_N - f_{N-1}}{h_{N-1}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Нами при решении практических задач система (4) решалась *методом прогонки* (трехдиагональность матрицы системы).

При решении целого ряда задач по изучению композиционных материалов как нестационарных динамических систем возникает необходимость аппроксимации не только входных и выходных сигналов («черный ящик»), но и определение вида частных передаточных функций (параметры связи выходных сигналов с входными). Нами для этого использовалось разложение кинетического процесса по различным ортонормированным системам специальных функций, предпочтение отдавалось полиномам Лаггера [5]:

$$L_n(t) = \sum_{v=0}^n \frac{n!(-t)^v}{(v!)^2(n-v)!}; \quad \int_0^{\infty} L_n(t)L_m(t)e^{-t}dt = \begin{cases} 0 & \text{при } m \neq n \\ 1 & \text{при } m = n \end{cases},$$

так как в этом случае передаточная функция  $W(p)$  легко определяется как дробно-

рациональная функция  $\frac{Y(p)}{X(p)}$  с простыми правилами вычисления коэффициентов.

При решении практических задач важную роль играет и человеческий фактор: выбор вида аппроксимирующей функции часто определяется интуицией экспериментатора. Так, по данным таблицы нами определялась аналитическая зависимость вязкости  $B$  эпоксидного композита от температуры  $t$ , °С, и процентного содержания  $x$ , %, специальной добавки.

$t \backslash x$	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
0	172	119	84	65	50	40	30	25	22	20	19
1	210	145	105	80	65	52	43	35	30	27	25
5	250	160	115	90	75	60	48	40	33	30	28
10	97	65	45	33	22	17	13	10	11	9	8
15	132	91	62	47	36	30	21	18	17	15	12

Исходя из когнитивного анализа, аппроксимирующая функция задавалась в виде  $B = B(x, t)$ . Функция  $B = B(x, t = \text{const})$  представлялась в виде полинома третьей степени, а  $B = B(x = \text{const}, t)$  – функциями вида  $y = ae^{-kt}$ ,  $k = k(x)$  при различных степенях полинома. По этим результатам было получено представление

$$B = (c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3)e^{r(x)(t-50)}, 50 \leq t \leq 100.$$

Предложенные методы прошли апробацию при разработке ряда композиционных материалов специального назначения [6, 7].

### Список литературы

1. Garkina, I.A. Modeling of kinetic processes in composite materials / I.A. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8. – № 9. – P. 421–425.
2. Garkina, I.A. Mathematical Methods of System Analysis in Construction Materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – №245. – P.062014.
3. Garkina, I.A. Analytical design of building materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol.18. – Issue 2. – P. 95–99.
4. Гарькина, И.А. Опыт разработки композиционных материалов: некоторые аспекты математического моделирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 8 (656). – С. 28–33.
5. Бейтмен, Г. Высшие трансцендентные функции / Г.Бейтмен, А.Эрдейи. – М.: Наука, 1973. – Т. 2. – 297 с.
6. Данилов, А.М. Методология проектирования сложных систем при разработке материалов специального назначения / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 1. – С. 80–85.
7. Гарькина, И.А. Опыт разработки композиционных материалов: некоторые аспекты математического моделирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 8 (656). – С. 28–33.

### References

1. Garkina, I.A. Modeling of kinetic processes in composite materials / I.A. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8. – № 9. – P. 421–425.
2. Garkina, I.A. Mathematical Methods of System Analysis in Construction Materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – №245. – P.062014.
3. Garkina, I.A. Analytical design of building materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol.18. – Issue 2. – P. 95–99.
4. Garkina, I.A. Experience of development of composite materials: some aspects of mathematical modeling / I.A. Garkina, A.M. Danilov // News of higher educational institutions. Construction. – 2013. – No. 8 (656). – P.28–33.
5. Beytmen, G. The highest transcendental functions / G. Beytmen, A. Erdeyi. – M.: Science, 1973. – Vol. 2. – 297 p.
6. Danilov, A.M. Methodology of design of difficult systems when developing materials of a special purpose / A.M. Danilov, I.A. Garkina // News of higher educational institutions. Construction. – 2011. – №. 1. – P. 80–85.
7. Garkina, I.A. Experience of development of composite materials: some aspects of mathematical modeling / I.A., Garkina A.M. Danilov // News of higher educational institutions. Construction. – 2013. – №. 8 (656). – P. 28–33.

УДК 691.554

*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

**Демьянова Валентина Серафимовна**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Инженерная экология»

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

**Фролов Михаил Владимирович**,  
аспирант кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: mihail-frolovv@yandex.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

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

**Dem'yanova Valentina Serafimovna**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Engineering ecology»

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

**Frolov Mikhail Vladimirovich**,  
Postgraduate student of the department  
«Quality management and construction  
technologies»  
E-mail: mihail-frolovv@yandex.ru

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОМПОНЕНТОВ ПРИ СОЗДАНИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

В.И. Логанина, В.С. Демьянова, Г.А. Фокин, М.В. Фролов

Обоснована возможность снижения теплопроводности теплоизоляционных отделочных покрытий, в состав которых входят в качестве наполнителя зольные микросферы алюмосиликатные и стеклянные полые микросферы. Рассмотрен механизм передачи тепла через теплоизоляционные композиты в зависимости от вида использованного наполнителя. Выявлено, что способность отделочного покрытия отражать тепло не зависит от вида используемого наполнителя. Установлено, что конвективная составляющая теплопереноса не оказывает значительного влияния на теплозащитные качества рассматриваемых отделочных покрытий.

*Ключевые слова: теплоизоляционные сухие строительные смеси, наполнители, активность, коэффициент теплопроводность, плотность упаковки*

## SUBSTANTIATION OF COMPONENTS SELECTION AT THERMAL INSULATING DRY BUILDING MIXTURES PRODUCTION

V.I. Loganina, V.S. Dem'yanova, G.A. Fokin, M.V. Frolov

The possibility of reducing thermal conductivity of heat-insulating finishing coatings using ash microspheres of aluminosilicate and glass hollow microspheres as a filler is substantiated. A mechanism of heat transfer through heat-insulating composites is considered, depending on the type of a used filler. It is revealed that the ability of the finishing coat to reflect heat does not depend on the type of a used filler. It is established that the convective component of heat transfer does not significantly influence the heat-shielding qualities of the considered finishing coatings.

*Keywords: heat-insulating dry building mixtures, fillers, activity, thermal conductivity coefficient, packing density*

В настоящее время наиболее распространенными минеральными наполнителями для теплоизоляционных сухих строительных смесей (ССС) являются вспученный вермикулитовый песок и вспученный перлитовый песок [1–4]. Однако данные наполнители обладают высокой открытой микропористостью, что приводит к увеличению водопотребности отделочных составов. Следствием этого является расслаивание отделочных составов, уменьшение водостойкости и прочности композитов на их основе. К снижению прочности композитов также приводит неравномерное распределение концентраций напряжений вокруг частиц наполнителей из-за их сложной неизометрической формы.

В связи с этим перспективным является использование наполнителей с закрытой пористостью, что обеспечит низкую водопотребность штукатурных отделочных составов с их применением. К таким наполнителям можно отнести стеклянные полые микросферы и зольные микросферы алюмосиликатные [5–7]. Использование в качестве наполнителя для ССС микросфер позволяет повысить водостойкость получаемых растворных композитов за счет снижения в них объема открытых пор. Полученные композиты также характеризуются повышенной прочностью благодаря отсутствию неравномерного распределения концентраций напряжений вокруг частиц микросфер.

Недостатком существующих на данный момент теплоизоляционных ССС, использующих в составе микросферы, является низкая паропроницаемость получаемых при их использовании покрытий [8]. Данный недостаток ограничивает использование цементных ССС, наполненных микросферами, в качестве наружной отделки. Это связано с тем, что для минимизации количества конденсирующейся влаги в толще стены каждый последующий слой в конструкции ограждения в направлении от внутренней поверхности к наружной должен обладать меньшей теплопроводностью и большим паропроницанием по сравнению с предыдущим. Например, в случае использования цементных ССС, наполненных микросферами, для наружной отделки газобетона марок D400-D600 теплопроводность таких покрытий может быть ниже или близка к теплопроводности газобетона, но паропроницаемость этих покрытий будет в несколько раз ниже паропроницаемости газобетона. В результате в зимний период времени в газобетонных ограждениях, отделанных цементными ССС, наполненными микросферами, под поверхностью отделочного покрытия может скапливаться влага, что может вызвать отслоение его фрагментов и появление на нем сетки из мелких волосяных трещин [9, 10].

Повысить паропроницаемость теплоизоляционных ССС можно за счет замены цемента на известь-пушонку. Растворные композиты на основе известкового вяжущего обладают значительно большей паропроницаемостью. Также меньшая плотность известкового вяжущего по сравнению с цементом позволит уменьшить плотность получаемых теплоизоляционных композитов, тем самым увеличивая их теплоизоляционные свойства. Для повышения водостойкости предложены добавки на основе синтезированных гидросиликатов, аморфных алюмосиликатов [11–13].

Нами проведены сравнительные испытания различных наполнителей в составе теплоизоляционных ССС. Применяли вспученный вермикулитовый и вспученный перлитовый песок, а также полые стеклянные микросферы и зольные микросферы алюмосиликатные.

Для выбора наиболее эффективного наполнителя исследовали процесс теплопереноса через отделочное покрытие. Тепло через отделочный слой наружных стен зданий передается 3 способами: излучением, теплопроводностью, конвекцией. В пустотах внутри штукатурного слоя и вблизи поверхности наружного ограждения преобладает теплоперенос посредством конвекции и излучения [14, 15]. В самом материале штукатурного покрытия тепло в основном передается посредством теплопроводности [16]. Учитывая, что теплопроводность штукатурных покрытий в значительной степени зависит от их поровой структуры, были проведены исследования изменения структуры порового пространства растворных композитов.

При использовании вспученного вермикулитового песка и вспученного перлитового песка общая пористость растворных композитов увеличивается с 60,8 % до

80,2 % и 72,4 % соответственно. Увеличение общей пористости в этих композитах происходит в основном за счет роста количества открытых пор, образующихся из-за высокой водопотребности данных наполнителей. Открытая пористость растворных композитов, наполненных вспученным вермикулитовым песком, увеличивается с 40,7 до 53,1 %, наполненных вспученным перлитовым песком, – с 40,7 до 47,7 %. Рост закрытой пористости менее значителен и происходит за счет высокой микропористости данных наполнителей.

Наполнение растворного композита полыми стеклянными микросферами позволяет повысить общую пористость с 60,8 до 81,0 %, а наполнение зольными микросферами алюмосиликатными – с 60,8 до 67,2 %. Рост общей пористости при использовании микросфер происходит за счет увеличения закрытой пористости из-за полной структуры данных наполнителей. Закрытая пористость композитов, наполненных полыми стеклянными микросферами, увеличивается с 20,1 до 56,9 %, композитов, наполненных зольными микросферами алюмосиликатными, – с 20,1 до 40,0 %. Растворные композиты, наполненные микросферами, характеризуются меньшей открытой пористостью по сравнению с контрольными композитами.

В дальнейших исследованиях все наполнители брались в количестве 40 % от массы известки, т.к. при содержании наполнителей более 40 % значительно ускоряется рост водопотребности растворов, полученных с использованием вспученного вермикулитового и перлитового песка, что может привести к значительному снижению прочности композитов.

Установлено, что композиты, полученные с применением полых стеклянных микросфер, обладают более низкой теплопроводностью по сравнению с композитами, полученными с применением других наполнителей. Теплопроводность в сухом состоянии композитов, наполненных стеклянными полыми микросферами, составляет  $\lambda=0,105$  Вт/м·К, наполненных вспученным вермикулитовым песком  $-\lambda=0,140$  Вт/м·К, наполненных вспученным перлитовым песком  $-\lambda=0,155$  Вт/м·К, наполненных зольными микросферами алюмосиликатными  $-\lambda=0,165$  Вт/м·К.

Степень замкнутости пор и размер пор оказывают влияние на конвективную составляющую теплопереноса в строительном материале. В сообщающихся друг с другом крупных порах возникают потоки воздуха, увеличивающие конвективную составляющую теплопереноса и ухудшающие теплоизоляционные свойства материала. Согласно [17] конвективная составляющая теплопереноса в пористом материале начинает существенно влиять на его теплозащитные качества при критическом значении критерия Рэлея  $Ra_{кр} > 40$ . В работе [18] показано, что в ходе эксплуатации материалов реальная величина критерия Рэлея  $Ra_{кр}$  значительно ниже 40. Это означает, что конвективная составляющая теплопереноса не оказывает значительного влияния на теплозащитные качества рассматриваемых композитов и её можно не учитывать.

Для оценки способности штукатурных покрытий противостоять переносу тепла за счет теплового излучения были определены коэффициенты излучения  $\epsilon$  исследуемых композитов при помощи тепловизора Testo 882 и электронного термометра ТЭН-5 [19].

Установлено, что коэффициент излучения  $\epsilon$ , а следовательно, и способность исследуемых растворных композитов отражать тепло не зависят от используемого наполнителя. Для всех исследуемых композитов коэффициент излучения составил  $\epsilon=0,93$ .

Пуццоланическая активность является одной из характеристик, позволяющих оценивать эффективность использования наполнителей в составе ССС. Действие пуццоланического эффекта в известковых ССС проявляется в химическом взаимодействии аморфного кремнезема, содержащегося в наполнителе, с известью. При этом в получаемых покрытиях образуются низкоосновные гидросиликаты кальция, упрочняющие растворные композиты.

Нами была оценена пуццоланическая активность 4 исследуемых высокопористых наполнителей. Определяли количество поглощенного  $Ca(OH)_2$  различными наполнителями из известкового раствора в зависимости от времени проведения эксперимента.

Высокая пуццоланическая активность стеклянных полых микросфер, составляющая 313,0 мг/г, вызвана большим содержанием  $\text{SiO}_2$  в данном наполнителе (73,0 %), при этом значительная часть  $\text{SiO}_2$  содержится в стенках микросфер в аморфном кремнеземе [20, 21]. Меньшая, чем у стеклянных полых микросфер, пуццоланическая активность зольных микросфер алюмосиликатных, составляющая 68,2 мг/г, объясняется меньшим содержанием  $\text{SiO}_2$  в данном наполнителе (55,0 %) и меньшей удельной поверхностью частиц данного наполнителя. Удельная поверхность полых стеклянных микросфер составляет 1142,9 м<sup>2</sup>/кг, удельная поверхность зольных микросфер алюмосиликатных – 131,1 м<sup>2</sup>/кг. Вспученный перлитовый песок характеризуется довольно высокой пуццоланической активностью (147,7 мг/г), что вызвано высоким содержанием в нем  $\text{SiO}_2$  – 73,9 %. Низкая пуццоланическая активность всученного веркмикулитового песка, составляющая 35,6 мг/г, объясняется меньшим, чем у других исследуемых наполнителей, содержанием  $\text{SiO}_2$  – 40,6 %.

Эксперимент по определению пуццоланической активности стеклянных полых микросфер продолжали до тех пор, пока количество гидроксида кальция, поглощенного наполнителем, не переставало изменяться. Стеклянные полые микросферы продолжали активно поглощать  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  вплоть до 70 сут, затем скорость поглощения замедлилась, и к 90 сут активность достигла 480,5 мг/г.

Для исследования возможных новообразований на поверхности стеклянных полых микросфер были сделаны их электронно-микроскопические снимки с помощью электронного микроскопа VEGA3 TESCAN до и после проведения эксперимента (рис. 1).

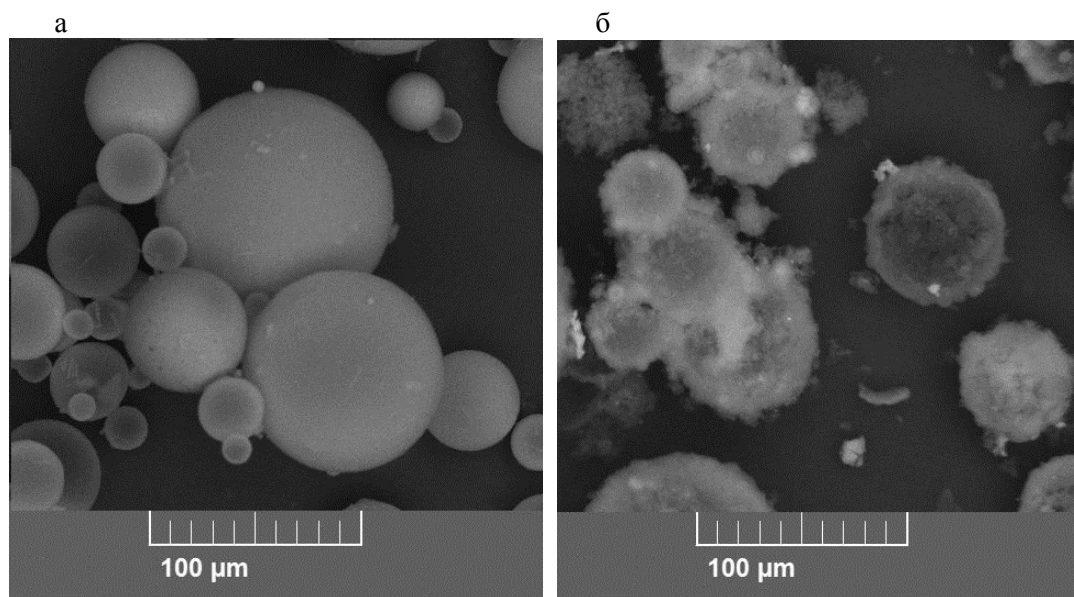


Рис. 1. Электронно-микроскопический снимок стеклянных полых микросфер:  
а – до эксперимента по определению активности наполнителей;  
б – после эксперимента по определению активности наполнителей

Как известно, стеклянные полые микросферы представляют собой замкнутые газонаполненные шарики разного диаметра практически идеальной сферической формы. Эти шарики имеют четко выраженные границы. На снимке наполнителя, сделанном после проведения эксперимента по определению пуццоланической активности, не наблюдается четкой границы у стеклянных микросфер. Новообразования на поверхности микросфер предположительно являются гидросиликатами кальция, образовавшимися в результате реакции гидроксида кальция и аморфного кремнезема, содержащегося в стенках микросфер.

Для определения оптимального содержания наполнителя необходимо решить геометрическую задачу о максимальном заполнении пространства шарами микросфер. В работах [22, 23] предложено 2 решения, позволяющих добиться максимального



процента занятого пространства. Для решеток гексагонального и гранецентрированного кубических типов плотность упаковки равна  $\eta_1=0,7405$ .

Рассмотрим модель композита, состоящего из вяжущего и микросфер. Рассматриваемая модель построена на основании следующего положения: частицы вяжущего имеют одинаковые размеры, микросферы имеют одинаковые размеры и разделены между собой прослойкой вяжущего постоянной толщины. При этом толщина прослойки вяжущего между микросферами равна 2 диаметрам частиц вяжущего  $d_{CC1}$ , а каждая отдельная микросфера покрыта слоем вяжущего толщиной  $d_{CC1}$ . Такая структура композитов будет формироваться за счет того, что в начальный момент структурообразования в растворе из-за высокой пуццоланической активности микросфер будет наблюдаться перенос частиц вяжущего к стенкам микросфер.

Определим количество частиц извести, способных вступить в взаимодействие с 1 стеклянной полый микросферой и с 1 зольной микросферой алюмосиликатной. Объем 1 стеклянной полый микросферы составляет  $8,177 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3$ , масса 1 микросферы –  $1,717 \cdot 10^{-12} \text{ кг}$ . Активность стеклянных полых микросфер составляет 313,0 мг/г, следовательно, с 1 микросферой во взаимодействие вступит  $0,537 \cdot 10^{-12} \text{ кг}$ . Объем 1 частицы извести  $6,5 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3$ , масса 1 частицы извести  $1,398 \cdot 10^{-13} \text{ кг}$  извести. Таким образом, с 1 стеклянной полый микросферой во взаимодействие вступит вяжущее в количестве, по массе равном 4 частицам извести. Объем 1 зольной микросферы алюмосиликатной  $2,323 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3$ , масса 1 микросферы –  $1,394 \cdot 10^{-10} \text{ кг}$ . Активность микросфер составляет 68,2 мг/г, следовательно, с 1 микросферой во взаимодействие вступит  $9,507 \cdot 10^{-12} \text{ кг}$  извести. Таким образом, с 1 зольной микросферой алюмосиликатной во взаимодействие вступит вяжущее в количестве, по массе равном 41 частице извести.

В рассматриваемой модели доля микросфер в объеме композита максимальная, а вяжущее выполняет роль связующего компонента, создавая материал конгломератного строения. Модель представлена на рис. 2.

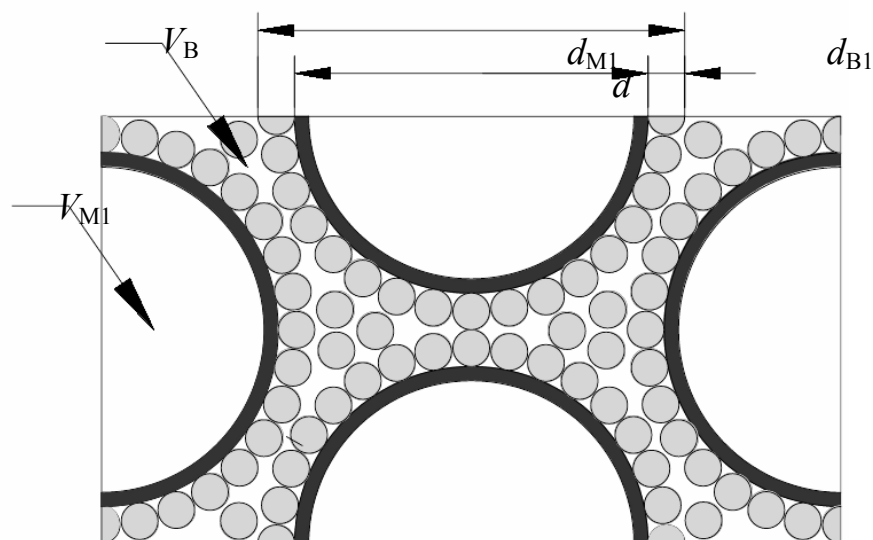


Рис. 2. Схема модели композита:

$d_{M1}$  – диаметр микросферы;  $d_{B1}$  – диаметр 1 частицы вяжущего;  $d_{K1}$  – диаметр 1 микросферы с прослойкой вяжущего;  $V_{M1}$  – объем 1 микросферы;  $V_B$  – объем вяжущего

Для исследуемого композита любого объема выполняется следующее равенство:

$$V = V_M + V_B, \quad (1)$$

где  $V$  – объем композита,  $\text{м}^3$ ;  $V_B$  – объем вяжущего,  $\text{м}^3$ ;  $V_M$  – объем микросфер,  $\text{м}^3$ .

$$V_M = N_M \cdot V_{M1}, \quad (2)$$

где  $N_M$  – количество микросфер в рассматриваемом объеме композита, шт.;  $V_{M1}$  – средний объем 1 микросферы, м<sup>3</sup>.

В рассматриваемом композите каркасом являются микросферы, покрытые прослойкой толщиной в 1 частицу вяжущего  $d_{В1}$ . Для определения объема 1 микросферы с прослойкой связующей смеси  $V_{К1}$ , м<sup>3</sup>, использовали равенство

$$V_{К1} = \frac{\pi \cdot d_{К1}^3}{6} = V_{СМ1} + V_{M1} = V_{M1} \cdot \frac{d_{К1}^3 - d_{M1}^3}{d_{M1}^3} + V_{M1}, \quad (3)$$

где  $V_{ВМ1}$  – объем прослойки вяжущего вокруг 1 микросферы, м<sup>3</sup>;  $d_{К1}$  – диаметр 1 микросферы с прослойкой вяжущего, м;  $d_{M1}$  – диаметр 1 микросферы, м.

Для решеток гексагонального и гранцентрированного кубических типов для любого объема рассматриваемого композита справедливо следующее равенство:

$$N_M \cdot V_{К1} = 0,7405 \cdot V. \quad (4)$$

Таким образом, общий объем вяжущего для любого объема рассматриваемого композита  $V_B$  можно рассчитать по формуле

$$V_B = N_M \cdot V_{СМ1} + 0,2595 \cdot V. \quad (5)$$

Для определения оптимального содержания микросфер  $M\%$  от массы вяжущего применяли формулу

$$M\% = \frac{V_M \cdot \rho_M}{V_B \cdot \rho_B \cdot \eta_B}, \quad (6)$$

где  $\rho_B$  – истинная плотность вяжущего, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_M$  – истинная плотность микросфер, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta_B$  – плотность упаковки частиц вяжущего.

Для расчета плотности упаковки частиц вяжущего использовали формулу

$$\eta_B = \frac{m_B}{\rho_B \cdot V_P}, \quad (7)$$

где  $m_B$  – масса вяжущего, кг;  $V_P$  – объем растворного композита, м<sup>3</sup>.

На основе полученных зависимостей сравнивали 4 различных по виду используемых в них материалов композита:

1 вариант: наполнитель – стеклянные полые микросферы; вяжущее – известь-пушонка;

2 вариант: наполнитель – стеклянные полые микросферы; вяжущее – цемент;

3 вариант: наполнитель – зольные микросферы алюмосиликатные; вяжущее – известь-пушонка;

4 вариант: наполнитель – зольные микросферы алюмосилкатные; вяжущее – цемент.

Исходные данные для расчетов представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Расчетные характеристики вяжущих

Материал	Диаметр 1 частицы связующей смеси $d_{В1}$ , м	Истинная плотность вяжущего $\rho_B$ , кг/м <sup>3</sup>	Плотность упаковки частиц вяжущего $\eta$
Известь-пушонка	$2,67 \cdot 10^{-6}$	2150	0,474
Цемент	$5,00 \cdot 10^{-6}$	3000	0,733

Схемы расположения частиц вяжущего и наполнителя в сравниваемых композитах представлены на рис. 3.

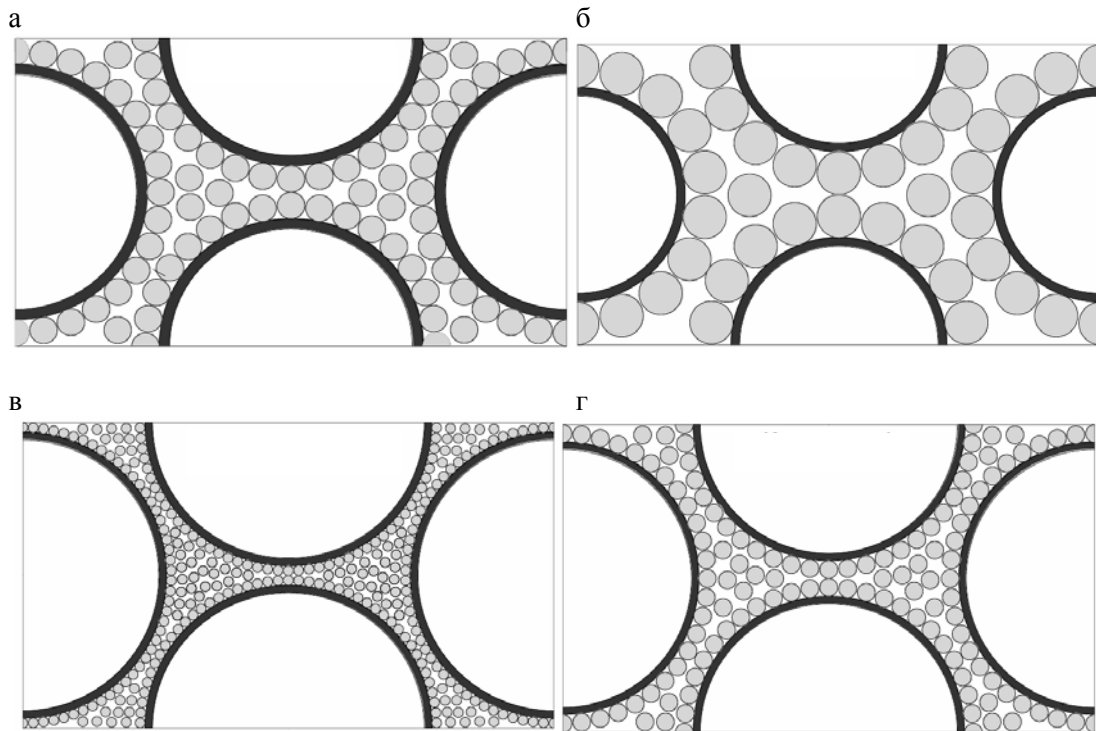


Рис. 3. Схемы расположения частиц вяжущего и наполнителя в композитах:  
а – 1-й вариант; б – 2-й вариант; в – 3-й вариант; г – 4-й вариант

Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Расчетные характеристики композитов

Вариант композита	Объем микросфер в композите $V_M, \%$	Объем вяжущего в композите $V_B$		Оптимальное содержание микросфер от массы вяжущего $M^{\circ}, \%$	Плотность композита $\rho, \text{кг/м}^3$
		Прослойка вокруг микросфер $V_{BM}, \%$	Заполнение пространства между микросферами $V_{BP}, \%$		
1	41,43	32,62	25,95	17,3	684
2	26,99	47,06	25,95	3,5	1663
3	60,45	13,60	25,95	89,9	766
4	51,17	22,88	25,95	28,6	1381

Установлено, что с увеличением диаметра микросфер уменьшается объем вяжущего в композите  $V_B$  за счет снижения объема прослойки вокруг микросфер  $V_{BM}$ . Увеличение диаметра 1 микросферы  $d_{M1}$  в 3,05 раза при замене в композите стеклянных полых микросфер на зольные микросферы алюмосиликатные уменьшает объем известкового вяжущего  $V_{IB}$  в композитес 58,57 до 39,55 %, объем цементного вяжущего  $V_{CB}$  в композите – с 73,01 до 48,83 %.

Также выявлено, что с увеличением диаметра частиц вяжущего увеличивается объем вяжущего в композите  $V_{CC}$  за счет увеличения объема прослойки вокруг микросфер  $V_{CM}$ . Увеличение диаметра 1 частицы вяжущего  $d_{B1}$  в 1,87 раза при замене в композите известкового вяжущего на цементное увеличивает объем вяжущего  $V_B$  в композите, наполненном стеклянными полыми микросферами, с 58,57 до 73,01 %, увеличивает объем вяжущего  $V_B$  в композите, наполненном зольными микросферами алюмосиликатными, с 39,55 до 48,83 %.

Таким образом, обоснована возможность снижения теплопроводности теплоизоляционных отделочных покрытий, использующих в составе в качестве наполнителя зольные микросферы алюмосиликатные и стеклянные полые микросферы, а в качестве вяжущего – известь.

### Список литературы

1. Трофимов, Б.Я. Теплоизоляционные штукатурные растворы с вермикулитовым наполнителем / Б.Я. Трофимов, Р.Я. Ахтямов, Р.М. Ахмедьянов // Цемент и его применение. – 2002. – № 6. – С. 16–19.
2. Ахтямов, Р.Я. Легкие строительные штукатурные растворы с вермикулитовым наполнителем / Р.Я. Ахтямов, Р.М. Ахмедьянов, Б.Я. Трофимов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2002. – №11 – С. 16–17.
3. Эффективные сухие смеси для ремонтных и восстановительных работ / В.С. Лесовик [и др.] // Строительные материалы. – 2014. – №7 – С. 82–85.
4. Набиевский, С.Ю. Производство сухих строительных смесей с применением вспученного перлита / С.Ю. Набиевский, Л.В. Алексеева // Сухие строительные смеси. – 2012 – № 6. – С. 26–27.
5. Семенов, В.С. Повышение энергоэффективности ограждающих конструкций с применением облегченных кладочных растворов / В.С. Семенов, Т.А. Розовская // Строительные материалы. – 2015. – № 6. – С. 16–19.
6. Семенов, В.С. Энергоэффективные сухие кладочные смеси на основе полых микросфер / В.С. Семенов, Т.А. Розовская, Д.В. Орешкин // Сб. науч. труд. III (XII) Всероссийской (Международной) конференция «Бетон и железобетон – взгляд в будущее». – М.: МГСУ, 2014. – С. 344–352.
7. Кретова, У.Е. Инновационный наполнитель для цементных систем – керамические микросферы / У.Е. Кретова // Вестник МГСУ. – 2010. – №4. – С. 37–39.
8. Пашкевич, А.А. Эффективные цементные штукатурные растворы с полыми стеклянными микросферами: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / А.А. Пашкевич. – М., 2009. – 141 с.
9. Оценка влажностного режима многослойной стеновой конструкции в годовом цикле / С.В. Корниенко, Н.И. Ватин, М.Р. Петриченко, А.С. Горшков // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – №6. – С.19–33.
10. Ватин, В.И. Влияние физико-технических и геометрических характеристик штукатурных покрытий на влажностный режим однородных стен из газобетонных блоков / В.И. Ватин, А.С. Горшков, А.В. Глумов // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – №1. – С.28–33.
11. Логанина, В.И. Использование зольных алюмосиликатных микросфер в известковых сухих строительных смесях для отделки / В.И. Логанина, М.В. Фролов // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова, 2017. – №3. – С.6–9.
12. Логанина, В.И. Эффективность применения теплоизоляционной штукатурки с применением микросфер для отделки газобетонной ограждающей конструкции / В.И. Логанина, М.В. Фролов // Известия вузов. Строительство. – 2016. – №5. – С.55–62.
13. Логанина, В.И. Модификация известковых сухих строительных смесей добавками на основе гидросиликатов кальция / В.И. Логанина, И.С. Пышкина, Л.А. Васин // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №2. – С.65–69.
14. Протасевич, А.М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений / А.М. Протасевич. – Минск: Вышэйшая школа, 2015. – 240 с.
15. Дьяконов, В.Г. Основы теплопередачи / В.Г. Дьяконов, О.А. Лонцаков. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2011. – 230 с.
16. Кудинов, И.В. Теоретические основы теплотехники. Часть II. Математическое моделирование процессов теплопроводности в многослойных ограждающих конструкциях / И.В. Кудинов, Е.В. Стефанюк. – Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2013. – 422 с.

17. Литовский, Е.Я. Теплофизические свойства огнеупоров / Е.Я. Литовский, Н.А. Пучкелевич. – М.: Металлургия, 1982. – 150 с.
18. Рахимбаев, Ш.М. Теоретические аспекты улучшения теплотехнических характеристик пористых систем / Ш.М. Рахимбаев, Т.В. Аниканова // Строительные материалы. – 2007. – №4. – С. 26–28.
19. ГОСТ Р ИСО 18434-1-2013. Контроль состояния и диагностика машин. Термография. Часть 1. Общие методы. – М.: Стандартинформ. – 39 с.
20. Саградян, А.А. Исследование пуццоланической активности зольных микросфер / А.А. Саградян, Г.А. Зимакова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – № 2. – С. 43–47.
21. Иноземцев, А.С. Полые микросферы – эффективный наполнитель для высокопрочных легких бетонов / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – №10. – С.80–83.
22. Анализ распределения наполнителя в структуре композитов / А.Н. Бобрышев, П.А. Зубарев, П.И. Кувшинов, А.В. Лахно // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. – 2012. – №1 (20).
23. Макаренкова, Ю.В. Цементные растворы с различной объемной долей цементной матрицы / Ю.В. Макаренкова, К.В. Беляев // Научные чтения, посвященные памяти 24 Горчакова Г.И. и 75-летию с момента основания кафедры «Строительные материалы». – М.: МГСУ, 2009. – С. 153–155.

#### References

1. Trofimov, B.Ya. Heat-insulating plastering solutions with vermiculite filler / B.Ya. Trofimov, R.Ya. Akhtyamov, R.M. Ahmedyanov // Cement and its application. – 2002. – № 6. – P. 16–19.
2. Akhtyamov, R.Ya. Light building plasters with vermiculite filler / R.Ya. Akhtyamov, R.M. Ahmedyanov, B.Ya. Trofimov // Building materials, equipment, technologies of the XXI century. – 2002. – № 11 – P. 16–17.
3. Effective dry mixes for repair and restoration works / V.S. Lesovik [etc.] // Building materials. – 2014. – № 7 – P. 82–85.
4. Natsievsky, S.Yu. Production of dry building mixtures using expanded perlite / S.Yu. Natsievsky, L.V. Alekseeva // Dry building mixtures. – 2012. – № 6. – P. 26–27.
5. Semenov, V.S. Increase in energy efficiency of enclosing structures using lightweight mortar solutions / V.S. Semenov, T.A. Rozovskaya // Building Materials. – 2015. – № 6. – P. 16–19.
6. Semenov, V.S. Energy-efficient dry mixes based on hollow microspheres / V.S. Semenov, T.A. Rozovskaya, D.V. Oreshkin / Cb. sci. work. III (XII) All-Russian (International) Conference «Concrete and reinforced concrete – a look into the future». – М.: MGSU, 2014. – P. 344–352.
7. Kretova, U.E. Innovative filler for cement systems – ceramic microspheres / U.E. Kretova // Vestnik MGSU. – 2010. – №4. – P. 37–39.
8. Pashkevich, A.A. Effective cement plastering solutions with hollow glass microspheres: thesis of a Cand.Tech.Sci. : 05.23.05 / A.A. Pashkevich. – М., 2009. – 141 p.
9. Evaluation of the moisture regime of a multilayer wall structure in the annual cycle / S.V. Kornienko, N.I. Vatin, M.R. Petrichenko, A.S. Gorshkov // Construction of unique buildings and structures. – 2015. – №6. – P.19–33.
10. Vatin, V.I. Influence of physico-technical and geometric characteristics of plaster coatings on the moisture regime of homogeneous walls from aerated concrete blocks / V.I. Vatin, A.S. Gorshkov, A.V. Glumov // Engineering and construction magazine. – 2011. – № 1. – P.28–33.
11. Loganina, V.I. Use of ash aluminosilicate microspheres in calcareous dry construction mixtures for finishing / V.I. Loganina, M.V. Frolov // Herald of BSTU named after. V.G. Shukhov. – 2017. – №3. – P.6–9.

12. Loganina, V.I. Effectiveness of the use of heat-insulating plasters with the use of microspheres for finishing the gas-concrete enclosing structure / V.I. Loganina, M.V. Frolov // *Izvestiya Vuzov. Construction.* – 2016. – № 5. – P.55–62.
13. Loganina, V.I. Modification of calcareous dry mortars with additives based on calcium hydrosilicates / V.I. Loganina, I.S. Pyshkina, L.A. Vasin // *Regional architecture and engineering.* – 2016. – №2. – P.65–69.
14. Protasiewicz, A.M. Building thermophysics of enclosing structures of buildings and structures / A.M. Protasiewicz. – Minsk: Higher School, 2015. – 240 p.
15. Dyakonov, V.G. Basis of heat transfer / V.G. Dyakonov, O.A. Lonshchakov. – Kazan: Kazan National Research Technological University, 2011. – 230 p.
16. Kudinov, I.V. Theoretical foundations of heat engineering. Part II. Mathematical modeling of thermal conductivity in multilayer enclosing structures / I.V. Kudinov, E.V. Stefanyuk. – Samara: Samara State University of Architecture and Civil Engineering, EBS ASV, 2013. – 422 p.
17. Litovsky, E.Ya. Thermophysical properties of refractories: Reference edition / E.Ya. Litovsky, N.A. Puchkevich. – M.: Metallurgy, 1982. – 150 p.
18. Rakhimbayev, Sh.M. Theoretical aspects of improving the thermal characteristics of porous systems / Sh.M. Rakhimbayev, T.V. Anikanova // *Building Materials.* – 2007. – №4. – P. 26–28.
19. GOST R ISO 18434-1-2013. Condition monitoring and diagnostics of machines. Thermography. Part 1. General methods. – M.: Standartinform. – 39 p.
20. Sagradyan, A.A. Investigation of pozzolanic activity of ash microspheres / A.A. Sagradyan, G.A. Zimakova // *Izvestiya Institutions of higher education. Construction.* – 2012. – № 2. – P. 43–47.
21. Inozemtsev, A.S. Hollow microspheres – an effective filler for high-strength lightweight concrete / A.S. Inozemtsev, E.V. Korolev // *Industrial and civil construction.* – 2013. – №10. – P. 80–83.
22. Analysis of the distribution of filler in the structure of composites / A.N. Bobryshev, P.A. Zubarev, P.I. Kuvshinov, A.V. Lakhno // *Internet-Bulletin VolgGASU. Ser.: Polythematical.* – 2012. – №1 (20).
23. Makarenkova, Yu.V. Cement solutions with different volume fraction of cement matrix / Yu.V. Makarenkova, K.V. Belyaev // *Scientific readings dedicated to memory 24 Gorchakova GI and the 75th anniversary of the founding of the department «Building Materials».* – M.: MGSU, 2009. – P. 153–155.

УДК 691.327:666.9-136:666.651.6:539.217

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

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

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

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

## ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ПОРИСТОСТЬ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНОГО КОМПОЗИТА

Н.А. Очкина

Приведены результаты исследования влияния степени наполнения, водоцементного отношения и модифицирующих добавок на величину и характер водопоглощения радиационно-защитного композита на основе высокоглиноземистого цемента. Установлены параметры рецептурного состава композита, при которых достигается существенное уменьшение водопоглощения. По кинетике водопоглощения определены общая и кажущаяся пористости, а также параметры поровой структуры композита: показатель среднего размера и показатель однородности размеров капиллярных пор.

*Ключевые слова: радиационно-защитный композит, пористость, водопоглощение, высокоглиноземистый цемент, степень наполнения, водоцементное отношение, модифицирующие добавки*

## THE INFLUENCE OF MODIFYING ADDITIVES ON THE POROSITY OF A RADIATION-PROTECTIVE COMPOSITE

N.A. Ochkina

The effect of the filling degree, water-cement ratio and modifying additives on the value and nature of water absorption of a radiation-protective composite based on high-alumina cement was studied. The parameters of the composite formulation of composites are established which ensure a significant reduction of water absorption. General and apparent porosity and the parameters of the pore structure of the composite are determined by the water absorption kinetics: the average size index and the uniformity index of the capillary pore sizes.

*Keywords: radiation-protective composite, porosity, water absorption, high-alumina cement, degree of filling, water-cement ratio, modifying additives*

Актуальность разработки новых высокоэффективных радиационно-защитных материалов обусловлена развитием ядерной энергетики, применением радионуклидов и других источников ионизирующих излучений в различных отраслях народного хозяйства, науки, техники и медицины. Материалы, предназначенные для радиационной защиты, должны в первую очередь эффективно ослаблять вредное воздействие гамма-лучей и нейтронов на живые организмы и технику, т.е. иметь высокую радиационную непроницаемость. Хорошими защитными свойствами в этом отношении обладают особо тяжелые композиты (со средней плотностью 2500...5000 кг/м<sup>3</sup>) на основе цементных вяжущих. Для получения особо тяжелых композитов применяют заполнители повышенной плотности (магнетит, гематит, лимонит, барит, чугунный скрап и др.). В гидратных композитах для эффективного ослабления потока нейтронов используют также материалы, содержащие ядра легких элементов (бор, литий, кадмий): карбид бора, хлористый литий, серноокислый кадмий и др. В качестве вяжущих для

особо тяжелых композитов применяют портландцемент, шлакопортландцемент, глиноземистый цемент. Глиноземистый и высокоглиноземистый цементы обладают рядом особых свойств. После окончания схватывания их прочность нарастает лавинообразно. Уже через сутки она составляет около 70 % от марочной прочности, определяемой в 3-суточном возрасте. При прочих равных условиях пористость затвердевшего глиноземистого цемента примерно в 1,5 раза меньше пористости портландцементного камня. Это связано с тем, что глиноземистый цемент при твердении химически связывает 30...45 % воды от массы цемента (портландцемент — около 20 %). Повышенное вовлечение воды в гидратные соединения способствует образованию значительного количества гелевидных масс гидроксида алюминия, обладающих уплотняющим действием. Кроме того, в затвердевшем цементном камне оказывается меньше несвязанной воды, что обуславливает большую его плотность по сравнению с портландцементом. Поскольку стоимость глиноземистого цемента высока, то его целесообразно применять в тех случаях, когда можно эффективно использовать его положительные свойства: при скоростном строительстве, аварийных работах, зимнем бетонировании и при требовании от бетона высокой водостойкости и водонепроницаемости.

С целью уменьшения стоимости радиационно-защитных материалов на основе высокоглиноземистого цемента была предпринята попытка применить в качестве заполнителя дробленые и молотые отходы оптического стекла марок ТФ-10 и ТФ-110. Выбор этих марок стекла обусловлен более высокими по сравнению с другими тяжелыми флинтами значениями плотности (5100 кг/м<sup>3</sup>) и однородности, большим содержанием оксида свинца (70,9 %), меньшим коэффициентом расширения, высокой радиационной стойкостью.

Одним из важнейших факторов повышения эффективности радиационно-защитных материалов является увеличение их средней плотности. Известно, что плотность структуры радиационно-защитного композита определяется не только качественными характеристиками составляющих его компонентов (заполнителя, наполнителя и вяжущего), но и количественным соотношением между ними, а также входящими в состав композита водой и модифицирующими добавками [1, 2]. Увеличить среднюю плотность материала можно путем уменьшения его пористости. Пористость относится к числу наиболее информативных характеристик структуры материала и оказывает существенное влияние на большинство его эксплуатационных свойств (проницаемость, прочность, морозостойкость, коррозионную стойкость и другие характеристики).

Исследование параметров поровой структуры композитов на основе высокоглиноземистого цемента и отходов оптического стекла марки ТФ-110 проводили по кинетике водопоглощения. Составы исследуемых композитов и результаты испытаний приведены в табл. 1 и на рис. 1 и 2.

Т а б л и ц а 1

Водопоглощение композитов на основе высокоглиноземистого цемента

№ состава	$\rho_f$	$\frac{B}{C}$	Вид и дозировка добавки (% от массы цемента)	Водопоглощение (по массе), %						
				Время						
				15 мин	30 мин	1 ч	3 ч	24 ч	7 сут	28 сут
1	0,59	0,5	-	2,75	2,28	2,85	2,86	3,18	3,56	3,79
2	0,66	0,5	-	0,82	1,07	1,33	1,67	1,98	2,17	2,32
3	0,70	0,5	-	0,86	1,20	1,75	2,31	2,57	2,98	3,26
4	0,70	0,6	-	1,41	1,92	2,43	2,56	2,88	3,19	3,39
5	0,66	0,47	Карбамидная смола – 1 %	0,52	0,68	0,89	0,90	1,04	1,17	1,31
6	0,66	0,45	ССК – 0,2 %	1,08	1,45	1,71	1,80	1,94	2,12	2,25
7	0,66	0,45	ЛСТ – 0,15 %	1,06	1,26	1,53	1,61	1,74	1,93	2,11
8	0,66	0,45	Лимонная кислота – 0,1 %	0,60	0,80	0,99	1,23	1,43	1,70	1,74
9	0,66	0,43	С-3 – 0,5 %	0,37	0,47	0,63	0,96	1,42	1,61	1,73



Представленные экспериментальные данные показывают, что при постоянном водоцементном отношении (В/Ц) увеличение степени наполнения композита до оптимального значения  $\vartheta_f = 0,66$  (Ц:Н = 1:8) приводит к снижению водопоглощения. При дальнейшем увеличении степени наполнения до значения  $\vartheta_f = 0,7$  (Ц:Н = 1:10) водопоглощение растет. Это объясняется тем, что при наполнении смесей выше оптимальных значений их жесткость повышается. При уплотнении таких смесей вследствие заземления воздуха образуются пустоты, увеличивающие водопоглощение [3]. Зависимость водопоглощения (через 28 сут.) удобоукладываемых смесей с различной степенью наполнения от В/Ц имеет практически линейный характер

$$W_M = 5,16 \frac{В}{Ц} - 0,249.$$

Увеличение подвижности смесей путем повышения В/Ц не приводит к снижению водопоглощения. Это можно объяснить тем, что в затвердевшем цементном камне оказывается больше несвязанной воды и его капиллярная пористость увеличивается. Введение модифицирующих добавок, способствующих снижению В/Ц, при сохранении требуемой удобоукладываемости смесей закономерно приводит к уменьшению водопоглощения.

Что касается кинетики водопоглощения композитов, то, как видно из результатов эксперимента, она носит экспоненциальный характер (рис. 1, 2).

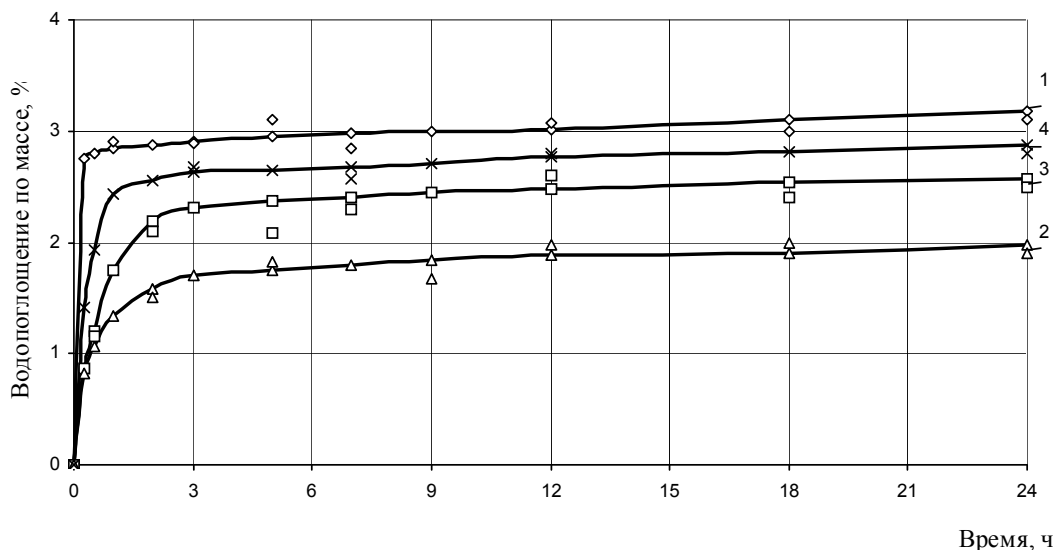


Рис. 1. Кинетика водопоглощения композитов без добавок:

1 – В/Ц = 0,5 и  $\vartheta_f = 0,59$ ; 2 – В/Ц = 0,5 и  $\vartheta_f = 0,66$ ;

3 – В/Ц = 0,5 и  $\vartheta_f = 0,7$ ; 4 – В/Ц = 0,6 и  $\vartheta_f = 0,68$

Наиболее интенсивное поглощение воды происходит в течение первых 7 часов, в дальнейшем наблюдается замедление темпов водопоглощения.

По кинетике водопоглощения рассчитывали общую  $\Pi_0$  и кажущуюся  $\Pi_k$  пористости (интегральный объем открытых пор, доступный для водопоглощения), а также параметры поровой структуры композитов:  $\lambda$  – показатель среднего размера капиллярных пор;  $\alpha$  – показатель однородности размеров капиллярных пор. Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 2.

При повышении степени наполнения композитов их пористость уменьшается. Это можно объяснить тем, что увеличение концентрации наполнителя приводит к уменьшению содержания в них цементного камня – основного носителя пористости. При этом показатель среднего размера пор  $\lambda$  также уменьшается. Однако у материала со степенью наполнения  $\vartheta_f = 0,70$  показатели пористости выше, чем у менее наполненных материалов. Ранее было отмечено, что такая смесь является жесткой. Поэтому при

её уплотнении возможно защемление дополнительного количества воздуха и образование пустот, снижающих однородность материала и ухудшающих его свойства.

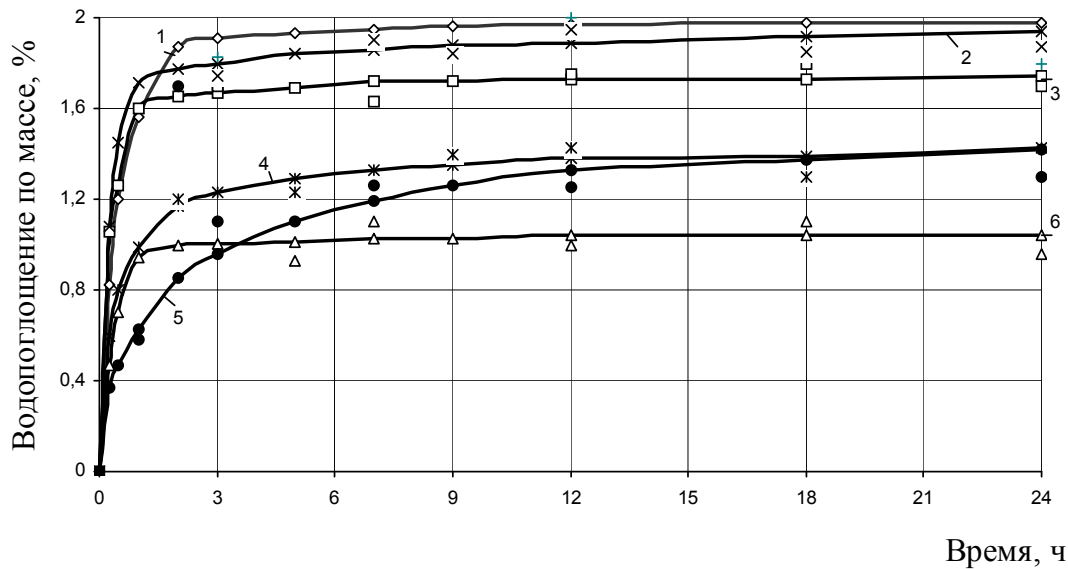


Рис. 2. Кинетика водопоглощения композитов с добавками:  
 1 – без добавки; 2 – с добавкой 0,2 % ССК; 3 – 0,15 % ЛСТ;  
 4 – 0,1 % лимонной кислоты; 5 – 0,5 % С-3; 6 – 1 % карбамидной смолы

Т а б л и ц а 2

Показатели пористости композитов

Состав раствора			Пористость общая, %	Пористость кажущаяся, %	Параметры поровой структуры	
$\rho_f$	$\frac{B}{C}$	Вид и дозировка добавки (% от массы цемента)			$\alpha$	$\lambda$
0,59	0,5	–	8,56	6,37	0,20	12,28
0,66	0,5	–	6,88	5,19	0,56	1,282
0,70	0,5	–	7,72	6,08	0,70	1,204
0,70	0,6	–	8,16	7,13	0,75	2,430
0,66	0,47	Карбамидная смола – 1 %	3,85	3,29	0,90	1,074
0,66	0,45	ССК – 0,2 %	4,28	3,71	0,73	2,013
0,66	0,45	ЛСТ – 0,15 %	4,37	3,59	0,68	2,120
0,66	0,45	Лимонная кислота – 0,1 %	4,19	3,48	0,52	1,000
0,66	0,43	С-3 – 0,5 %	3,95	3,45	0,40	0,086

Модифицирующие добавки уменьшают водоцементное отношение и снижают общую пористость композитов. Влияние добавок на величину средних размеров пор неодинаково. Так, например, добавки ЛСТ и ССК увеличивают содержание крупных пор, поэтому композиты с указанными добавками характеризуются большей скоростью водопоглощения в начальный период экспозиции. В дальнейшем скорость водопоглощения снижается. Это обусловлено неоднородностью их поровой структуры (наличием в указанных композитах капилляров меньших размеров). Добавка карбамидной смолы приводит к уменьшению размеров пор примерно в 1,5 раза и способствует формированию более однородной структуры композита. Это можно объяснить тем, что введение смолы в смеси обеспечивает их достаточно высокую подвижность и хорошую уплотняемость, что позволяет после затвердевания получать материал с плотной структурой и равномерно распределенными микропорами [4]. Композиты с добавкой карбамидной смолы имеют наименьшее водопоглощение. Частичная коагуляция [5] капиллярных, седиментационных и контракционных пор и каналов цементного камня адсорбционными пленками отвержденной смолы приводит к тому,

что на начальной стадии проникновения воды через композит разбухание смолы вызывает самозакрывание пор и в нем оказывается меньшее количество воды. Добавки лимонной кислоты и суперпластификатора С-3 также приводят к существенному уменьшению среднего размера капилляров. У материалов с указанными добавками скорость водопоглощения меньше, чем у немодифицированного материала.

Результаты эксперимента показывают, что немодифицированные композиты на основе высокоглиноземистого цемента и отходов оптического стекла ТФ-110 имеют небольшую пористость и, соответственно, низкое водопоглощение 3...4 %.

Модификация композитов оптимальными концентрациями добавок (карбамидной смолы, суперпластификатора С-3, лимонной кислоты, ЛСТ и ССК) способствует уменьшению общей пористости в 1,6...1,8 раза и снижению водопоглощения до 1,3...2,3 %.

Размеры капиллярных пор у композитов с добавками карбамидной смолы, суперпластификатора С-3 и лимонной кислоты невелики ( $\lambda = 0,086...1,282$ ). Наряду с низким водопоглощением этот факт предопределяет высокие физико-механические и эксплуатационные свойства исследуемых композитов.

### Список литературы

1. Разработка и управление качеством строительных материалов с регулируемой структурой и свойствами для защиты от радиации / А.П. Прошин [и др.] // Идентификация систем и задачи управления Sicpro 03: труды II Международной конференции. – М.: ИПУ РАН, 2003. – С.2437–2460.
2. Саденко, С.М. Композитные материалы специального назначения на основе отходов местной промышленности / С.М. Саденко, В.А. Худяков, С.И. Егоров // Известия вузов. Строительство. – 2003. – N 7. – С. 62–65.
3. Реологические свойства радиационно-защитных растворов на основе высокоглиноземистого цемента / Е.В. Королев [и др.] // Строительные материалы. – 2004. – №3. – С.8–11.
4. Verfahren zur Herstellung von gefugedichten Aschemortel und Aschebetone / B. Linke, P. Label, H. Lieske, M. Werner. – ORGREB – Institut für Kraftwerke. Pat. 244472 08. 04. 87. МКИ С В 18/06.
5. Ушеров-Маршак, А.В. Бетонведение / А.В. Ушеров-Маршак. – М.: РИФ «Стройматериалы», 2009. – 112 с.

### References

1. Elaboration and quality management of building materials with adjustable structure and properties for protection from radiation / A.P. Proshin [etc.] // System Identification and Control Problems SICPRO 03: Proceedings of the II International Conference, IPM RAS – M., 2003. – P. 2437–2460.
2. Sadenko, S.M. Composite materials for special purposes on the basis of waste of local industry / S.M. Sadenko, V.A. Khudyakov, S.I. Egorov // Izvestiya Vuzov. Building. – 2003. – N 7. – P. 62–65.
3. Rheological properties of radiation-protective solutions based on high-alumina cement / E.V. Korolev [etc.] // Building Materials. – 2004. – №3. – С.8–11.
4. Verfahren zur Herstellung von gefugedichten Aschemortel und Aschebetone / B. Linke, P. Label, H. Lieske, M. Werner. – ORGREB – Institut für Kraftwerke. Pat. 244472 08. 04. 87. МКИ С В 18/06.
5. Usherov-Marshak, A.V. Concrete studies / A.V. Usherov-Marshak. – M.: RIF «Building Materials», 2009. – 112 p.

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 69.059.4

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

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

**Зернов Владимир Викторович,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Механика»

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

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

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

**Zernov Vladimir Victorovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department "Mechanics"

**Zaytsev Mihail Borisovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department "Mechanics"

### ОПЫТ РЕНОВАЦИИ ЖИЛОГО ДОМА БЕЗ РАССЕЛЕНИЯ ЖИЛЬЦОВ ПОСЛЕ ОТКАЗА НЕКОТОРЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.И. Шеин, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев

Технический регламент о безопасности зданий и сооружений требует обеспечивать безопасность зданий в процессе их эксплуатации посредством технического обслуживания и т.д. Механические характеристики строительных конструкций и систем инженерно-технического обеспечения в процессе эксплуатации здания или сооружения должны соответствовать требованиям проектной документации. В последнее время техническое обслуживание жилого фонда проводится в основном при обнаружении значительных дефектов, повреждений и деформаций зданий. Дефекты и повреждения, особенно скрытые, обнаруживают, как правило, во время ремонта зданий. Процесс ремонта жилых многоэтажных зданий связан обычно с расселением жильцов из соображений безопасности. В статье представлены технология и рабочий проект устранения отказов строительных конструкций жилых многоэтажных домов без временного расселения жильцов.

*Ключевые слова: безопасность зданий и сооружений, проектная документация, техническое обслуживание, скрытые дефекты, отказ строительных конструкций, реновация*

## EXPERIENCE OF RESIDENTIAL HOUSES RENOVATING WITHOUT TENANTS RESETTLEMENT AFTER THE FAILURE OF SOME STRUCTURAL ELEMENT

A.I. Shein, V.V. Zernov, M.B. Zaytsev

Technical regulations on buildings and structures safety have to ensure the safety of operational buildings through their maintenance. Parameters and other properties of building structures and systems of engineering support in the operation of the building or structure must correspond to the requirements of the project documentation. Recently maintenance of housing stock is carried out mainly after detection of significant defects, damages and deformations of buildings. Detection of defects and damages, especially hidden, usually occurs during the repair of buildings. The process of repair of multi-storey residential buildings is usually associated with the resettlement of tenants for security reasons. The article presents the technology and working project to eliminate the failures of building structures of multi-storey residential buildings without temporary resettlement of residents.

*Keywords: safety of buildings and structures, design documentation, maintenance, hidden defects, failure of building structures, renovation*

В строительной отрасли реновация означает обновление, возобновление, ремонт, реконструкцию здания без разрушения целостности структуры. Отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта и характеризующееся переходом его в неработоспособное состояние.

«Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. N 384-ФЗ) требует обеспечивать безопасность зданий в процессе их эксплуатации посредством технического обслуживания, периодических осмотров строительных конструкций и систем инженерно-технического обеспечения, а также посредством текущих ремонтов. Параметры и другие характеристики строительных конструкций и систем инженерно-технического обеспечения в процессе эксплуатации здания или сооружения должны соответствовать требованиям проектной документации. Указанное соответствие поддерживается посредством технического обслуживания и подтверждается в ходе периодических осмотров и контрольных проверок и (или) мониторинга состояния основания, строительных конструкций и систем инженерно-технического обеспечения, проводимых согласно законодательству Российской Федерации.

В последние годы техническое обслуживание жилого фонда проводится в основном при обнаружении значительных дефектов, повреждений и деформаций зданий. Дефекты и повреждения, особенно скрытые, обнаруживают, как правило, во время ремонта зданий.

Во время замены мягкой кровли на крыше девятиэтажного жилого дома в г. Заречном, Пензенской области, между перекрытием лоджии 9-го этажа в месте ее примыкания к стене ограждения была обнаружена прогрессирующая трещина с шириной раскрытия до 8 см и, как следствие, значительный крен стены в сторону улицы (рис. 1 и 2).



Рис. 1. Прогрессирующая трещина шириной раскрытия 8 см между перекрытием и наружным ограждением лоджии



Рис. 2. Крен стенового ограждения лоджии 9-го этажа

В соответствии с ГОСТ 31937–2011, возникло аварийное состояние дома, «характеризующееся повреждениями и деформациями, свидетельствующими об исчерпании несущей способности и опасности обрушения, и (или) характеризующееся кренами, которые могут вызвать потерю устойчивости объекта».

Авторами было проведено детальное визуальное обследование дома и тщательное изучение имеющейся проектной документации с целью установления причин отказа строительных конструкций и разработки мероприятий по восстановлению их работоспособного состояния.

Обследуемый дом был построен в 1978 году по типовому проекту 1- 447 С – 42 «Девятиэтажный жилой дом на 54 квартиры со стенами из кирпича», разработанному ЦНИИЭП жилища и введенному в действие 10 декабря 1965 г. (По этому проекту в то же время построены ещё 4 дома в г. Заречном.)

Детальный анализ проектной документации показал, что в типовой проект обследуемого жилого дома были внесены необязательные и некорректные изменения в конструктивные решения.

На рис. 3 приведён вариант фасада дома из типового проекта, где отметки перекрытия лоджий совпадают с отметками перекрытия квартир, включая перекрытие лоджии 9-го этажа.

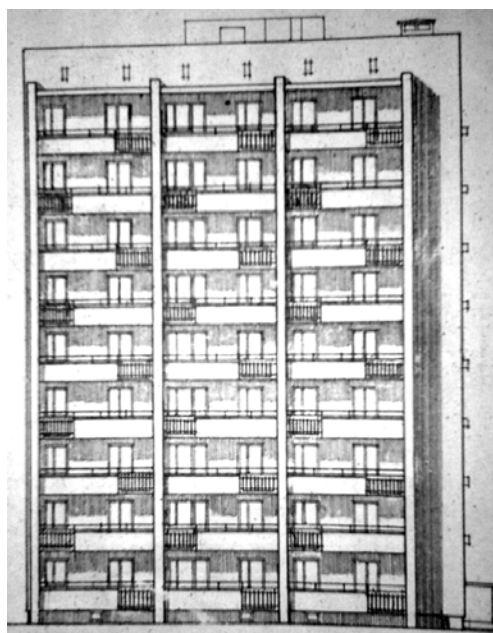


Рис. 3. Вариант фасада дома с перекрытиями лоджий на отметках перекрытия квартир

На рис. 4 показан другой вариант фасада, утверждённый для реализации. В этом варианте плиты перекрытия лоджии 9-го этажа подняты на уровень отметки покрытия дома и опираются на надстроенные более чем на 2 м боковые стены. Дополнительное стеновое ограждение лоджии из силикатного кирпича толщиной 250 мм опирается на дополнительную узкую, высокую, длинную железобетонную балку НПТ-60 размером 0,16 x 0,5 x 6 м с прикреплённым к ней снизу стальным равнополочным уголком сечением 100x100x10 мм, длиной 6 м. При этом наружный (облицовочный) слой кирпичной кладки стенового ограждения лоджии опирается на стальной уголок (рис. 5).

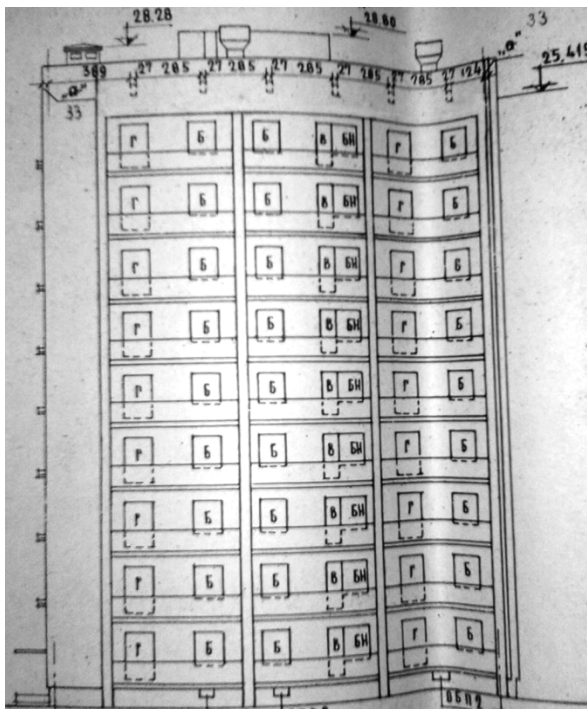


Рис. 4. Вариант фасада дома с перекрытием лоджии 9-го этажа на отметке плит покрытия дома

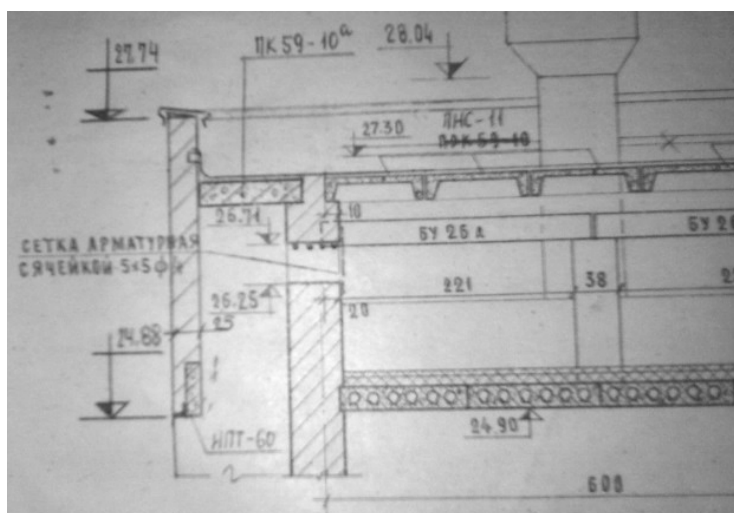


Рис. 5. Конструкция ограждения лоджии 9-го этажа

В этом варианте на крайне неустойчивую систему «балка – уголок» с эксцентриситетом опирается стена весом  $\sim 8,1$  т. Железобетонная балка НПТ-60 вместо плоского поперечного изгиба испытывает сложное сопротивление – изгиб с кручением. Дополнительный крутящий момент стремится повернуть балку из плоскости в сторону улицы и тем самым отрывает стеновое ограждение лоджии от верхнего перекрытия. От опрокидывания стену удерживает рубероидный кровельный ковёр.

Кроме изменений в конструктивных решениях при обследовании были обнаружены нарушения при производстве строительно-монтажных работ, а именно кирпичной кладки, способствующие возникновению аварийного состояния дома.

Боковые стены лоджий выполнены без перевязки кирпичом рядов кладки. В результате повсеместно наблюдается расслоение кирпичной кладки, местами до 30 мм (рис. 6).

Неудовлетворительное качество кирпичной кладки, отсутствие перевязки швов, недостаток арматурных сеток в боковых стенах лоджий выше 8-го этажа в месте примыкания к основной несущей стене привели к выпучиванию стенового ограждения и к усугублению аварийного состояния дома в целом (рис. 7).



Рис. 6. Пример расслоения кирпичной кладки боковых стен лоджий

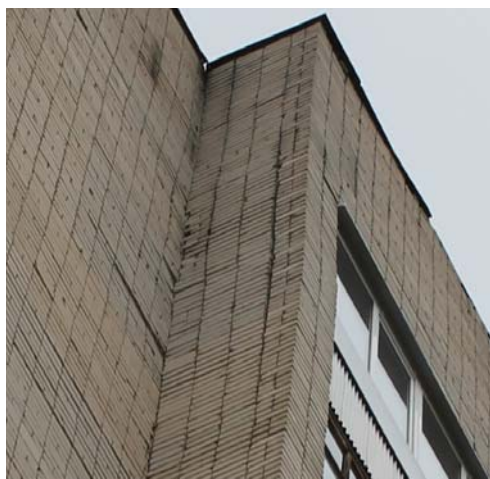


Рис. 7. Боковая (аварийная) стена лоджии

При вскрытии рубероидного ковра на крыше дома не было обнаружено следов анкеров стенового ограждения лоджии 9-го этажа, связывающих её с плитой перекрытия, и стальных сеток в местах примыкания к боковым стенам (рис. 8).



Рис. 8. Отсутствие анкеров и сеток в местах крепления стенового ограждения к боковым стенам и перекрытию лоджии 9-го этажа

Таким образом, принятое на момент начала строительства некорректное конструктивное решение ограждения лоджии 9-го этажа, а также нарушения требований при производстве строительно-монтажных работ со временем привели к аварийному состоянию дома вследствие отказа строительных конструкций.

Авторы неоднократно разрабатывали проекты усиления строительных конструкций производственных зданий и сооружений без остановки производственных процессов [1-5], имеют опыт усиления карнизов жилых домов без остановки жизненного цикла [6, 7]. С необходимостью усиления строительных конструкций аварийного жилого дома без временного расселения жильцов на время ремонта столкнулись впервые.



Для восстановления работоспособного состояния дома авторы разработали проект усиления и внедрили его на практике. Были проведены следующие противоаварийные мероприятия:

- запроектированы и установлены страховочные сборно-разборные металлические конструкции усиления на плитах лоджий 7-го и 8-го этажей (рис. 9);
- демонтированы 3 плиты перекрытия и стеновые ограждения лоджий 9-го этажа (рис. 10);
- демонтированы железобетонные балки НПТ-60 с боковых стен лоджий;
- выполнена частичная разборка дефектной кирпичной кладки боковых стен лоджий;
- выполнена новая армированная кладка боковых стен;
- установлены в проектное положение плиты перекрытия лоджии 9-го этажа на одном уровне с плитами перекрытия;
- запроектирован и смонтирован наклонный козырёк над плитой перекрытия лоджии 9-го этажа;
- страховочные сборно-разборные металлические конструкции после выполнения всех мероприятий по усилению демонтированы.



Рис.9. Страховочные конструкции на лоджиях 7-го и 8-го этажей



Рис.10. Вид фасада без стенового ограждения и перекрытий лоджии 9-го этажа

Фрагмент фасада дома после устранения дефектов, приведших к его аварийному состоянию, и реновации приведён на рис.11.



Рис.11. Фасад жилого дома после реновации

### Выводы

1. Представлены технология и рабочий проект устранения отказов строительных конструкций жилых многоэтажных домов без временного расселения жильцов.
2. Рабочий проект реконструкции успешно реализован на практике.
3. Разработанная проектно-конструкторская документация и накопленный опыт позволяют восстанавливать работоспособное состояние строительных конструкций различных жилых домов с лоджиями.

### Список литературы

1. Шеин, А.И. Некоторые причины отказа строительных конструкций / А.И. Шеин, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2016. – Т. 8, №6. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/88TVN616.pdf> (доступ свободный)
2. Шеин, А.И. Восстановление работоспособности железобетонных карнизных плит в совмещенных крышах / А.И. Шеин, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2016. – №4. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no4/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/4.16/at\\_download/file](http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no4/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/4.16/at_download/file)
3. Шеин, А.И. Влияние конструктивного и эксплуатационного отказов на долговечность строительных конструкций / А.И. Шеин, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №2 (31). – С.64–71.
4. Нормативно-правовые документы и регламенты в обеспечении надёжности зданий и сооружений / А.И. Шеин, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, И.В. Зернов // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3 (32). – С.94–98.
5. Зернов, В.В. Способ усиления железобетонной рамы под нагрузкой / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, Я.А. Азимова // Моделирование и механика конструкций. – 2015. – №1. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: <http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no1/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/sposob-usileniya-zhelezobetonnoi-ramy-pod-nagruzkoi/view>.
6. Зернов, В.В. Усиление железобетонных перекрытий с сосредоточенными нагрузками / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, В.И. Гераськин // Моделирование и механика

конструкций. – 2015. – №1. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: <http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no1/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/usilenie-zhelezobetonnyh-perekrytii-s-sosredotochennymi-nagruzkami/view>

7. Опыт обследования зданий и сооружений / А.И. Шейн, С.В. Бакушев, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2017. – №5. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no5/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/5.16/at\\_download/file](http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no5/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/5.16/at_download/file)

### References

1. Shein, A.I. Some causes of failure of building structures / A.I. Shein, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Internet-journal «science of SCIENCE». – 2016. – Vol. 8, No. 6. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/88TVN616.pdf> (free access)
2. Shein, A.I. Recovery of reinforced concrete curtain panels in flat roofs / A.I. Shein, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2016. – No. 4. Systems'. requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no4/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/4.16/at\\_download/file](http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no4/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/4.16/at_download/file)
3. Shein, A.I. The influence of structural and operational failures on the durability of building structures / A.I. Shein, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 2 (31). – P. 64–71.
4. Normative-legal documents and regulations to ensure the reliability of buildings and constructions / A.I. Shein, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev, V.I. Zernov // Regional architecture and engineering. – 2017. – №3 (32). – P. 94–98.
5. Zernov, V.V. Method of strengthening reinforced concrete frames under load / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev, J.A. Azimova // Modeling and mechanics of structures. – 2015. – No. 1. Systems'. requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: <http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no1/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/sposob-usileniya-zhelezobetonnoi-ramy-pod-nagruzkoi/view>.
6. Zernov, V.V. Strengthening of reinforced concrete beams with lumped loads / V.V. Zernov, B.M. Zaitsev, V.I. Geras'kin // Modeling and mechanics of structures. – 2015. – No. 1. Systems'. requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: <http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no1/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/usilenie-zhelezobetonnyh-perekrytii-s-sosredotochennymi-nagruzkami/view>
7. Experience in the inspection of buildings and structures / A.I., Shein S.V. Bakulev, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2017. – No. 5. Systems'. requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no5/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/5.16/at\\_download/file](http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no5/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/5.16/at_download/file)

УДК 692.421.4

*Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства*

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

**Шишкин Сергей Олегович,**  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: hehaio@mail.ru

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

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

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Shishkin Sergey Olegovich,**  
Postgraduate of the department «Building  
structures»  
E-mail: hehaio@mail.ru

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

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

## ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ И ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ БЕТОННЫХ КОНСОЛЕЙ С АРМАТУРОЙ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА И МЕТАЛЛА

С.О. Шишкин, И.С. Гучкин, Н.Н.Ласьков

Рассматриваются результаты исследования трещинообразования и характера разрушения консолей усиления, армированных стержнями из металла и стеклопластика, обработанного песчаным напылением поверхности. Приводятся экспериментальные данные механических свойств стеклопластиковой арматуры; результаты расчета прочности консолей, армированных металлом и стеклопластиком, а также консолей с обычным и смешанным армированием. Анализируется картина трещин в консолях. Сообщаются выводы и рекомендации.

*Ключевые слова: трещины, характер разрушения, консоль, арматура, стеклопластик, сталь*

## CRACKING AND FRACTURE OF CONCRETE CONSOLES WITH FIBERGLASS AND METAL REINFORCEMENT

S.O. Shishkin, I.S. Guchkin, N.N. Laskov

The results of studying cracks and destruction of gain consoles reinforced with rods of metal and fiberglass, processed by sand-coated surface are discusses. Experimental data of mechanical properties of fiberglass reinforcement; results of calculation of durability of consoles, reinforced with metal and fiberglass; the pattern of cracks and the strength of the consoles with mixed and conventional reinforcement are given. Some conclusions and recommendations are reported.

*Keywords: cracks, nature of the destruction, console, armature, glass plastic, steel*

Железобетонные консоли применяют при усилении отдельных и ленточных фундаментов реконструируемых зданий с целью передачи части нагрузки с фундамента на конструкцию усиления. При этом консоли сопрягаются с фундаментом посредством стальной арматуры (анкеров), которая при наличии в бетоне трещин и агрессивной среды может подвергаться коррозии и выходить из строя. Повысить долговечность и надежность конструкции усиления предлагается за счет дополнительного, к стальной

арматуре, введения в бетон высокопрочного стеклопластика (АСП), стойкого к агрессивным воздействиям [1, 2]. При этом приходится принимать во внимание значительно более низкий (примерно в 4,5 раза) модуль упругости стеклопластика в сравнении со сталью и его недогруженность при совместной работе. Однако если учесть, что в зоне напряжений, соответствующих площадке текучести стали, модули упругости (деформаций) арматуры и стеклопластика сближаются, то в дальнейшем, вплоть до исчерпания несущей способности конструкции, доля усилий, воспринимаемых стеклопластиком, будет возрастать, что положительно повлияет на характер развития трещин и вид разрушения.

Таким образом, в задачи исследований входило уточнение механических характеристик стеклопластика, а также изучение картины трещин и характера разрушения консолей при комплексном (смешанном) армировании стеклопластиковой и стальной арматурой.

На первом этапе эксперимента испытывались на растяжение стержни из стеклопластика, изготовленные в ООО «Композит» Пензенской области. Стержни АСП с песчаным напылением поверхности (3 шт.) имели на концах стальные гильзы (рис. 1), предназначенные для зажатия в губках силовой установки, и испытывались на центральное растяжение.

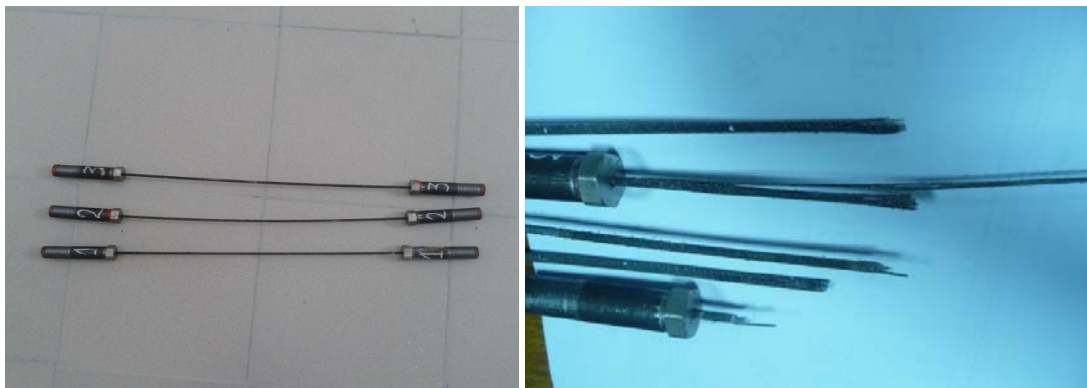


Рис. 1. Стержни АСП до и после испытания

Параметры стержней – рабочая длина 450...480 мм, номинальный диаметр 4 мм. Длина гильз 115 мм, наружный диаметр 20 мм, толщина стенки 2,5 мм. На торцах гильз предусмотрена глухая, стаканного типа, гайка М20 с отверстием диаметром 4,2 мм в центре днища. Концевые участки стержней помещены в гильзы и омоноличены эпоксидной композицией марки SIN-20 при соотношении смола: отвердитель 100:45. После измерения геометрических параметров и нанесения контрольных меток стержни испытывались в лабораторных условиях на разрывной машине марки ЗИМ Р-50 с рабочей шкалой силоизмерителя 100 кН. Нагружение стержней выполнялось плавно со скоростью, примерно равной 1 кгс/мм<sup>2</sup> в секунду (5...50 мм/мин). Результаты испытаний в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Результаты испытаний стержней АСП

№ стержней	Площадь сечения $A$ , мм <sup>2</sup>	Усилие разрыва $N$ , кгс (кН)	Временное сопротивление $\sigma_u = \frac{N}{A}$ , МПа	Относительное удлинение, %
1	12,6	2040 (20,40)	1619,0	1,8
2	12,6	2040 (20,40)	1619,0	1,9
3	12,6	2080 (20,80)	1650,7	2,3

Испытания показали, что разрушение стержней АСП носит хрупкий характер и сопровождается разрывом отдельных волокон и расслоением пряжи (см. рис. 1);

относительное удлинение в зоне разрыва составляет 1,8... 2,3 %; максимальное отклонение результатов испытания образцов от среднего значения не превышает 1,3 %, это указывает на высокую однородность арматуры из стеклопластика.

На втором этапе эксперимента исследовалась работа армированных консолей, соединенных со стойкой продольной арматурой.

Эксперимент выполнялся на образцах крестообразной формы (рис. 2, а, б), что позволило одновременно испытать на изгиб симметрично расположенные консоли. При этом достигалась четкая локализация на поверхности консолей нормальных и наклонных трещин, способствующая наблюдению за картиной их образования и раскрытия.

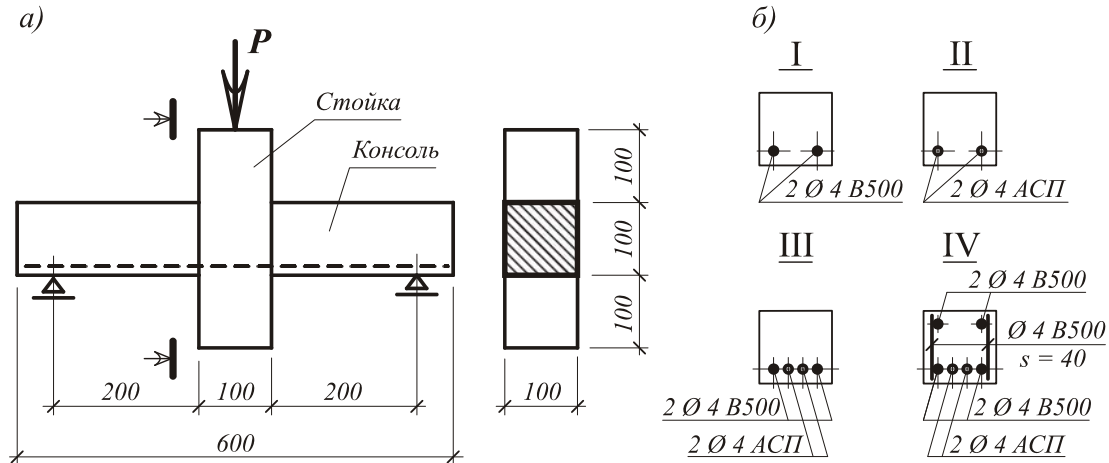


Рис. 2. Лабораторный образец:

а – схема испытаний; б – варианты армирования консолей

Образцы (стойки и консоли) изготавливались из мелкозернистого бетона на кварцевом песке с модулем крупности  $M = 1,5-2,1$  и портландцементе марки М500. Образцы армировались стальной проволокой класса В500 и стеклопластиковой арматурой АСП, выполненной из стекловолокна, скрепленного эпоксидным клеем. Для лучшего сцепления с бетоном арматура АСП имела песчаное напыление поверхности и анкеры на концах.

Было изготовлено четыре серии образцов (рис. 3, а), различающихся по классу бетона, способу армирования, виду и количеству рабочих стержней (см. рис. 2, б): в первых трех сериях присутствовали разные виды продольной арматуры, а в четвертой, кроме того, имелась поперечная стальная арматура с шагом стержней 40 мм.

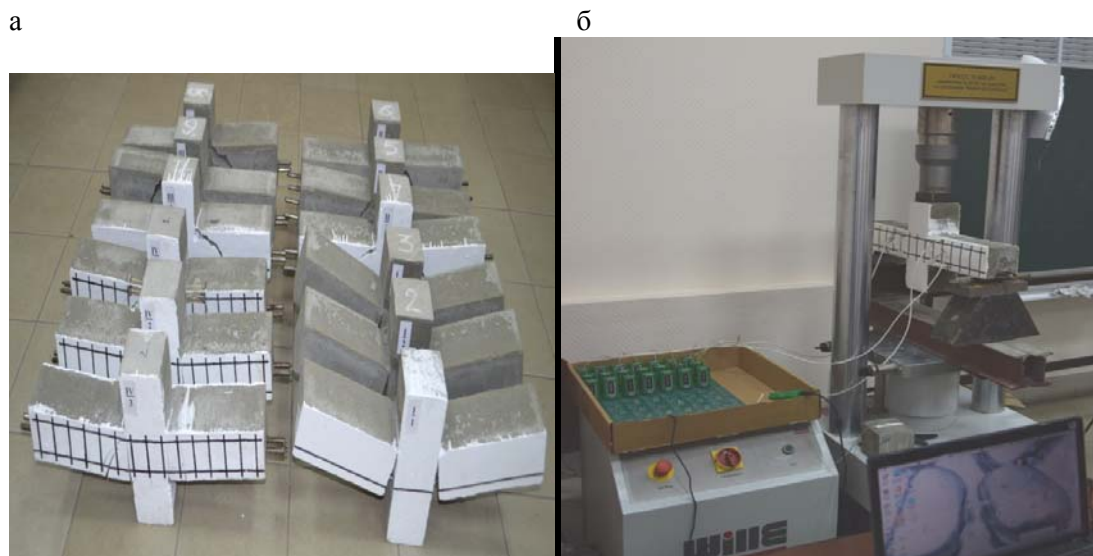


Рис. 3. Опытные образцы:

а – опытные образцы консолей; б – испытание образца в силовой установке

Испытания проводились на прессе марки П-500 со шкалой силоизмерителя 100 кН для консолей и 500 кН – для кубиков. Фрагмент нагружения образца показан на рис. 3,б, картины трещин и характер разрушения консолей представлены на рис. 4, результаты испытаний – в табл. 2/

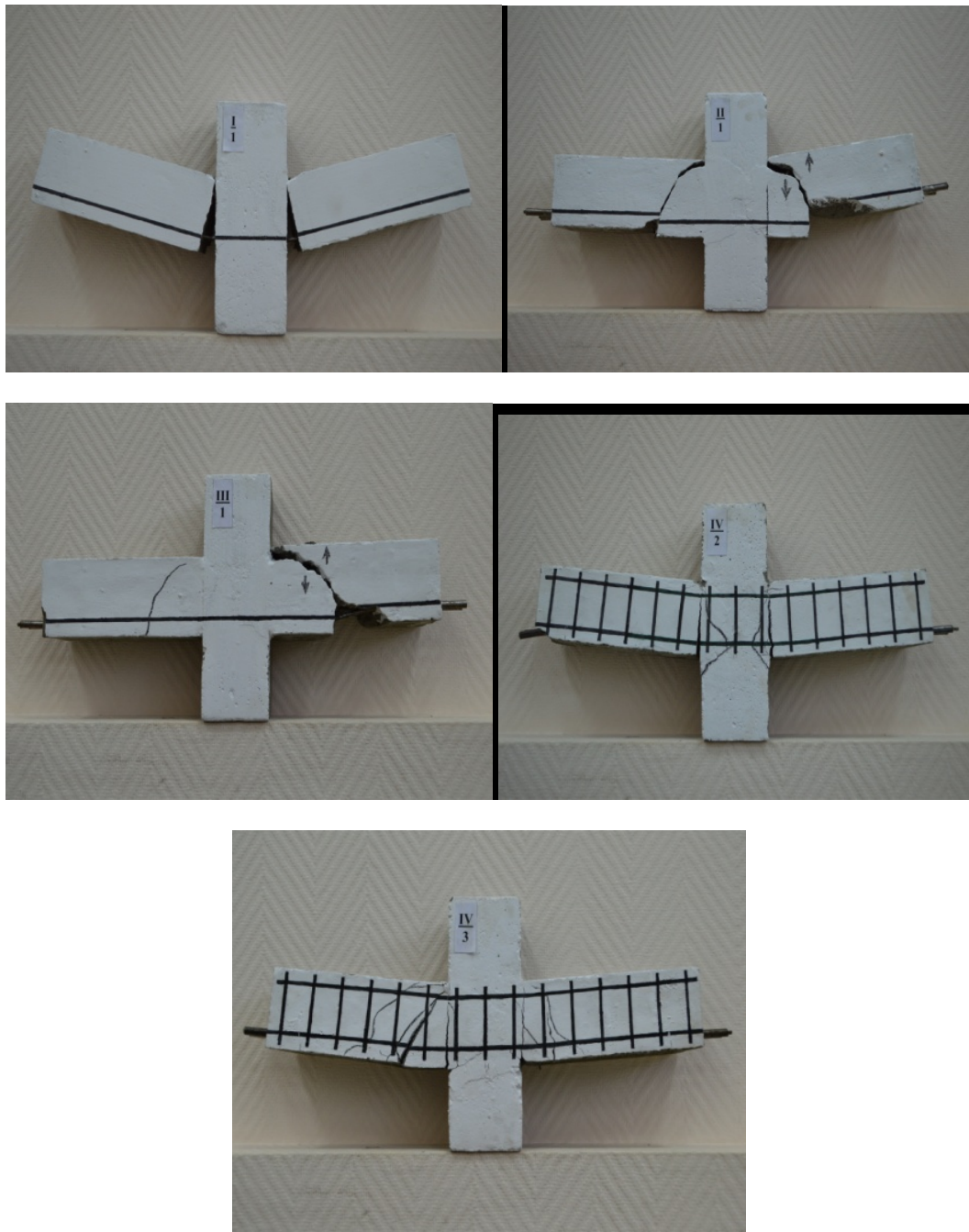


Рис. 4. Картины трещин и виды разрушения образцов (числитель – номер серии, знаменатель – номер образца)

Результаты испытаний консолей

Серия	№ образцов	Класс бетона	Вид трещин разрушения	Разрушающий изгибающий момент $M_r$ , кН·м		Разрушающая поперечная сила $Q_r$ , кН		Разрушающая нагрузка на образец $P_r$ , кН		Проекция трещины разрушения $C_0$ , м
				теор.	эсп.	теор.	эсп.	теор.	эсп.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I	1	B12,5	верт..	0,225	0,65	5,1	–	8,24	6,49	–
	2				0,69				6,95	
	3				0,68				5,75	
II	1	B12,5	наклон.	–	–	5,1	4,6	9,2	0,073	
	2					4,3	10,2	8,6	0,075	
	3					4,85	9,7	0,085		
III	1	B12,5	наклон.	–	–	5,1	5,55	11,1	0,08	
	2					6,25	10,2	12,5	0,09	
	3					6,6	13,2	0,0115		
IV	1	B12,5	наклон.	–	–	10,2	11,0	20,4	22,0	0,08
	2	B20	верт.	3,26	3,16	16,26	–	32,5	30,6	–
	3	B12,5	наклон.	–	–	10,2	12,65	20,4	25,3	0,063

Теоретическая разрушающая нагрузка на консоль по нормальному и наклонному сечениям рассчитывалась по СП 63. 13330.2012 при следующих исходных данных:

бетон класса B12,5 –  $R_{bn} = 8,08$  МПа,  $R_{bt,n} = 0,85$  МПа,  $\gamma = 0,85$ ;

то же класса B20 –  $R_{bn} = 15$  МПа,  $R_{bt,n} = 1,35$  МПа,  $\gamma = 1$ ;

продольная арматура стальная 2 Ø 4 B500 –  $R_{Sn} = 500$  МПа,  $A_S = 0,25$  см<sup>2</sup>;

то же стеклопластиковая 2 Ø 4 АСП –  $R_{aSn} = 1619$  МПа,  $A_a = 0,252$  см<sup>2</sup>;

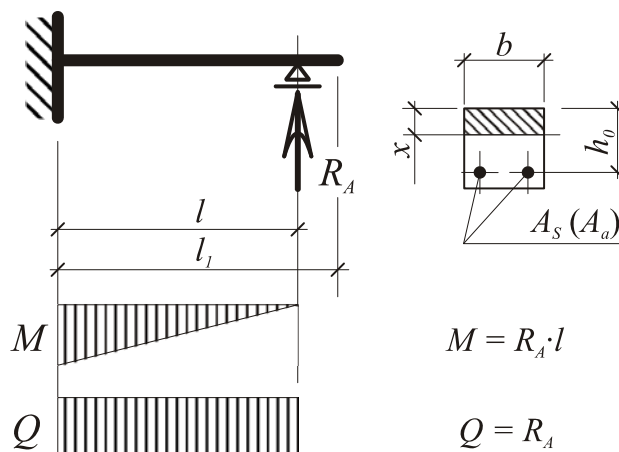
поперечная стальная арматура 2 Ø 4 B500 с шагом  $s = 0,04$  м –  $R_{SW} = 300$  МПа,  $A_{SW} = 0,25$  см<sup>2</sup>;

консоль  $b \times h = 0,1 \times 0,1$  м,  $h_0 = 0,08$  м,  $l = 0,2$  м,  $l_1 = 0,25$  м;

нагрузка на образец –  $P$ , кН; опорная реакция  $R_{A(B)} = P/2$ , кН.

Расчетная схема

Расчетное сечение



Разрушающая нагрузка по моменту при армировании консоли стальной арматурой 2 Ø 4 B500 с учетом ее неполной анкеровки и при бетоне класса B12,5 находилась по формулам:

$$k_a = \frac{l_1}{l_{an}} = \frac{250}{276} = 0,91,$$



где

$$l_{an} = 69d_s = 69 \times 4 = 276 \text{ мм};$$

$$x = \frac{R_{Sn} \cdot k_a \cdot A_S}{R_{bn} \cdot b} = \frac{500 \cdot 0,91 \cdot 0,25}{8,08 \cdot 10} = 1,4 \text{ см} = 0,014 \text{ м};$$

$$M_r = R_{bn} b x (h_0 - 0,5x) = 8,08 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 0,014 \cdot (0,08 - 0,5 \cdot 0,014) = 0,825 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$R_A = \frac{M_r}{l} = \frac{0,825}{0,2} = 4,12 \text{ кН}; \quad P_{r(M)} = 2R_A = 2 \cdot 4,12 = 8,24 \text{ кН}.$$

То же при армировании стеклопластиковой и стальной арматурой 2 Ø 4 АСП + 2 Ø 4 В500 и при бетоне класса В20:

$$x = \frac{R_{Sn} \cdot k_a \cdot A_S + R_{aSn} \cdot A_a}{R_{bn} \cdot b} = \frac{500 \cdot 0,91 \cdot 0,25 + 1619 \cdot 0,25}{15 \cdot 10} = 3,5 \text{ см} = 0,035 \text{ м};$$

$$M_r = 15 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 0,035 \cdot (0,08 - 0,5 \cdot 0,035) = 3,26 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$R_A = \frac{3,26}{0,2} = 16,27 \text{ кН}; \quad P_{r(M)} = 2 \cdot 16,27 = 32,55 \text{ кН}.$$

Разрушающая нагрузка по поперечной силе при отсутствии в консоли поперечной арматуры ( $c = 2h_0 = 0,16 \text{ м}$ ):

$$M_B = 1,5 R_{bt,n} b h_0^2 = 1,5 \cdot 0,85 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 0,08^2 = 0,82 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$Q_b = \frac{M_b}{c} = \frac{0,82}{0,16} = 5,1 \text{ кН}; \quad R_A = Q_b = 5,1 \text{ кН}; \quad P_r = 5,1 \cdot 2 = 10,2 \text{ кН}.$$

Разрушающая нагрузка при наличии поперечной арматуры в консоли 2 Ø 4 В500 с шагом  $s = 0,04 \text{ м}$  ( $c_0 = h_0$ ) и при бетоне класса В12,5:

$$q_{SW} = \frac{R_{SW} A_{SW}}{s} = \frac{300 \cdot 0,25 \cdot 10^{-4}}{0,04} = 187,5 \text{ кН/м};$$

$$Q_{SW} = 0,75 q_{SW} \cdot c_0 = 0,75 \cdot 187,5 \cdot 0,08 = 11,25 \text{ кН} -$$

при  $Q_{SW} > Q_b = 5,1 \text{ кН}$  принимаем  $Q_{SW} = Q_b = 5,1 \text{ кН}$ ;

$$Q_r = Q_b + Q_{SW} = 5,1 + 5,1 = 10,2 \text{ кН};$$

$$R_A = Q_r = 10,2 \text{ кН}; \quad P_r = 10,2 \cdot 2 = 20,4 \text{ кН}.$$

То же при бетоне класса В20:

$$M_B = 1,5 \cdot 1,35 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 0,08^2 = 1,3 \text{ кН} \cdot \text{м}; \quad Q_b = \frac{1,3}{0,16} = 8,13 \text{ кН};$$

при  $Q_{SW} > Q_b = 8,13 \text{ кН}$  принимаем  $Q_{SW} = Q_b = 8,13 \text{ кН}$ ;

$$Q_r = Q_b + Q_{SW} = 8,13 + 8,13 = 16,26 \text{ кН};$$

$$R_A = Q_r = 16,26 \text{ кН}; \quad P_{r(Q)} = 32,5 \text{ кН}.$$

Анализируя данные табл. 2 (серии III, IV), можно заметить, что погрешность расчета прочности консолей со смешанным армированием составляет 13,7...16,2 % по поперечной силе (в запас) и 6,2 % по изгибающему моменту (в минус), т.е. возможно потребуется корректировка расчета прочности.

Изучение картины трещин и характера разрушения консолей показало следующее.

*Консоли без поперечного армирования.*

В образцах серии I, армированных стальной продольной арматурой, **разрушение пластичное**; оно произошло по вертикальной трещине в зоне максимального изгибающего момента (см. рис. 4). Трещина, начиная с нагрузки  $0,5P_r$ , непрерывно росла и в момент разрушения достигла ширины раскрытия 1,2...1,5 мм. Сжатая зона бетона над трещиной подверглась смятию с последующим выкалыванием.

В образцах серии II, армированных стеклопластиковой арматурой,

произошло **хрупкое разрушение** по наклонной трещине в результате исчерпания прочности бетона и среза стержней, попадающих в зону сдвига отделившихся частей тела консоли (см. рис. 4). Трещина разрушения развивалась интенсивно, а ее проекция на горизонтальную ось составляла 73...85 мм. Вертикальная трещина по линии сопряжения консоли со стойкой появилась при нагрузке, примерно равной  $0,7P_r$ , и далее практически не росла.

В образцах серии III смешанное армирование стеклопластиковой и стальной арматурой заметно повлияло на характер разрушения, при этом отсутствовал срез стержней АСП, повысилась прочность консоли (см. табл. 2), выросла длина горизонтальной проекции наклонной трещины разрушения до 80...115 мм, и, кроме того, увеличилось количество хаотически направленных трещин в зоне расположения растянутой арматуры (см. рис. 4). **Разрушение консоли носило менее хрупкий характер.**

*Консоли с поперечным и продольным армированием.*

В образцах серии IV присутствие в консолях поперечной арматуры повлияло на картину образования наклонных трещин и характер разрушения, а именно: отсутствовал вертикальный сдвиг в сжатой зоне наклонного сечения; практически отсутствовал горизонтальный участок на трещине разрушения (базовая трещина); появились сопутствующие базовой новые наклонные трещины; образовались отсутствующие в предшествующих сериях клинообразные трещины выкола на стойке (см. рис. 4). Вертикальные трещины по линии сопряжения консоли со стойкой имели в момент разрушения ширину раскрытия 1...1,2 мм. **Разрушение консоли носило пластичный характер** и отличалось развитием широкой сети хаотично направленных трещин, расположенных вдоль растянутых стержней.

С увеличением прочности бетона (класс В20) разрушение консоли также было пластичное и произошло по вертикальной, с шириной раскрытия 4..5 мм, трещине в зоне сопряжения со стойкой. При этом наклонные трещины практически отсутствовали (см. рис. 4, образец IV/2).

#### Выводы

Стеклопластиковая арматура (АСП) имеет высокую прочность и однородность. Относительное удлинение после разрыва не более 2,3 % .

Использование стержней из стеклопластика в комплексном со сталью продольном армировании консоли и при наличии поперечной стальной арматуры, по показателям прочности, картины трещин и вида разрушения, вполне допустимо, однако требуются соответствующее технико-экономическое обоснование и испытание длительной нагрузкой.

Армирование консолей стержнями из стеклопластика, при отсутствии поперечной арматуры, нежелательно из-за высокой вероятности среза стержней в зоне разрушения по наклонной трещине и хрупкого (внезапного) разрушения.

## Список литературы

1. Мухамедиев, Т.А. Расчет по прочности нормальных сечений железобетонных конструкций, усиленных композиционными материалами / Т.А. Мухамедиев // Бетон и железобетон. – 2013. – №6. – С. 20–23.
2. Гучкин, И.С. Арматура из стеклопластика с песчаным напылением поверхности / И.С. Гучкин, С.О. Шишкин // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: сб. – Пенза, 2016. – С. 61–65.

## References

1. Mukhamediev, T.A. Calculation of the strength of normal sections of reinforced concrete structures reinforced with composite materials / T.A. Mukhamediev // Concrete and reinforced concrete. – 2013. – №6. – P. 20–23.
2. Guchkin I.S., Shishkin S.O. Fiberglass reinforcement with sandy surface spraying / I.S. Guchkin, S.O. Shishkin // Effective building structures: theory and practice. – Penza, 2016. – P. 61–65.

УДК 624.011.1

*Дагестанский государственный  
технический университет*Россия, 367015, Махачкала,  
пр. И. Шамиля, д.70,  
тел.: (8722) 62-37-15**Устарханов Осман Магомедович,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Строительные конструкции  
и гидротехнические сооружения»  
E-mail: asf\_skgts@mail.ru**Муселемов Хайрулла Магомедмуратович,**  
кандидат технических наук, старший  
преподаватель кафедры «Строительные  
конструкции и гидротехнические  
сооружения»  
E-mail: hairulla213@mail.ru**Ирзаев Гаджи Гамидович,**  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции и гидротехнические  
сооружения»  
E-mail: irzajev@mail.ru*Daghestan State Technical University*Russia, 36701570, Makhachkala, 70,  
I. Shamyil Ave,  
tel.: (8722) 62-37-15**Ustarhanov Osman Magomedovich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Building Structures  
and Hydraulic Structures»  
E-mail: asf\_skgts@mail.ru**Muselemov Hairulla Magomedmuradovich,**  
Candidate of Sciences, Senior Tutor of the  
department «Building Structures and  
Hydraulic Structures»  
E-mail: hairulla213@mail.ru**Irzaev Gadzhi Gamidovich,**  
Postgraduate of the department «Building  
Structures and Hydraulic Structures»  
E-mail: irzajev@mail.ru

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПАНЕЛИ С ВОЛОКНИСТЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ПРИ ДЕЙСТВИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ И СОСРЕДОТОЧЕННОЙ НАГРУЗОК\*

О.М. Устарханов, Х.М. Муселемов, Г.Г. Ирзаев

Рассмотрены трехслойные конструкции, обладающие при малом весе повышенной жесткостью на изгиб, что позволяет получить значительный выигрыш в весе для конструкций, воспринимающих сжимающие усилия. Выведены аналитические зависимости для расчета трехслойной конструкции, на которую действует равномерно распределенная по поверхности нагрузка в сочетании со сжимающим усилием, воздействующим в плоскости срединной поверхности конструкции, и сосредоточенной импульсной силой.

*Ключевые слова:* трехслойная конструкция, несущий слой, динамическая нагрузка, волокнистый материал, импульсная сила

## ANALYSIS OF SANDWICH PANEL WITH A FIBER FILLER UNDER THE ACTION OF DYNAMIC EVENLY DISTRIBUTED AND CONCENTRATED LOADS

О.М. Ustarkhanov, К.М. Muselemov, G.G. Irzaev

Sandwich structures have an increased bending stiffness with low weight which makes it possible to achieve a significant saving of weight for the structures taking compressive forces. The analytical dependences for analysis of sandwich structure, which is subjected to a load uniformly distributed over the surface in combination with a compressive force acting in the plane of a structure middle surface and a concentrated impulse force, have been derived in the article.

*Keywords:* sandwich structure, base layer, dynamic load, fibrous material, impulse force

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-6112.2018.8.

Трехслойные пакеты обладают высокими теплоизолирующими, звукопоглощающими и радиотехническими свойствами, что является немаловажным фактором при эксплуатации ряда современных строительных объектов различного назначения. Опыт эксплуатации и обработки объектов с применением трехслойных конструкций позволяет говорить о соответствии их таким функциональным требованиям, как достаточная несущая способность, долговечность, высокое термическое сопротивление и звукоизоляция, низкая стоимость в монтаже и эксплуатации, в целом высокая эффективность.

Наиболее полно всем этим требованиям удовлетворяют трехслойные панели с наружными слоями из листовых материалов – металла, асбестоцемента – и средним слоем в форме сот, перемычек, гофрировки из резины, пробки, древесины, пластмассы (рис. 1). Наружные слои такой конструкции способны воспринимать усилия растяжения и сжатия, однако промежуточный слой обладает низкой прочностью на сдвиг. Несущая способность всей панели во многом зависит от жесткости среднего слоя.

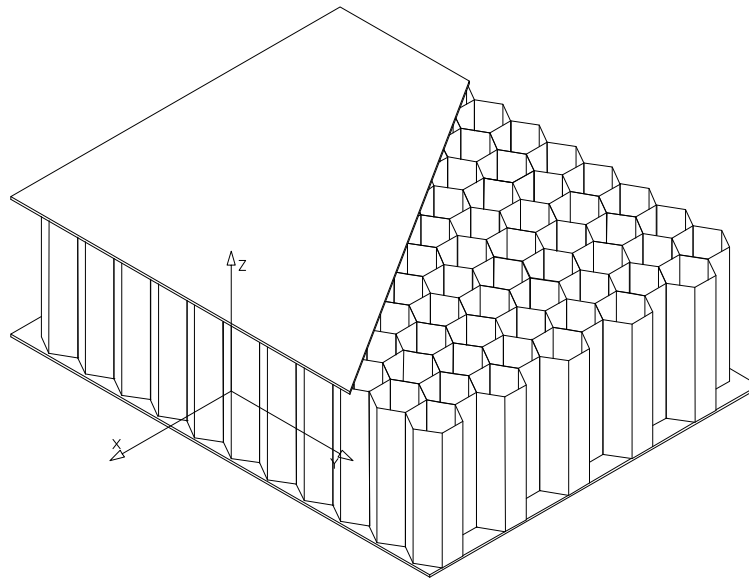


Рис. 1. Общий вид трехслойной конструкции

Требования, предъявляемые к современным трехслойным панелям, непрерывно повышаются, что приводит к необходимости решения различных задач по определению их параметров [1–6]. Они должны быть легкими и прочными, воспринимать статические и динамические нагрузки, обладать многофункциональностью.

В статье рассматривается задача по расчету трехслойной панели, на которую действует равномерно распределенная по поверхности нагрузка в сочетании со сжимающим усилием, действующим в плоскости срединной поверхности конструкции, и сосредоточенной импульсной силой. Расчетная схема конструкции представлена на рис. 2.

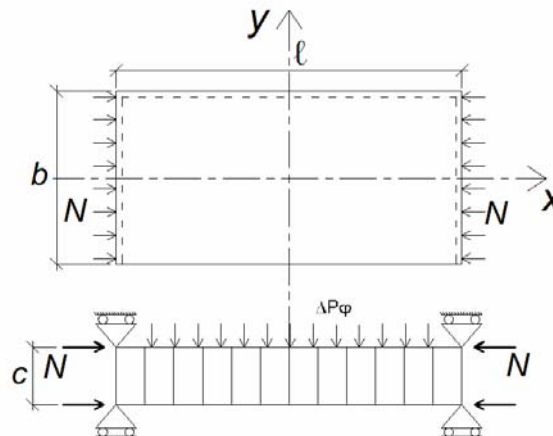


Рис. 2. Расчетная схема трехслойной панели

Сама трехслойная конструкция состоит из несущих слоев и дискретного заполнителя, наполненного волокнистым материалом. Расчет конструкции на действие равномерно распределенной нагрузки можно произвести с помощью зависимостей, представленных в [7], для определения приведенных характеристик использовать зависимости, предложенные в [8–12].

Действующие в несущих слоях максимально нормальные напряжения равны:

$$\sigma_{\max} = -E_{1,2} \left\{ \frac{qb^2(h+t)m_2}{\frac{E_{1,2}t}{1-\gamma_{1,2}^2} \left[ \frac{t^2}{6} + 2 \left( h + \frac{t}{2} \right)^2 \right]} + \frac{N}{2 \frac{E_{1,2}t}{1-\gamma_{1,2}^2}} \right\}, \quad (1)$$

где  $N$  – интенсивность на единицу длины контура сжимающих усилий;  $q$  – интенсивность на единицу площади равномерно распределенной нагрузки;  $m_2$  – коэффициент, зависящий от характера закрепления кромок.

Сдвигающие напряжения в заполнителе определяются как

$$\tau_{\text{сдв}} = \frac{qb \left( h + \frac{1}{2} \right) m_2}{4 \left[ \frac{t^2}{2} + 2 \left( h + \frac{t}{2} \right)^2 \right]}. \quad (2)$$

Критическая напряженность потери устойчивости трехслойной конструкцией (пластиной) при рассматриваемой схеме нагружения равна:

$$\sigma_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 \frac{E_{1,2}t}{1-\gamma_{1,2}^2} \left[ \frac{t^2}{6} + 2 \left( h + \frac{t}{2} \right)^2 \right]}{b^2 t \left[ 1 + \frac{\pi^2 E_{1,2} t h}{(1-\gamma_{1,2}^2)^2 G_{xz_3} b^2} \right]}. \quad (3)$$

Варьируя величинами  $t$ ,  $E_{1,2}$ ,  $h$ ,  $G_{xz_3}$ ,  $\gamma_{1,2}$ , при заданных  $q$ ,  $N$ ,  $b$  можно, исходя из зависимостей

$$\sigma_{\max} \approx \sigma_{\text{кр}}, \quad \tau_{\text{сдв}} < \tau_{xz_3},$$

получить параметры трехслойной конструкции, близкие к оптимальным, при действии равномерно распределенной нагрузки  $q$  и сжимающих усилий  $N$ .

Масса трехслойной конструкции равна:

$$M_{\text{расч}} = ab(t_1 \rho_1 + 2h \rho_3 + t_2 \rho_2), \quad (4)$$

где  $a$ ,  $b$  – размеры трехслойной конструкции в плане;  $\rho_i$  – плотность материала слоев трехслойной конструкции ( $i = 1, 2, 3$ ).

Приведенная весовая эффективность трехслойной конструкции:

$$\bar{\rho}_{\text{расч}} = \frac{M_{\text{расч}}}{ab(t_1 + 2h + t_2)}. \quad (5)$$

Требование, предъявляемое к трехслойной конструкции, подверженной действию импульсивной сосредоточенной нагрузки, заключается в том, что при воздействии ударника массой  $m_{y0}$ , имеющего начальную скорость  $v_0$ , конструкция должна:

а) погасить скорость до величины  $v_1$ , которая обусловлена предельным запрградным действием ударника, при этом конструкция становится негерметичной;

б) погасить скорость до величины  $v_1 = 0$ , что соответствует требованию сохранения герметичности конструкции.

Исходя из вышеприведенного, можно записать условие распределения величин скоростей, которые гасятся на каждом слое трехслойной конструкции

$$v_0 = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_1, \quad (6)$$

где  $\Delta_1$  – потеря скорости на первом несущем слое;  $\Delta_2$  – потеря скорости на волокнистом материале;  $\Delta_3$  – потеря скорости на втором несущем слое.

Запреградная скорость  $v_1$  равна:

$$v_1 = v_0 - (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_1), \quad (7)$$

Исходя из того, что энергия пробивания коническим ударником несущего слоя равна [2]:

$$W = \pi t_{1,2} R^2 \left[ \rho \left( \frac{v_0 R}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \sigma_T \right], \quad (8)$$

имеем

$$\frac{m_{уд} \Delta_{1,2}^2}{2} = \pi t_{1,2} R^2 \left[ \rho \left( \frac{v_0 R}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \sigma_T \right], \quad (9)$$

где  $\sigma_T$  – предел прочности материала пробиваемого слоя;  $t$  – толщина пробиваемого слоя;  $R$  – радиус ударника;  $L$  – длина головки ударника;  $\Delta_{1,2}$  – потеря скорости на пробиваемом несущем слое.

Тогда

$$v_1 = v_0 \left\{ \left[ \frac{\pi t_1 R^2 \left[ \rho \left( \frac{v_0 R}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \sigma_T \right]}{m_{уд}} \right]^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{\pi t_2 R^2 \left[ \rho \left( \frac{v_0 R}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \sigma_T \right]}{m_{уд}} \right]^{\frac{1}{2}} + \Delta_3 \right\}. \quad (10)$$

Если принять, что запреградная скорость  $v_1 = 0$ , а свободно-армированный наполнитель отсутствует, то имеем:

$$v_0 = \left[ \frac{\pi t_1 R^2 \left[ \rho \left( \frac{v_0 R}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \sigma_T \right]}{m_{уд}} \right]^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{\pi t_2 R^2 \left[ \rho \left( \frac{v_0 R}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \sigma_T \right]}{m_{уд}} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

При равных толщинах и материалах несущих слоев получим:

$$v_0^2 = 4 \frac{\pi t_{1,2} R^2 \left[ \rho \left( \frac{v_0 R}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \sigma_T \right]}{m_{уд}}. \quad (12)$$

Таким образом, энергия пробивания несущих слоев равна энергии ударника (при условии  $v_1 = 0$ ), которая рассчитывается как

$$W_{\text{уд}} = \frac{m_{\text{уд}0}^2}{2} = W_{\text{нс}}, \quad (13)$$

откуда

$$v_0^2 = \frac{4\pi t_{1,2} R^2 \sigma_T}{m_{\text{уд}} - 8\pi t_{1,2} \frac{\rho}{L}}. \quad (14)$$

Толщина пробиваемого несущего слоя равна:

$$t_{1,2\text{пр}} = \frac{v_0^2 m_{\text{уд}}}{8\pi t_{1,2} R^2 \left[ \rho \left( \frac{v_0 R}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \sigma_T \right]}. \quad (15)$$

Толщина полученного несущего слоя  $t_{1,2\text{пр}}$  должна быть не меньше  $t_{1,2}$ , полученной при учете несущей способности от распределенной нагрузки.

Тогда масса трехслойной конструкции будет равна:

$$M_{\text{тк}} = ab \left( t_{1,2\text{пр}} \rho_{\text{нс}} + 2h\rho_3 \right), \quad (16)$$

а относительная весовая эффективность

$$\bar{M}_{\text{тк}} = \frac{t_{1,2\text{пр}} \rho_{\text{нс}} + 2h\rho_3}{t_{1,2\text{пр}} \rho_{\text{нс}} + 2h\rho_3} \quad (17)$$

будет равна или меньше единицы. При  $\bar{M}_{\text{тк}} = 1$  усиления не требуется.

Если принять, что для повышения стойкости трехслойной конструкции к действию сосредоточенной импульсной нагрузки применяется волокнистый материал, то следует вычислить скорость ударника, теряемую на пробивание несущих слоев толщиной  $t_{1,2}$ . Скорость определяется из условия прочности к действию распределенной и продольной сжимающей нагрузок как

$$v_{1,2} = \frac{\pi t_{1,2} R^2 \left[ \rho \left( \frac{v_0 R}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \sigma_T \right]}{m_{\text{уд}}}. \quad (18)$$

Из условия равенства нулю запреградной скорости  $v_1 = 0$  находим величину скорости, которую следует погасить на волокнистом материале, как

$$\Delta_3 = v_0 - v_{1,2}. \quad (19)$$

Из построенного по экспериментальным данным графика, приведенного на рис. 3, можно определить необходимую плотность волокнистого материала, обеспечивающую потерю скорости ударником заданной массы и геометрии, равную  $\Delta_3$ .

Определив  $\rho_{3\text{вм}}$ , найдем массу трехслойной конструкции:

$$M_{\text{тк}} = ab \left[ t_{1,2} \rho_{\text{нс}} + 2h(\rho_3 + \rho_{3\text{вм}}) \right]. \quad (20)$$



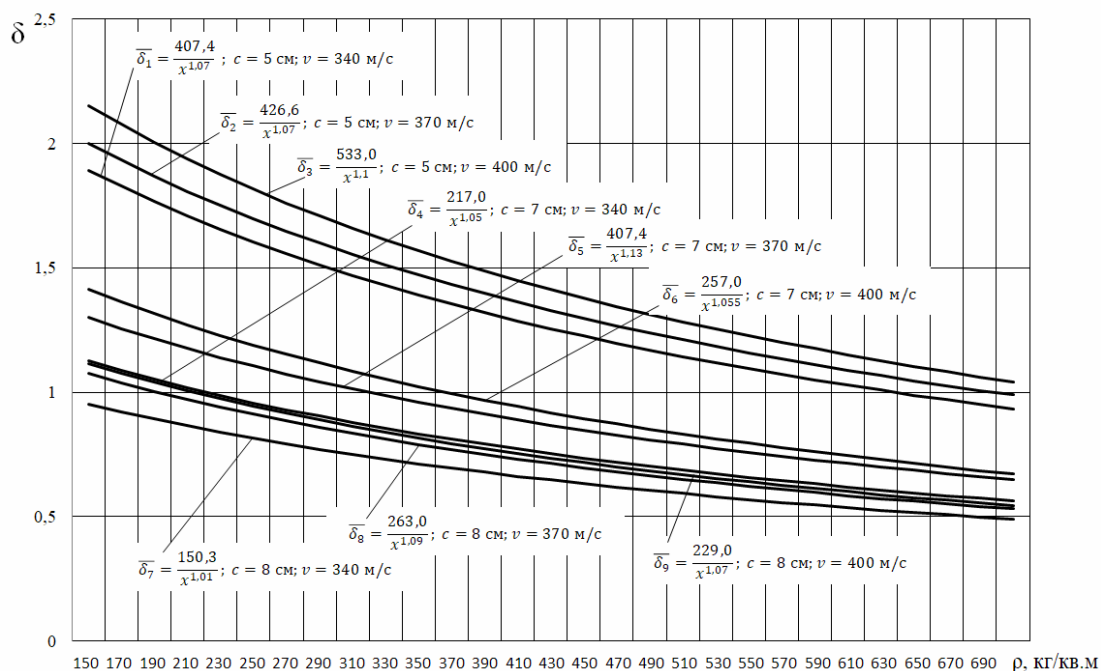


Рис.3. Зависимость относительной толщины пробивания ударником от плотности волокнистого материала

Относительная весовая эффективность трехслойной конструкции будет равна:

$$\bar{M}_{\text{TK2}} = \frac{t_{1,2}\rho_{\text{HC}} + 2h\rho_3}{t_{1,2}\rho_{\text{HC}} + 2h(\rho_3 + \rho_{3\text{BM}})}. \quad (21)$$

При  $\bar{M}_{\text{TK2}} = 1$  усиления не требуется. Эффективность того или иного метода усиления трехслойной конструкции для придания стойкости к воздействию импульсной сосредоточенной силы может быть определена из соотношения

$$\partial L = \frac{\bar{M}_{\text{TK1}}}{\bar{M}_{\text{TK2}}}. \quad (22)$$

При  $\partial L > 1$  более эффективно усиление путем увеличения толщины несущих слоев; при  $\partial L < 1$  более эффективно введение волокнистого материала. При  $\partial L = 1$  усиления не требуется,  $\rho_{3\text{BM}} = 0$ ,  $t_{1,2} = t_{1,2\text{пр}}$ .

#### ВЫВОДЫ

1. Предложен инженерный метод расчета параметров трехслойной стеновой панели с дискретным заполнителем, межслойное пространство которой заполнено волокнистым материалом, при одновременном действии сосредоточенной динамической силы, равномерно распределенной по поверхности нагрузки в сочетании со сжимающими усилиями, действующими в плоскости срединной поверхности конструкции.
2. Полученные экспериментальным путем зависимости толщины пробивания волокнистого материала от его плотности позволяют рассчитать эффективные характеристики трехслойной конструкции при заданных внешних воздействиях.

#### Список литературы

1. Vibration analysis of bilayered FGM cylindrical shells / S.H. Arshad [et al.] // J. Appl. Mechanics. – 2011. – Vol. 8 (81). – P. 319–343.
2. Singh, Bhagat. Dynamic analysis of damping in layered and welded beams / Singh Bhagat, Bijoy Kumar Nanda // J. Engineering Structures. – 2013. – Vol. 48. – P. 10–20.

3. Dao Van Dung Nonlinear buckling and post-buckling analysis of eccentrically stiffened functionally graded circular cylindrical shells under external pressure / Dao Van Dung, Kha Hoa Le // *J. Thin-Walled Structures*. – 2013. – Vol. 63. – P. 117–124.
4. Pentaras, D. Polar Orthotropic Inhomogeneous Circular plates: Vibration Tailoring / Pentaras D., Elishakoff I. // *J. Appl. Mechanics*. – 2010. – Vol. 77 (3). – P. 310-319.
5. Li Peng. The aeroelastic stability and bifurcation structure of subsonic nonlinear thin panels subjected to external excitation / Li Peng, Yang Yiren, Xu Wei, Chen Guo // *J. Arch. Appl. Mech.* – 2012. – Vol. 82. – P. 1251–1267.
6. Avades, K. Free vibration analysis of laminated composite plates with elastical lyrestained edges using FEM / K. Avades, N.D. Sharma // *Central European Journal of Engineering*. – 2013. – Vol. 3 (2). – P. 306-315.
7. Биргер, И.А. Прочность. Устойчивость. Колебания / И.А. Биргер, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 463 с.
8. Гольдсмит, В. Удар. Теоретические и физические свойства соударяемых тел / В. Гольдсмит. – М.: Стройиздат, 1965. – 448 с.
9. Определение оптимальных размеров и форм сотового заполнителя для трехслойной конструкции при действии статической нагрузки / О.М. Устарханов, Х.М. Муселемов, У.А. Киявов, Т.О. Устарханов // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. – 2013. – № 3, Т.30. – С. 48–54.
10. Устарханов, О.М. Экспериментальное исследование прочности конического заполнителя для трехслойных конструкций / О.М. Устарханов, М.С. Алибеков, Т.О. Устарханов // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2014. – № 9. – С. 54–59.
11. Устарханов, О.М. Экспериментальные исследования трехслойных балок с пирамидальным дискретным заполнителем / О.М. Устарханов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2016. – № 2. – С. 59–64.
12. Керимов, Р.М. Расчет трехслойных конструкций при динамическом нагружении сосредоточенной нагрузкой / Р.М. Керимов, Х.М. Муселемов, О.М. Устарханов // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. – 2015. – № 3 (38). – С. 110–118.

#### References

1. Vibration analysis of bilayered FGM cylindricalshells / S.H. Arshad [etc.] // *J. Appl. Mechanics*. – 2011. – Vol. 8 (81). – P. 319–343.
2. Singh, Bhagat. Dynamic analysis of damping in layered and welded beams / Singh Bhagat, Bijoy Kumar Nanda // *J. Engineering Structures*. – 2013. – Vol. 48. – P. 10–20.
3. Dao Van Dung Nonlinear buckling and post-buckling analysis of eccentrically stiffened functionally graded circular cylindrical shells under external pressure / Dao Van Dung, Kha Hoa Le // *J. Thin-Walled Structures*. – 2013. – Vol. 63. – P. 117–124.
4. Pentaras, D. Polar Orthotropic Inhomogeneous Circular plates: Vibration Tailoring / Pentaras D., Elishakoff I. // *J. Appl. Mechanics*. – 2010. – Vol. 77 (3). – P. 310-319.
5. Li Peng. The aeroelastic stability and bifurcation structure of subsonic nonlinear thin panels subjected to external excitation / Li Peng, Yang Yiren, Xu Wei, Chen Guo // *J. Arch. Appl. Mech.* – 2012. – Vol. 82. – P. 1251–1267.
6. Avades, K. Free vibration analysis of laminated composite plates with elastical lyrestained edges using FEM / K. Avades, N.D. Sharma // *Central European Journal of Engineering*. – 2013. – Vol. 3 (2). – P. 306-315.
7. Birger, I.A. Strength. Stability. Fluctuations / I.A. Birger, Y.G. Panovko. – М., Machine building, 1968. – 463 p.
8. Goldsmith, B. Theoretical and physical properties of colliding bodies / B. Goldsmith. – М.: Stroyizdat, 1965. – 448 p.

9. Determination of honeycomb filler optimum sizes and shapes for sandwich structure under the action of static load / O.M. Ustarkhanov, K.M. Muselemov, U.A. Kiyavov, T.O. Ustarkhanov // Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences. – 2013. – No.3, Vol. 30. – P. 48–54.

10. Ustarkhanov, O.M. Experimental study of the conical filler strength for sandwich structures / O.M. Ustarkhanov, M.S. Alibekov, T.O. Ustarkhanov // Proceedings of the Higher Educational Institutions. Machine building. – 2014. – Vol. 9. – P. 54–59.

11. Ustarkhanov, O.M. Experimental studies of sandwich beams with a discrete pyramidal aggregate / O.M. Ustarkhanov, K.M. Muselemov, T.O. Ustarkhanov // Proceedings of the Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 2. – P. 59–64.

12. Kerimov, R.M. Analysis of sandwich structures when subjected to dynamic loading with a concentrated load / R.M. Kerimov, K.M. Muselemov, O.M. Ustarkhanov // Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences. – 2015. – Vol. 3 (38). – P. 110–118.

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

**Гарькин Игорь Николаевич,**  
доцент кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: igor\_garkin@mail.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Garkin Igor Nikolaevich,**  
Associate Professor of the department  
«Quality management and technology of  
building production»  
E-mail: igor\_garkin@mail.ru

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВНЫХ НЕРАЗРЕЗНЫХ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК

И.Н. Гарькин

Приведены результаты теоретических исследований неразрезных подкрановых балок методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. Результаты исследований подтверждены при испытаниях металлических двутавровых сварных подкрановых балок в лаборатории «Выносливость подкрановых конструкций» кафедры «Строительные конструкции» ПГУАС.

*Ключевые слова: подкрановая балка, циклические испытания, предел выносливости, методы расчёта, метод конечных элементов, ANSYS*

## THEORETICAL STUDIES OF COMPOUND CONTINUOUS OVERHEAD CRANE BEAMS

I.N. Garkin

The results of theoretical studies of continuous crane beams by the finite element method using the ANSYS software are presented. The results of the studies were confirmed during testing of metal I-beams of crane girders in the laboratory «Endurance of crane structures» of the department «Building structures» of PGUAS.

*Keywords: crane beam, cyclic tests, endurance limit, calculation methods, finite element method, ANSYS*

При расчёте подкрановых балок промышленных зданий и сооружений на выносливость всегда должен учитываться циклический характер динамических воздействий от мостовых кранов. В подрельсовой зоне стенки подкрановой балки развиваются усталостные трещины, увеличивающие до опасного уровня возможность разрушения конструкций. Процесс накопления повреждений протекает постепенно.

Этот процесс обычно определяется как усталость металла; соответствующее разрушение называют усталостным. Аварии в цехах цветной и черной металлургии или на ТЭЦ обычно ведут к катастрофическим последствиям (человеческие жертвы, существенный материальный ущерб). Актуальность проблемы возрастает в связи с быстрым обветшанием промышленного фонда страны.

Ниже приводятся результаты теоретических исследований и расчет на выносливость конструкции подкрановой балки (сталь из стандартной библиотеки ANSYS), нагруженной заданными подвижными нагрузками от крана.

*Основные задачи исследований:*

- определение наиболее неблагоприятного положения мостового крана, при котором возникают наибольшие изгибающие моменты в сечениях конструкции;
- определение напряжений в элементах конструкции в наиболее нагруженном сечении балки;
- оценка выносливости (определение количества циклов до начала разрушения конструкции от заданных подвижных нагрузок по критерию превышения предельных касательных напряжений).

Предполагается справедливость допущений:

- элементы сечения, соединенные между собой болтами и сваркой, считаются работающими совместно, без разрывов;
- подвижная нагрузка, имитирующая крановую нагрузку, считается статической (отсутствие динамических сил);
- силы инерции и силы затухания не рассматриваются (статический расчёт);
- напряжения изменяются в соответствии с законом изменения изгибающего момента в наиболее нагруженном сечении (рис. 1).

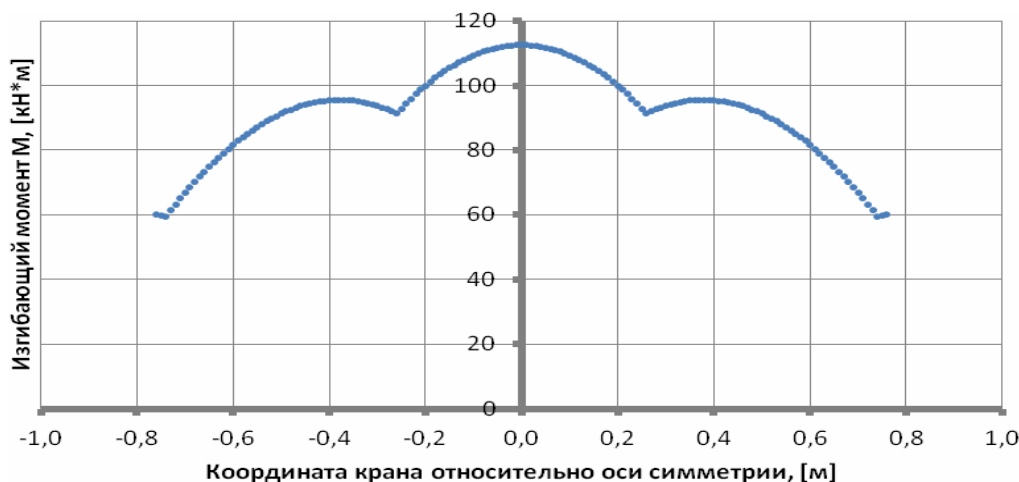


Рис.1. Линия влияния изгибающего момента для наиболее нагруженного сечения (середина балки)

Для установления наиболее опасного положения катков крана были определены линии влияния изгибающих моментов по программе «МЕТ» (определялись внутренние усилия методом сил). На рис. 1 показана линия влияния изгибающего момента от движущегося крана для наиболее нагруженного сечения (*середина балки*).

Эпюра изгибающих моментов от крановой нагрузки в наиболее неблагоприятном положении показана на рис. 2.

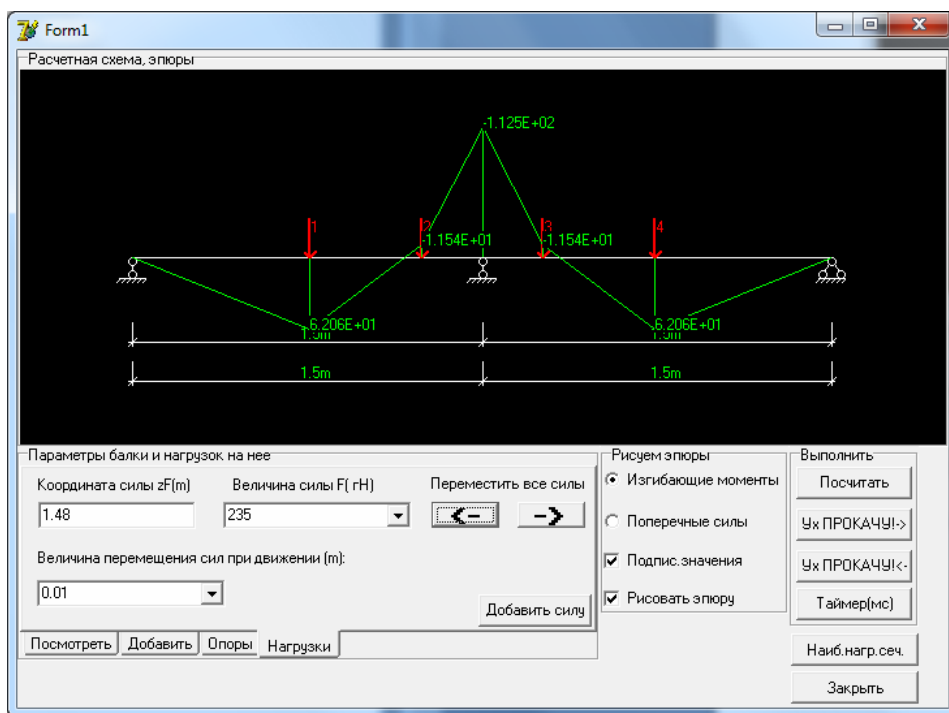


Рис. 2. Эпюра изгибающих моментов

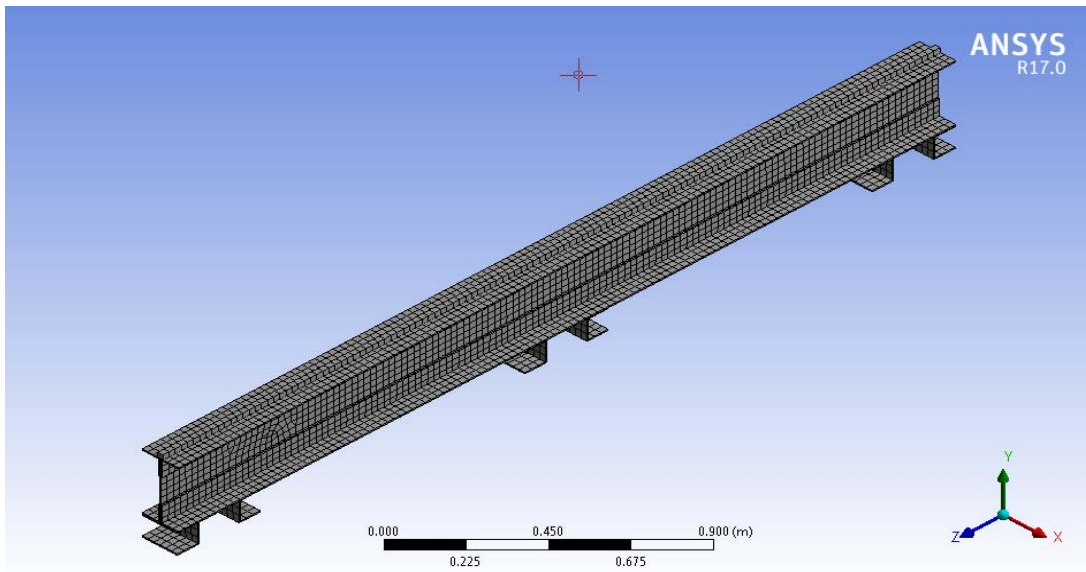


Рис. 3. Сетка КЭ

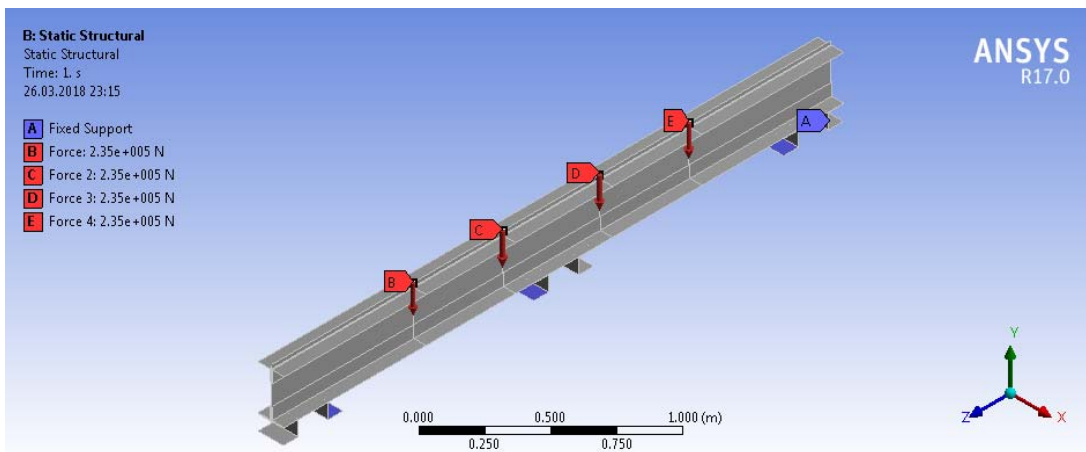


Рис. 4. Схема нагружения балки

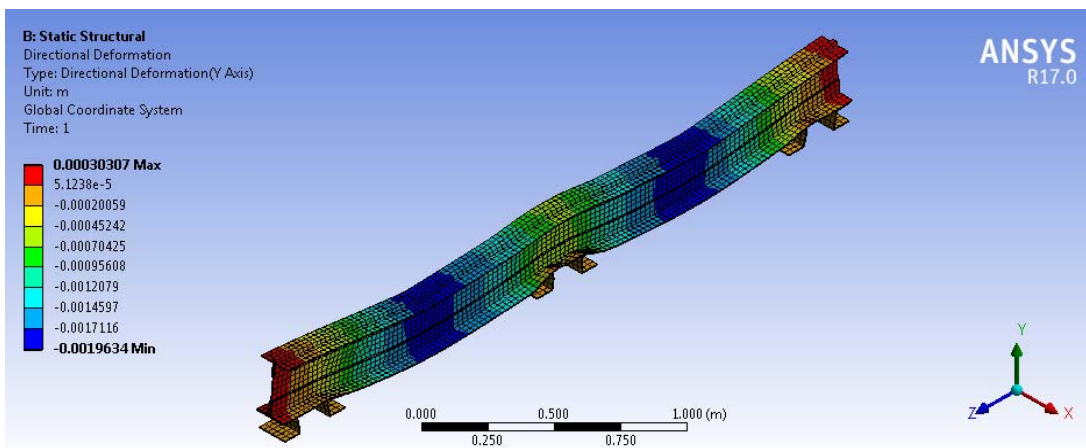


Рис. 5. Эпюра прогибов

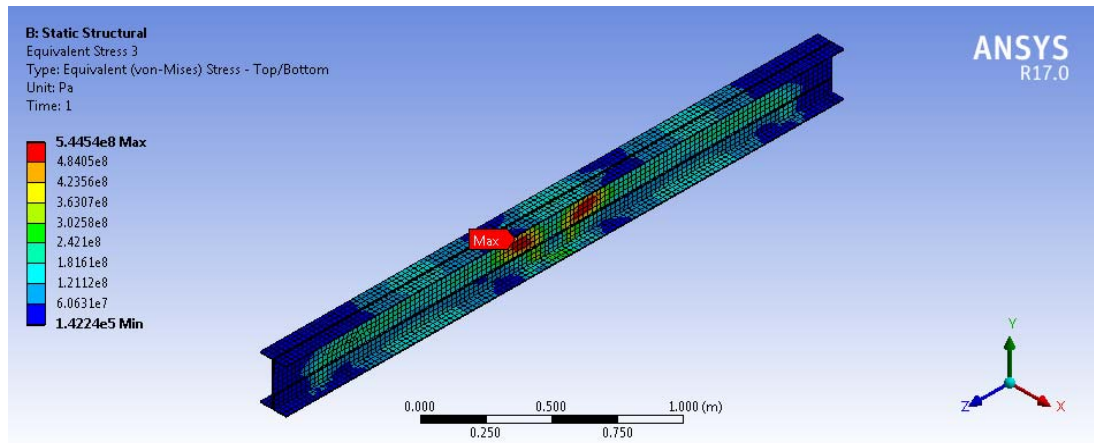


Рис. 6. Эпюра эквивалентных напряжений по Вон-Мизесу

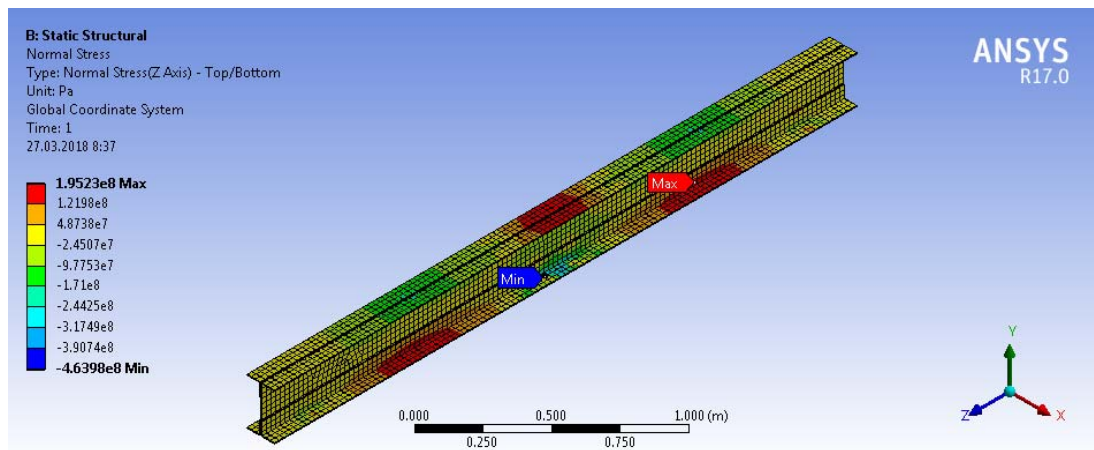


Рис. 7. Эпюра нормальных напряжений от изгибающего момента

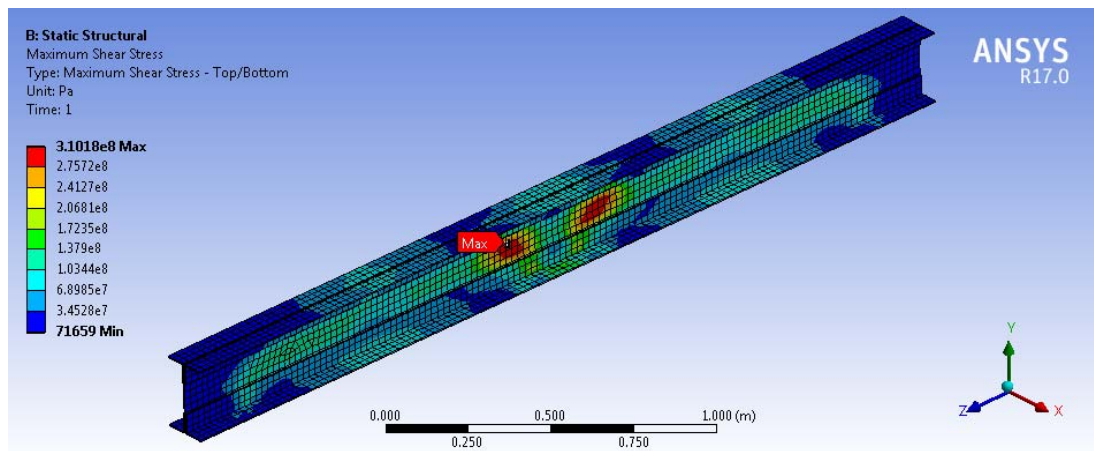


Рис. 8. Эпюра наибольших касательных напряжений

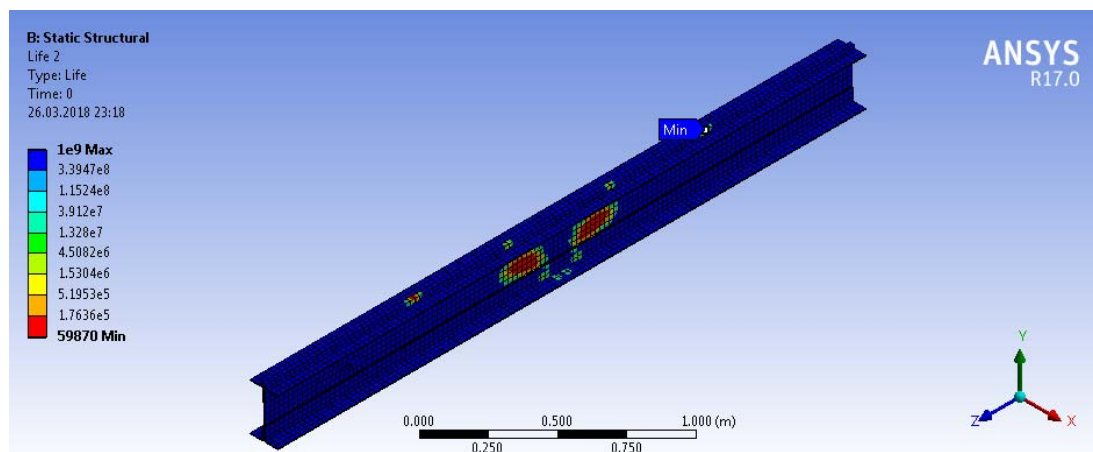


Рис. 9. Количество циклов до появления разрушений по критерию превышения наибольшими касательными напряжениями предела прочности

Таким образом, расчёт методом конечных элементов позволяет утверждать, что разработанная подкрановая балка сохраняет свою работоспособность до 6 миллионов циклов нагружений. Результаты подтвердились при последующих экспериментальных исследованиях.

#### Список литературы

1. Нежданов, К.К. Испытание неразрезных подкрановых балок на выносливость / К.К. Нежданов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №2. – С.81–86.
2. Гарькин, И.Н. Экспериментальное определение выносливости составных неразрезных подкрановых балок / И.Н. Гарькин // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2017. – №2. – 28–34.
3. Нежданов, К.К. Преимущества использования неразрезных подкрановых конструкций / К.К. Нежданов, И.Н. Гарькин // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2018. – №1. – С. 9–16.
4. Данилов, А.М. Моделирование и обработка экспериментальных данных при подготовке магистров и аспирантов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, А.А. Киселев // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 3 (24). – С. 73–77.

#### References

1. Nezhdanov, K.K. Testing of continuous crane beams for endurance / K.K. Nezhdanov, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2016. – №2. – P.81–86.
2. Garkin, I.N. Experimental determination of the endurance of composite continuous crane beams / I.N. Garkin // Vestnik PGUAS: construction, science and education. – 2017 – №2. – P. 28–34.
3. Nezhdanov, K.K. Advantages of using continuous crane constructions / K.K. Nezhdanov, I.N. Garkin // Bulletin of PGUAS: construction, science and education. – 2018. – №1. – P. 9–16.
4. Danilov, A.M. Modeling and processing of experimental data in the preparation of masters and graduate students / A.M. Danilov, I.A. Garkina, A.A. Kiselev // Regional architecture and engineering. – 2015. – № 3 (24). – P. 73–77.



УДК 624.13

Белгородский государственный  
технологический университет  
им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)

Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова,  
д. 46, тел.: (4722) 30-99-01(18-18)

**Калачук Татьяна Григорьевна,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Городской кадастр  
и инженерные изыскания»  
E-mail: tatyana.calachuk@yandex.ru

**Онопrienко Наталья Николаевна,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Городской кадастр  
и инженерные изыскания»  
E-mail: [dstt\\_80@mail.ru](mailto:dstt_80@mail.ru),  
[onoprienko.nn@bstu.ru](mailto:onoprienko.nn@bstu.ru)

**Курбатова Вероника Владимировна,**  
кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры  
«Городской кадастр и инженерные  
изыскания»  
E-mail: tatyana.calachuk@yandex.ru

Belgorod State Technological University  
named after V.G. Shukhov

Russia, 308012, Belgorod, 46 St. Kostyukova,  
tel: (4722) 30-99-01(18-18)

**Kalachuk Tatyana Grigorevna,**  
Candidate of Sciences,  
Associate Professor of the department «City  
Cadastre and Engineering Survey»  
E-mail: tatyana.calachuk@yandex.ru

**Onoprienko Natalya Nikolaevna,**  
Candidate of Sciences,  
Associate Professor of the department «City  
Cadastre and Engineering Survey»  
E-mail: [dstt\\_80@mail.ru](mailto:dstt_80@mail.ru),  
[onoprienko.nn@bstu.ru](mailto:onoprienko.nn@bstu.ru)

**Kurbatova Veronika Vladimirovna,**  
Candidate of Sciences, senior lecturer of the  
department «City Cadastre and Engineering  
Survey»  
E-mail: tatyana.calachuk@yandex.ru

## О ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ\*

Т.Г. Калачук, Н.Н. Оноприенко, В.В. Курбатова

Приведены сведения по изучению длительной прочности водонасыщенных грунтов в основании сооружений по результатам лабораторных исследований. Установлено, что снижение прочности водонасыщенного лессового грунта во времени происходит в основном за счет уменьшения сил сцепления, а угол внутреннего трения практически не меняется. Предложена формула определения длительной прочности водонасыщенных лессовых грунтов во времени. Длительная же прочность неводонасыщенных лессовых грунтов нуждается в дальнейших исследованиях.

*Ключевые слова: лессовые грунты, осадка, просадка, прочность, водонасыщенные грунты, силы сцепления, уплотняющее давление, сдвигающее усилие*

## LONG-TIME STRENGTH OF WATER-SATURATED LOESS SOILS

T.G. Kalachuk, N.N. Onoprienko, V.V. Kurbatova

Information on the study of the long-time strength of water-saturated soils at the foundations of structures to the results of laboratory tests is provided. It has been determined that the strength reduction of water-saturated loess soil in the course of time takes place mostly due to the reduction of cohesive forces, and the angle of shear resistance undergoes virtually no changes at all. The formula of determining the long-time strength of water-saturated loess soils in the course of time is suggested. The long-time strength of non-saturated loess soils is still to be researched.

*Keywords: loess soils, settlement, sagging, strength, water-saturated soils, cohesive forces, compacting stress, shearing force*

\* Статья подготовлена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова. (The article was prepared within a development program of the Base University on the basis of BSTU named after V. G. Shukhov.)

**Введение.** При замачивании лессовых грунтов происходят неравномерные осадки, грунты переходят в категорию сильносжимаемых и характеризуются как слабые [1-3]. Просадки оснований фундаментов сооружений продолжают иногда несколько месяцев, осадки же грунтов протекают быстрее. Таким образом, процесс просадки лессовых грунтов достаточно длителен [4].

При некоторых соотношениях сдвигающих и уплотняющих усилий лессовые грунты испытывают длительные деформации ползучести, приводящие в ряде случаев к снижению прочности грунтов [5, 6]. В связи с этим возникает необходимость установить изменение прочности водонасыщенного лессового грунта в основаниях сооружений с течением длительного периода времени.

**Теоретический анализ.** Изучению данного вопроса посвящен ряд работ [1, 4, 7-10], в которых дается оценка величины длительной прочности лессового просадочного грунта с позиций нахождения количественной зависимости последней в виде некоторой доли от стандартной прочности на сдвиг. Однако это положение не дает возможность вскрыть физическую сущность процесса падения прочности грунтов во времени и не может носить общего характера.

**Методика.** Нами была поставлена задача изучения длительной прочности водонасыщенных лессовых грунтов в основаниях сооружений на базе результатов лабораторных экспериментальных исследований. Ранее решения задачи в этом направлении были отражены в работах [11-13].

С этой целью в лабораторных условиях проводились длительные опыты в срезных приборах на образцах лессового грунта ненарушенного сложения в условиях его полного водонасыщения.

Физические показатели грунтов представлены в таблице.

Физические показатели грунтов

Наименование показателей	Единица измерения	Величина показателя
Влажность	%	8,7
Предел текучести	%	30,4
Предел раскатывания	%	19,8
Число пластичности	%	10,6
Объемный вес	гс/см <sup>3</sup>	1,63
Объемный вес скелета	гс/см <sup>3</sup>	1,49
Удельный вес	гс/см <sup>3</sup>	2,71
Пористость	%	41,9
Коэффициент пористости		0,81
Степень влажности		0,296
Коэффициент консистенции		-1,06
Гранулометрический состав	%	
>0,05	%	19
0,05-0,005	%	64
<0,005	%	17

Для исключения возможного влияния упрочнения грунта в связи с постепенным уменьшением его влажности  $\omega$  опыты проводились методом «под водой», т.е. при соблюдении в ходе исследований условия  $\omega = \omega_n = \text{const}$ . Методика опыта заключалась в следующем. Образцы грунта помещались в срезной прибор и уплотнялись под вертикальной нагрузкой величиной 1 кгс/см<sup>2</sup> до стабилизации осадки, затем замачивались под этой нагрузкой. После стабилизации просадочной деформации образцы грунта подвергались испытаниям на срез при том же значении  $P = 1$  кгс/см<sup>2</sup> и при различных, но постоянных для данного образца сдвигающих нагрузках. При этом на первый образец прикладывалась наибольшая нагрузка, которая вызывала мгновенные разрушения. На следующие образцы прикладывались меньшие нагрузки, составляющие долю от максимальной, мгновенной. В зависимости от величины сдвигающих

нагрузок образцы грунта срезались в различное время. При значениях действующих сдвигающих нагрузок, меньших предела длительной прочности, срез не происходил.

**Экспериментальная часть.** На основе полученных результатов строились графики зависимости горизонтальных деформаций от периодов времени, затраченных на срез (с уплотняющими нагрузками 1, 2 и 3 кгс/см<sup>2</sup>). Далее строились кривые затухающей и незатухающей ползучести при сдвиге. При нагрузках, меньших предела длительной прочности, незатухающая ползучесть не развивается, а деформация ползучести имеет затухающий характер. При нагрузках, больших предела длительной прочности, процесс ползучести включает в себя стадии затухающей ползучести, стационарного течения и прогрессирующего деформирования. Установлено, что при больших значениях сдвигающих усилий срез происходит при небольших значениях горизонтальных деформаций. Например, при значении сдвигающего усилия, равном 0,65 кгс/см<sup>2</sup>, под уплотняющей нагрузкой величиной 1 кгс/см<sup>2</sup> полное разрушение (срез) образца произошло через 4,5 мин, а соответствующая горизонтальная деформация в момент разрушения, фиксируемая по индикатору, оказалась равной 3,15 мм. При значении же сдвигающего усилия, равном 0,53 кгс/см<sup>2</sup>, разрушение образца наступило через 42 сут, при деформации сдвига, равной 4,21 мм. При сдвигающих усилиях, равных  $\approx 0,5$  кгс/см<sup>2</sup>, разрушение образца не наблюдалось, деформация ползучести затухала. Очевидно, предел длительной прочности испытанного образца под уплотняющей нагрузкой величиной 1 кгс/см<sup>2</sup> равен примерно 0,53 кгс/см<sup>2</sup>.

Под уплотняющим давлением 2 кгс/см<sup>2</sup>, при сдвигающей нагрузке, равной  $\tau = 1,07$  кгс/см<sup>2</sup>, полное разрушение образца произошло через 7,5 мин, а деформация сдвига к моменту разрушения составила 3,78 мм.

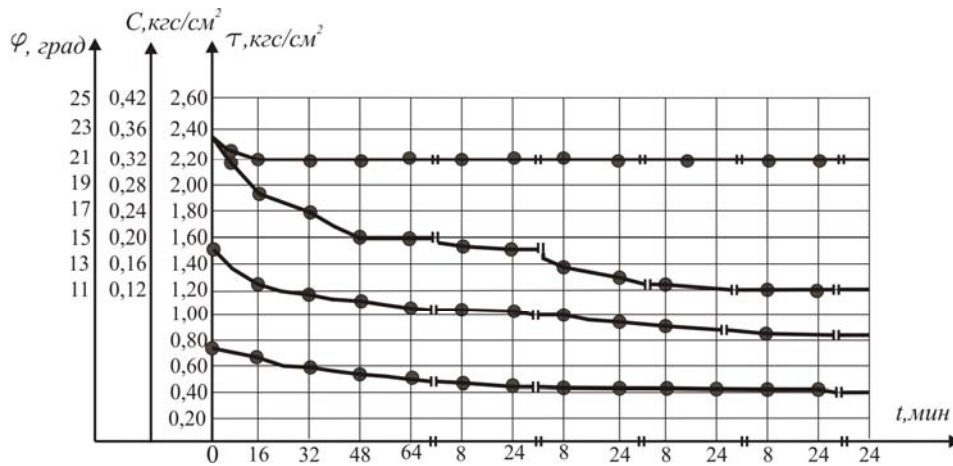
При сдвигающей нагрузке  $\tau = 0,84$  кгс/см<sup>2</sup> разрушение образца наступило через 59 сут, а соответствующая деформация сдвига была равна 4,47 мм. При сдвигающей нагрузке  $\tau = 0,82$  кгс/см<sup>2</sup> разрушение образца (срез) не отмечалось. Очевидно, это значение сдвигающего усилия было меньше предела длительной прочности.

Под уплотняющей нагрузкой, равной 3,0 кгс/см<sup>2</sup>, при сдвигающем усилии 1,45 кгс/см<sup>2</sup> образец грунта разрушился через 3 мин, при значениях горизонтальных деформаций  $\delta_{пр} = 4,64$  мм. А при сдвигающей нагрузке  $\tau = 1,17$  кгс/см<sup>2</sup> полное разрушение образца произошло через 120 сут, и соответствующая горизонтальная деформация к этому моменту была равна  $\delta_{пр} = 5,38$  мм.

**Выводы.** Исходя из результатов лабораторных экспериментальных исследований можно сделать выводы о том, что предельные горизонтальные деформации грунта при сдвиге  $\delta_{пред}$ , при котором наступает полное разрушение грунта, расходятся по величине в пределах 13-19 %, в зависимости от значений сдвигающих нагрузок. Однако в порядке приближения величину  $\delta_{пр}$  можно принять постоянной, как это и делается рядом исследователей. Это хорошо увязывается с известным в литературе представлением [2] о том, что разрушение грунта наступает тогда, когда развитие микротрещины достигает некоторого постоянного для данного вида грунта значения.

Установлены закономерности изменения сопротивления сдвигу водонасыщенного лессового грунта во времени при трех значениях действующих уплотняющих давлений. Построенные кривые длительной прочности водонасыщенного лессового грунта (см. рисунок) показывают, что сопротивление сдвигу с течением времени уменьшается, приближаясь к своему «длительно-предельному», для данного состояния грунта, значению. В наших опытах предел длительной прочности  $\tau_{\infty}$  составляет в среднем 73-76 % от условно-мгновенной прочности, т.е.  $\tau_{\infty} = (0,73-0,76)\tau_0$ . При этом основное снижение прочности водонасыщенного лессового грунта происходит в течение 1 часа. Соответствующая этому времени разрушающая нагрузка составляет 79-82 % от условно-мгновенной прочности. В дальнейшем прочность уменьшается незначительно и медленно ( $\approx 5-6$  %). Если выразить длительную прочность грунта как некоторую долю от его прочности, соответствующую одному часу, будем иметь:

$$\tau_{\infty} = (0,92 \div 0,93)_{\tau=1 \text{ час}} \cdot$$



Кривые длительной прочности и изменения прочностных параметров водонасыщенного лессового грунта во времени

Из графиков на рисунке определяем значения сопротивления грунтов сдвигу при различных периодах времени, на основе которых строим графики зависимости между уплотняющими и сдвигающими усилиями в различный период времени. Предельная прямая в зависимости от времени, занимая ряд положений, определяет значения прочностных параметров водонасыщенного лессового грунта в различные периоды времени.

На рисунке построен также график изменения прочностных параметров водонасыщенного лессового грунта во времени. Как видно из рисунка, сила сцепления водонасыщенного лессового грунта снижается во времени (45,2%), а угол внутреннего трения уменьшается (10,9%) только в начальный период времени ( $t \approx 4$  мин) и в дальнейшем почти не меняется. Поэтому при решении практических задач можно пренебречь этими изменениями и принять, что угол внутреннего трения не снижается во времени.

Таким образом, устанавливаем, что снижение прочности водонасыщенных лессовых грунтов во времени происходит в основном за счет уменьшения сил сцепления. В этом плане наше представление хорошо согласуется с мнениями авторов [3, 5] о том, что снижение прочности происходит лишь только за счет уменьшения сил сцепления, а угол внутреннего трения практически не меняется.

Длительное значение силы сцепления  $C_\infty$  водонасыщенных лессовых грунтов приблизительно составляет  $0,55C_0$  — сила сцепления, соответствующая условно-мгновенной прочности грунта.

Из рисунка видно, что основное снижение сил сцепления происходит в течение 1 часа. Соответствующая этому времени величина силы сцепления соответствует  $0,71C_0$  ( $C_{t=1 \text{ час}} = 0,71C_0$ ). Поэтому при определении длительного значения сил сцепления водонасыщенных лессовых грунтов целесообразно оценивать его в виде некоторой доли, соответствующей одному часу.

Так, например, установлено, что длительное значение силы сцепления  $C_\infty$  составляет:

$$0,80 C_{t=1 \text{ час}} \cdot C_\infty = 0,8 C_{t=1 \text{ час}} .$$

Изложенное позволяет описать прочность водонасыщенных лессовых грунтов во времени в следующем виде:

$$\tau(t) = \sigma \cdot \text{tg} \varphi + C(t).$$

Исходя из результатов наших опытов, длительную прочность можно определить выражением

$$\tau_\infty = \sigma \cdot \text{tg} \varphi + 0,8 C_{t=1 \text{ час}}.$$

Последнее заключение относится исключительно к лессовым грунтам в водонасыщенном состоянии. Длительная же прочность неводонасыщенных лессовых грунтов нуждается в дальнейших исследованиях.

## Список литературы

1. Могилевская, С.Е. К вопросу ползучести лессовых грунтов / С.Е. Могилевская // Известия ВНИИГ. – 1959. – Т.62.
2. Вялов, С.С. О физической сущности процессов деформирования и разрушения глинистых грунтов / С.С. Вялов, Н.А. Пекарская, Р.В. Максимьяк // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1970. – №1.
3. Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мерзлых грунтов / С.С. Вялов [и др.]. – М.: Стройиздат, 1966.
4. Могилевская, С.Е. Вопросы длительной прочности и деформируемости лессовых грунтов как основания гидротехнических сооружений / С.Е. Могилевская // Известия ВНИИГ. – 1960. – Т.64.
5. Маслов, Н.Н. Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве / Н.Н. Маслов. – М.: Стройиздат, 1965.
6. Куликов, Г.В. Расчет и проектирование фундаментов сооружений на лессовых грунтах в СССР / Г.В. Куликов. – Ашхабад: Изд-во Минвуза СССР, 1984.
7. Стабилизация лёссовых грунтов с помощью нанокремнезёма / Кингфенг ЛВ, Ченруи Чанг, Беншай Жао, Бо Ма. // Основания и фундаменты, механика грунтов. – 2017. – № 6. – С. 26–29.
8. Derbyshire, E. Geological hazards in loess terrain, with particular reference to the loess regions of China / E. Derbyshire // Earth Sci. Rev. – 2001. – №54. – P. 231–260.
9. Water stability mechanism of silicification grouted loess / Lv Q.F., Wang S., Wang D., and Wu Z. // Bull. Eng. Geol. Environ. – 2014. – №73. – P. 1025–1035.
10. Черныш, А.С. Специфические свойства просадочных грунтов: монография / А.С. Черныш. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2015. – 132 с.
11. Изменение величины относительной просадочности четвертичных суглинков от их природной влажности / В.Ф. Карякин, Н.Н. Оноприенко, М.Г. Михайлов, А.С. Кунцев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 7. – С. 67–70.
12. О начальном давлении просадочных грунтов / Т.Г. Калачук, А.Г. Юрьев, В.Ф. Карякин, В.С. Высребенцев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2014. – №6. – С. 24–28.
13. Калачук, Т.Г. К вопросу проектирования и строительства на слабых грунтах / Т.Г. Калачук // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – №5. – С. 120–124.

## References

1. Mogilevskaya, S.E. On the issue of creep loess soils / S.E. Mogilevskaya // Proceedings of VNIIG. – 1959. – Vol.62.
2. Vyalov, S.S. On the physical essence of the processes of deformation and destruction of clay soils / S.S. Vyalov, N.A. Pekarskaya, R.V. Maksimyak // Bases, foundations and mechanics of soils. – 1970. – № 1.
3. A technique for determining the characteristics of creep, long-term strength, and compressibility of frozen soils / S.S. Vyalov [etc.]. – M.: Stroyizdat, 1966.
4. Mogilevskaya, S.E. Questions of long-term strength and deformability of loess soils as the basis of hydraulic structures / S.E. Mogilevskaya // Proceedings of VNIIG. – 1960. – Vol.64.
5. Maslov, N.N. Conditions for the stability of slopes and slopes in hydropower construction / N.N. Maslov. – M.: Stroyizdat, 1965.
6. Kulikov, G.V. Calculation and design of foundations of structures on loess soils in the TSSR / G.V. Kulikov. – Ashgabat: Publishing House of the Ministry of Higher Education of the USSR, 1984.
7. Stabilization of loess soils with the help of nanosilica / Kingfeng LV, Chenrui Chang, Benschay Zhao, Bo Ma. // Bases and foundations, soil mechanics. – 2017. – № 6. – P. 26–29.
8. Derbyshire, E. Geological hazards in loess terrain, with particular reference to the loess regions of China / E. Derbyshire // Earth Sci. Rev. – 2001. – №54. – P. 231–260.

9. Water stability mechanism of silicification grouted loess / Lv Q.F., Wang S., Wang D., and Wu Z. // Bull. Eng. Geol. Environ. – 2014. – №73. – P. 1025–1035.
10. Chernysh, A.S. Specific properties of subsidence soils: monograph / A.S. Chernysh. – Belgorod: Publishing house of BSTU V.G. Shukhov, 2015. – 132 p.
11. The change in the relative subsidence of quaternary loams from their natural moisture / V.F. Karyakin, N.N. Onoprienko, M.G. Mikhailov, A.S. Kuntsev // Bulletin of BSTU named after. V.G. Shukhov. – 2017. – №. 7. – P. 67–70.
12. On the initial pressure of subsidence ground / T.G. Kalachuk, A.G. Yuriev, V.F. Karyakin, V.S. Vysrebentsev // Bulletin of the BSTU. V.G. Shukhov. – 2014. – №6. – P. 24–28.
13. Kalachuk, T.G. On the issue of design and construction on weak grounds / T.G. Kalachuk // Bulletin of BSTU. V.G. Shukhov. – 2015. – №5. – P. 120–124.

УДК 692.4

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

**Вдовин Вячеслав Михайлович**,  
кандидат технических наук, профессор  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Карпов Владимир Николаевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: Karpov5656@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

**Vdovin Vyacheslav Mikhailovich**,  
Candidat of Sciences, Professor  
of the department «Building constructions»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Karpov Vladimir Nikolaevich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Building constructions»  
E-mail: Karpov5656@mail.ru

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ РИГЕЛЯ-РАСПОРКИ В СТРОПИЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

В.М. Вдовин, В.Н. Карпов

Рассмотрена стропильная система из двух наклонно поставленных клееных щитов с ригелем-распоркой по высоте системы. Приведены результаты расчета такой системы с уточнением места расположения распорки относительно высоты. Дан анализ работы стропильной системы. Уточнена рациональная высота установки ригеля-распорки исходя из минимальности сечения стропильных ног.

*Ключевые слова: стропильная система, ригель-распорка, изгибающий момент, статический расчет, расчетная схема, нагрузка*

## SELECTION OF RATIONAL ARRANGEMENT OF CROSSBARS-STRUTS IN TRUSS SYSTEM

V.M. Vdovin, V.N. Karpov

The truss system of two obliquely delivered glued boards with crossbars-struts along the height of the system is considered. The results of calculations for such a system, specifying the location of the spacers relative to the height are given. The analysis of work of the truss system is given. The rational height of the crossbars-struts installation is specified based on the minimum cross-section of the truss legs.

*Keywords: truss system, crossbars-struts, bending moment, static calculation, calculation scheme, load*

Стропильная система представляет собой статически неопределимую конструкцию, состоящую из двух наклонных элементов (кровельных щитов), которые по высоте соединяются между собой ригелем-распоркой [1, 2].

Ригели-распорки являются по отношению к стропильным ногам упруго-подвижной опорой. Меняя уровень расположения ригеля-распорки по высоте стропильной системы, можно добиваться существенного изменения величин максимальных изгибающих моментов по длине стропильных элементов. Практический интерес при проведении конструктивных проверочных расчетов представляют максимальные моменты, возникающие в пролете  $M_{пр}$  и над промежуточной опорой и  $M_{оп}$ , т.е. в месте примыкания ригеля-распорки. Величины  $M_{пр}$  и  $M_{оп}$  существенно зависят от уровня расположения ригеля-распорки, т.е. от величины  $k = y/H$  ( $y$  – уровень установки ригеля-распорки;  $H$  – высота стропильной системы). В связи с этим расход материалов для стропильных элементов тоже существенно будет зависеть от величины  $k$ .

При рациональном выборе уровня расположения ригеля-распорки имеет место минимальный расход материалов на стропильные элементы при минимальных размерах поперечных сечений последних. Для поиска рационального расположения ригеля-распорки необходимо знать изменение максимальных величин изгибающих моментов  $M_{пр}$  и  $M_{оп}$ , возникающих в стропильных элементах при действии различных внешних нагрузок. С этой целью были произведены статические расчеты стропильной системы постоянной жесткости. Общая расчетная схема стропильной системы показана на рис. 1, 2, 3 вместе с характером действующих нагрузок.

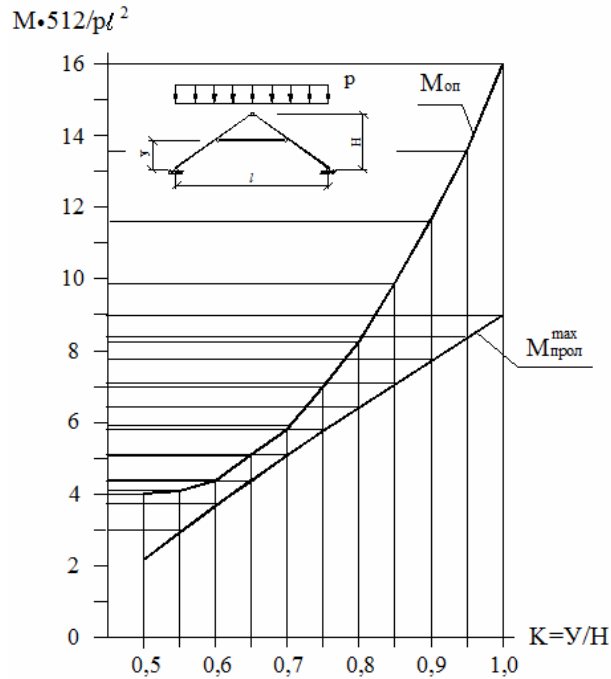


Рис. 1. Изменение изгибающих моментов  $M_{оп}$  и  $M_{прол}^{max}$  в зависимости от  $k = y/H$

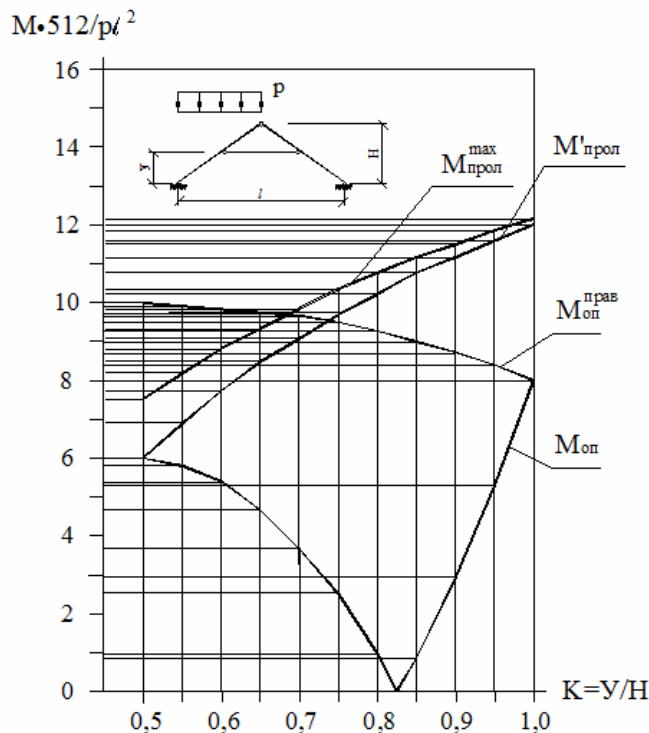
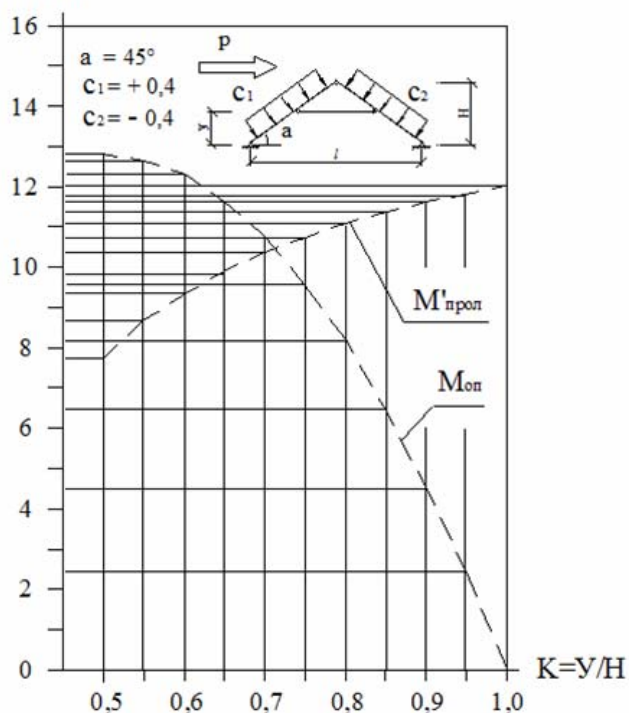


Рис. 2. Изменение изгибающих моментов  $M_{оп}$ ,  $M_{прол}^{max}$  и  $M_{прол}$  в зависимости от  $k = y/H$



M•512/p<sup>2</sup>Рис. 3. Изменение изгибающих моментов  $M_{оп}$  и  $M_{проп}$  в зависимости от  $k = y/H$ 

По экономическим соображениям желательно стропильную «ногу» изготавливать с постоянным по длине сечением. В этом случае наиболее опасным сечением в конструктивном отношении можно считать такое, в котором действует максимальный изгибающий момент (влияние продольной силы на напряжения незначительно). Максимальный изгибающий момент определяется расчетным сочетанием действующих на стропильную систему нагрузок: постоянной, снеговой и ветровой. Величины этих нагрузок и характер их действия в зависимости от геометрических параметров крыши дома приняты согласно СНиП 2.01.07–85\*. Следует только заметить, что при определенных параметрах геометрии стропильной системы, например при угле наклона  $\alpha = 45^\circ$  и расположении ригеля-распорки посередине высоты крыши, ветровая нагрузка со стороны активного и пассивного давления имеет одинаковую интенсивность и одинаковое направление. В таких случаях ригель-распорка выключается из работы и стропильная система превращается в статически определимую трехшарнирную арку, или в приближенных решениях каждый наклонный элемент системы (кровельный щит) можно рассматривать как свободнолежащую балку с пролетом, равным расстоянию от опорного до ключевого шарнира. Во всех других случаях ригель-распорка, как уже отмечено выше, служит промежуточной опорой для наклонных стропильных элементов.

Статические расчеты неопределимой стропильной системы дали следующие результаты.

При действии нагрузок по всему пролету (см. рис. 1) изгибающие моменты определяются по формулам:

$$M_{оп} = -\frac{P \cdot \ell^2}{512} 16(3k^2 - 3k + 1), \quad (1)$$

$$M_{проп}^{max} = \frac{P \cdot \ell^2}{512} \left( \frac{k^2 + 3k - 1}{k} \right)^2. \quad (2)$$

При этом опасное сечение в пролете находится (вдоль горизонтальной оси) на расстоянии

$$x = \frac{\ell}{16k}(k^2 + 3k - 1).$$

При действии односторонней нагрузки (см. рис. 2) изгибающие моменты определяются по формулам:

$$M_{\text{оп}} = -\frac{P \cdot \ell^2}{512} 8(7k^2 - 7k + 1), \quad (3)$$

$$M_{\text{оп}}^{\text{прав}} = \frac{P \cdot \ell^2}{512} 8(k^2 - k - 1), \quad (4)$$

$$M_{\text{пр}}^{\text{max}} = \frac{P \cdot \ell^2}{512} \left( \frac{k^2 + 7k - 1}{2} \right)^2, \quad (5)$$

$$M_{\text{пр}}^{\text{прав}} = \frac{P \cdot \ell^2}{512} \frac{4}{k} (k^2 + 3k - 1). \quad (6)$$

При действии ветровой нагрузки (см. рис. 3) изгибающие моменты определяются по формулам:

$$M_{\text{оп}} = \pm \frac{P \cdot \ell^2}{512} 51,2k(1 - k), \quad (7)$$

$$M_{\text{пр}}^{\setminus} = \pm \frac{P \cdot \ell^2}{512} 0,8 \left\{ 16 - \left[ 1 + \frac{(1 - k)(1 + k)}{k} \right]^2 \right\}. \quad (8)$$

Проделаны вычисления вышерассмотренных выражений, и в таблице приведены величины максимальных изгибающих моментов, возникающих над промежуточной опорой ( $M_{\text{оп}}$ ) и в пролете ( $M_{\text{пр}}$ ).

Величины изгибающих моментов  $M_{\text{оп}}$  и  $M_{\text{пр}}$  в стропильной системе от действующих нагрузок

k	Равномерно распределенная нагрузка		Равномерно распределенная нагрузка на половине кровли				Ветровая нагрузка	
	$M_{\text{оп}}$	$M_{\text{пр}}^{\text{max}}$	$M_{\text{оп}}$	$M_{\text{оп}}^{\text{прав}}$	$M_{\text{пр}}^{\text{max}}$	$M_{\text{пр}}^{\setminus}$	$M_{\text{оп}}$	$M_{\text{пр}}^{\setminus}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	-4,00	8,25	6,00	-10,00	7,56	6,00	±12,8	±7,8
0,55	-4,12	3,00	5,86	-9,98	8,21	6,93	±12,672	±8,684
0,6	-4,08	3,74	9,44	-9,92	8,80	7,73	±12,288	±9,383
0,65	-5,08	4,46	4,74	-9,02	9,34	8,45	±11,648	±9,946
0,7	-5,92	5,15	3,76	-9,68	9,83	9,09	±10,750	±10,410
0,75	-7,00	5,84	2,50	-9,5	10,29	9,67	±9,6	±10,794
0,8	-8,32	8,30	0,96	-9,28	10,79	10,20	±8,192	±11,118
0,85	-9,08	7,15	-0,06	-9,01	11,15	10,69	±6,528	±11,392
0,9	-11,68	7,78	-2,96	-6,78	11,52	11,6	±4,608	±11,626
0,95	-13,72	8,39	-5,34	-8,38	11,89	11,59	±2,432	±11,827
1,00	-16,00	9,00	-8,00	-8,00	12,25	12,00	0	±12,000

Для наглядного представления полученных результатов на рис. 1 показаны графики изменения  $M_{\text{оп}}$  – опорного момента (над промежуточной опорой) и  $M_{\text{пр}}^{\text{max}}$  – максимального изгибающего положительного момента в первом пролете в зави-

симости от места расположения ригеля-распорки, когда система загружена равномерно распределенной нагрузкой.

На рис. 2 показаны графики изменения:  $M_{\text{прол}}$  – изгибающего момента при равномерном одностороннем нагружении в том же сечении, где действует  $M_{\text{прол}}^{\text{max}}$  от равномерно распределенной нагрузки по всему пролету;  $M_{\text{прол}}^{\text{max}}$  – максимального изгибающего момента в первом пролете;  $M_{\text{оп}}$  – изгибающего опорного момента (по левой половине);  $M_{\text{оп}}^{\text{прав}}$  – опорного момента на правой половине при одностороннем нагружении.

На рис. 3 изображены графики изменения изгибающих моментов  $M_{\text{прол}}$  и  $M_{\text{оп}}$  в месте установки ригеля-распорки, когда система загружена ветровой нагрузкой (частный случай). Прерывистой линией на графиках рис. 3 показаны изгибающие моменты, которые могут принимать как положительное значение, так и отрицательное, в зависимости от направления действия ветровой нагрузки.

В дальнейшем анализе учтено, что нагрузка от собственного веса кровли и кровельных щитов меньше, чем снеговая нагрузка. Согласно рис. 1 видно, что при увеличении  $k$  возрастают опорный и пролетный изгибающие моменты при нагрузках, действующих по всему пролету. При значениях  $k$  от 0,5 до 0,7 увеличение моментов происходит сравнительно медленно, при значениях  $k > 0,7$  – гораздо быстрее.

При одностороннем нагружении снегом решающей величиной при  $0,5 \leq k \leq 0,7$  является опорный изгибающий момент на незагруженной половине стропильной системы. При  $k > 0,7$  величины  $M_{\text{пр}}$  преобладают над  $M_{\text{оп}}$ .

Таким образом, при изменении  $k$  от 0,5 до 0,7 можно считать, что суммарный расчетный изгибающий момент (от постоянной и снеговой нагрузок) практически не изменяется. Учитывая, что опорный изгибающий момент от ветровой нагрузки также уменьшается, можно считать, что рациональная зона расположения ригеля-распорки характеризуется значением  $0,5 \leq k \leq 0,7$ . При этих значениях  $k$  увеличение отрицательного опорного момента от постоянных нагрузок компенсируется уменьшением опорного момента от воздействия снеговой и ветровой нагрузок. При значениях  $k > 0,8$  расчетным становится сечение в пролете, а все воздействия (собственный вес, снеговая нагрузка, ветровая нагрузка) при увеличении  $k$  приводит к росту пролетного изгибающего момента.

Ветровая нагрузка по характеру воздействия может изменяться в зависимости от параметров дома и от угла ( $\alpha$ ) наклона стропильной «ноги». Наиболее неблагоприятное ветровое воздействие указано на рис. 3, т.е. когда активное и пассивное давления ветра равны. Однако здесь необходимо учесть, что по абсолютному значению ветровая нагрузка может быть в 2 ÷ 8 раз меньше, чем, например, снеговая. Поэтому влияние снеговой нагрузки при различных схемах крыши может оказаться большим по сравнению с влиянием ветровой нагрузки.

### Список литературы

1. Вдовин, В.М. Полносорный деревянный дом из крупных промышленных панелей: монография / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 148 с.
2. Вдовин, В.М. Промышленные кровельные щиты для полносорных деревянных домов (оптимизация и поиск рациональных конструкций): монография / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов. – М., 2000. – 81 с. – Деп. в ВНИИТПИ, № 11784.

### References

1. Vdovin, V.M. Full-length wooden house from large industrial panels: monograph / V.M. Vdovin, V.N. Karpov. – Penza: PGUAS, 2015. – 148 p.
2. Vdovin, V.M. Industrial roofing boards for prefabricated wooden houses (optimization and search of rational structures): monograph / V.M. Vdovin, V.N. Karpov. – M., 2001. – 81 p. – Dep. in VNIINTPI, No. 11784.

УДК 539.371

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

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

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

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

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

## ОГРАНИЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ

С.В. Бакушев

Представлен анализ деформационных соотношений деформационной теории пластичности сыпучей среды, предложенной профессором Г.А.Гениевым. Определены условия, при выполнении которых сплошная среда описывается уравнениями деформационной теории пластичности сыпучей среды. В качестве примеров рассмотрено построение диаграмм сдвигового и объёмного деформирования для характерных случаев плоской деформации сыпучей среды. Показано, что при двухосном и одноосном удлинении для некоторых значений констант среды её механическое поведение перестаёт описываться уравнениями деформационной теории пластичности сыпучей среды.

*Ключевые слова: сыпучая среда, деформационные соотношения, плоская деформация*

## LIMIT DEFORMATION THEORY OF PLASTICITY OF GRANULAR MEDIUM

S.V. Bakushev

The article is devoted to analysis of deformation theory of plasticity deformation ratio of granular medium proposed by Professor G.A. Geniev. The conditions under which the solid is described equations of deformational theory of plasticity of granular medium. Examples considered charting landslides and volumetric warping for typical cases of flat deformation of granular medium. It is shown that axial and biaxial extension for some values of the constants medium its mechanical behavior ceases to be described by the equations of deformational theory of plasticity of medium are define.

*Keywords: granular medium, expansion ratio, flat deformation*

**Введение.** Сыпучие среды моделируют механическое поведение грунтов и грунтовых массивов. Прочность, устойчивость, долговечность, надёжность и безопасность зданий и сооружений во многом определяются качеством расчёта их оснований. Достоверность любого прочностного и деформационного расчёта определяется прежде всего удачно подобранной расчётной схемой или математической моделью, адекватно описывающей механическое поведение твёрдого тела.

В механике грунтов и оснований существует большое число математических моделей, с той или иной точностью описывающих как напряжённо-деформированное, так и предельное состояние грунтовых массивов. Значительный вклад в разработку и построение математических моделей грунтовых массивов при сложном напряжённом состоянии внесли такие учёные, как А.В. Боткин, Б.Н. Баршевский, А.С. Строганов, С. Мурояма, С.Е. Гречищев, М. Рейнер, А.А. Григорян, Г.А. Гениев, В.А. Иосилевич, Г.И. Ломизе, И.Н. Нельсон, М. Барон, О.В. Садовская и В.М. Садовский и др.

**Описание модели.** Одной из наиболее удачных математических моделей, описывающих напряжённо-деформированное состояние сыпучих сред при сложном

напряжённом состоянии, является деформационная теория пластичности сыпучей среды, предложенная и описанная д.т.н., проф. Г.А. Гениевым в цикле работ [1, 2, 3, 4]. Данная модель описывает некоторые закономерности деформирования грунтовых сред. В частности, учитывается экспериментально подтверждённое влияние среднего напряжения на вид зависимостей между вторыми инвариантами девиаторов напряжений и деформаций. Данная модель учитывает физическую нелинейность диаграмм работы материала, некоторые особенности процесса разгрузки, эффект дилатансии в области напряжённых состояний, близких к предельным. Кроме того, модель реализует возможность непосредственного перехода от зависимостей напряжения-деформации к условию предельного равновесия.

Механическая модель деформационной теории пластичности сыпучей среды иллюстрирует формоизменение и состоит из последовательно соединённых неупругого элемента  $A$  и элемента сухого трения  $B$  (рис. 1). Предполагается, что силы трения в сыпучей среде проявляются не только в состоянии предельного равновесия, но и в области нелинейно упругих деформаций. Деформации нелинейно-упругого элемента  $A$  возможны только при перемещениях элемента  $B$ .

Связь между сдвиговыми напряжениями и деформациями описывается соотношением

$$T = \frac{G_0}{1-\lambda} \left( 1 - \frac{\Gamma}{2\Gamma_s} \right) \Gamma. \quad (1)$$

Здесь  $T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$  – интенсивность касательных

напряжений;  $\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$  – интенсивность деформаций

сдвига;  $G_0$  – начальный модуль сдвига при чистом сдвиге;  $\Gamma_s$  – предельная интенсивность деформаций сдвига;  $\lambda = -f \frac{\sigma}{T}$  – параметр, определяющий условия,

при которых деформации сдвига в среде не возникают;  $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$  – среднее напряжение;  $f$  – аналог коэффициента внутреннего трения.

При простом нагружении параметр  $\lambda$  является величиной постоянной, и, следовательно, для всякой траектории секущий модуль сдвига есть линейная функция интенсивности деформаций сдвига:

$$G\left(\lambda, \frac{\Gamma}{\Gamma_s}\right) = G(\lambda, 0) \left( 1 - \frac{\Gamma}{2\Gamma_s} \right) = \frac{G_0}{1-\lambda} \left( 1 - \frac{\Gamma}{2\Gamma_s} \right).$$

$$\text{Для } \Gamma = 0 \quad G(\lambda, 0) = \frac{G_0}{1-\lambda}; \quad \text{для } \Gamma = \Gamma_s \quad G(\lambda, 1) = \frac{G_0}{2(1-\lambda)}.$$

$$\text{Касательный модуль сдвига } \frac{dT}{d\Gamma} = \frac{G_0}{1-\lambda} \left( 1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right).$$

$$\text{Для } \Gamma = 0 \quad \frac{dT}{d\Gamma} = \frac{G_0}{1-\lambda}; \quad \text{для } \Gamma = \Gamma_s \quad \frac{dT}{d\Gamma} = 0.$$

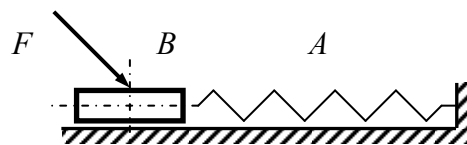


Рис. 1. Механическая модель сыпучей среды

При  $\lambda \geq 1$  имеют место напряжённые состояния, при которых деформации сдвига в среде не возникают. В этом случае касательные напряжения полностью воспринимаются силами внутреннего трения.

В деформационной теории пластичности сыпучей среды предполагается, что объёмная деформация  $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ , при наличии деформаций сдвига в сплошной среде, то есть при

$\lambda < 1$ , складывается из деформации от всестороннего растяжения или сжатия  $\varepsilon_\sigma = \frac{\sigma}{K_0}$  и

деформации от действия сдвигающих сил (дилатансии)  $\varepsilon_T = g \left( \frac{T}{T_s} \right)^2$ :

$$\varepsilon = \varepsilon_\sigma + \varepsilon_T = \frac{\sigma}{K_0} + g \left( \frac{T}{T_s} \right)^2. \quad (2)$$

Здесь  $K_0$  – начальная модель объёмного растяжения (сжатия);  $T_s$  – предельная интенсивность касательных напряжений для рассматриваемого вида напряжённого состояния;  $g$  – коэффициент дилатансии.

При  $\lambda > 1$  объёмная деформация сыпучей среды определяется выражением

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{K_0}. \quad (3)$$

Условие предельного равновесия сыпучей среды достигается при выполнении равенства  $\Gamma = \Gamma_s$ , то есть из соотношения (1) получаем условие предельного равновесия:

$$T = T_s = \frac{G_0 \Gamma_s}{2(1-\lambda)} = \frac{T_c}{1-\lambda}. \quad (4)$$

При чистом сдвиге  $\sigma_1 = -\sigma_2$ ,  $\sigma_3 = 0$ , то есть  $\sigma = 0$  и, следовательно,  $\lambda = 0$ .

Тогда из условия предельного равновесия (4) следует, что  $T_c = \frac{G_0 \Gamma_s}{2}$  – предел прочности при чистом сдвиге. При этом в момент наступления предельного равновесия из соотношения (2) следует:  $\varepsilon = \varepsilon_T = g = \varepsilon_c$  – предельная объёмная деформация при чистом сдвиге.

Соотношение (4) легко преобразовать к виду

$$T + f\sigma = T_c, \quad (5)$$

что показывает, что в качестве условия предельного равновесия в деформационной теории пластичности сыпучей среды принимается условие А.И.Боткина [5].

**Анализ деформационных соотношений.** Основные физические соотношения деформационной теории пластичности сыпучей среды (1) и (2) имеют форму перекрёстных зависимостей между первыми инвариантами тензоров и вторыми инвариантами девиаторов напряжений и деформаций:

$$T = T(\varepsilon, \Gamma), \quad \sigma = \sigma(\varepsilon, \Gamma).$$

Действительно, перепишем соотношение (1) в следующем виде:

$$T + f\sigma = G_0 \left( 1 - \frac{\Gamma}{2\Gamma_s} \right) \Gamma. \quad (6)$$

В уравнении (2) выразим напряжение через деформацию:

$$\sigma = K_0 \varepsilon - K_0 g \left( \frac{T}{T_s} \right)^2. \quad (7)$$

Разделив (1) на (4), получим:

$$\frac{T}{T_s} = \frac{G_0}{T_c} \left( 1 - \frac{\Gamma}{2\Gamma_s} \right) \Gamma. \quad (8)$$

Подставляя выражение (8) в формулу (7) и учитывая зависимость (4), будем иметь:

$$\sigma = K_0 \left[ \varepsilon - g \left( 2 - \frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right)^2 \left( \frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

После подстановки правой части выражения (9) в левую часть формулы (6) и выполнения элементарных преобразований получим:

$$T = G_0 \left( 1 - \frac{\Gamma}{2\Gamma_s} \right) \Gamma + fgK_0 \left( 2 - \frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right)^2 \left( \frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right)^2 - fK_0 \varepsilon. \quad (10)$$

Деформационные зависимости (9) и (10) справедливы, если выполняются неравенства

$$1 - \frac{T}{T_c} < \lambda < 1. \quad (11)$$

Первое неравенство ограничивает переход среды в пластическое состояние; второе – переход в «жесткое» состояние, когда деформации сдвига в среде не возникают и касательные напряжения полностью воспринимаются силами внутреннего трения.

Найдём условия, при которых деформационные соотношения (9) и (10) могут описывать напряжённо-деформированное состояние сыпучей среды. Пусть

$$\varepsilon_2 = n_{21} \varepsilon_1; \quad \varepsilon_3 = n_{31} \varepsilon_1.$$

Тогда

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = (1 + n_{21} + n_{31}) \varepsilon_1 = n \varepsilon_1,$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_1 - n_{21} \varepsilon_1)^2 + (n_{21} \varepsilon_1 - n_{31} \varepsilon_1)^2 + (n_{31} \varepsilon_1 - \varepsilon_1)^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} m |\varepsilon_1|$$

и, следовательно,

$$\varepsilon = \frac{n\sqrt{3}}{2m} \Gamma \cdot \text{Sign } \varepsilon_1. \quad (12)$$

Здесь  $m = \sqrt{1 + n_{21}^2 + n_{31}^2 - n_{21} - n_{31} - n_{21}n_{31}}$ .

Подставляя выражение (12) в формулу (10) и учитывая, что  $T \geq 0$  и  $\Gamma \geq 0$ , получаем:

$$G_0 \left( 1 - \frac{\Gamma}{2\Gamma_s} \right) + fgK_0 \left[ 4 - 4 \frac{\Gamma}{\Gamma_s} + \left( \frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right)^2 \right] \frac{\Gamma}{\Gamma_s^2} - fK_0 \frac{n\sqrt{3}}{2m} \cdot \text{Sign } \varepsilon_1 \geq 0.$$

Отсюда следует, что соотношения (9) и (10), то есть соотношения деформационной теории пластичности сыпучей среды, будут описывать напряжённо-деформированное состояние сплошной среды для данного его вида, если константы среды будут удовлетворять соотношениям:

$$\frac{G_0}{K_0} \geq f \frac{n\sqrt{3}}{2m} \text{Sign } \varepsilon_1;$$

$$\frac{G_0}{K_0} \geq 2f \left[ \frac{n\sqrt{3}}{m} \text{Sign } \varepsilon_1 - \frac{g}{\Gamma_s} \right]. \quad (13)$$

Невыполнение условия (13<sub>1</sub>) говорит о том, что данное напряжённо-деформированное состояние сплошной среды, уравнениями модифицированной деформационной теории пластичности сыпучей среды не описывается.

Если условие (13<sub>2</sub>) не выполняется, то, решая неравенство  $T \geq 0$  для конкретных констант сыпучей среды данного напряжённо-деформированного состояния, можно найти тот интервал изменения интенсивности деформаций сдвига  $0 \leq \Gamma \leq \Gamma^* \leq \Gamma_s$ , на котором напряжённо-деформированное состояние тела описывается уравнениями

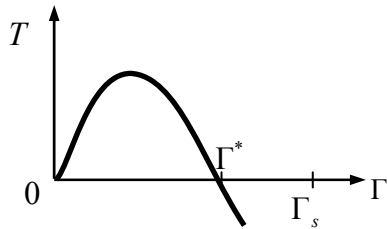


Рис. 2. Положение точки  $\Gamma^*$

деформационной теории пластичности сыпучей среды (рис. 2). Следует отметить, что значение  $\Gamma = \Gamma^*$  не является предельным значением интенсивности деформаций сдвига в смысле исчерпания несущей способности среды. Появление на интервале  $0 \leq \Gamma \leq \Gamma_s$  точки  $\Gamma = \Gamma^*$  говорит лишь о том, что наложенные внешние связи и условия деформирования таковы, что среда перестаёт описываться уравнениями деформационной теории пластичности сыпучей среды.

**Результаты численного расчёта.** Проследим характер диаграмм сдвигового и объёмного деформирования для характерных видов деформированного состояния плоской деформации. Значения механических констант примем следующими:

$$\frac{K_0}{G_0} = \frac{2}{\sqrt{3}}; \quad \Gamma_s = 0,01155; \quad \frac{g}{\Gamma_s} = 1; \quad f = 0,1; \quad (0,5; 0,9).$$

1. Равномерное двухосное укорочение:  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 < 0; \quad \varepsilon_3 = 0$  (рис. 3, а, б).
2. Одноосное укорочение:  $\varepsilon_1 < 0; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$  (рис. 3, в, г).

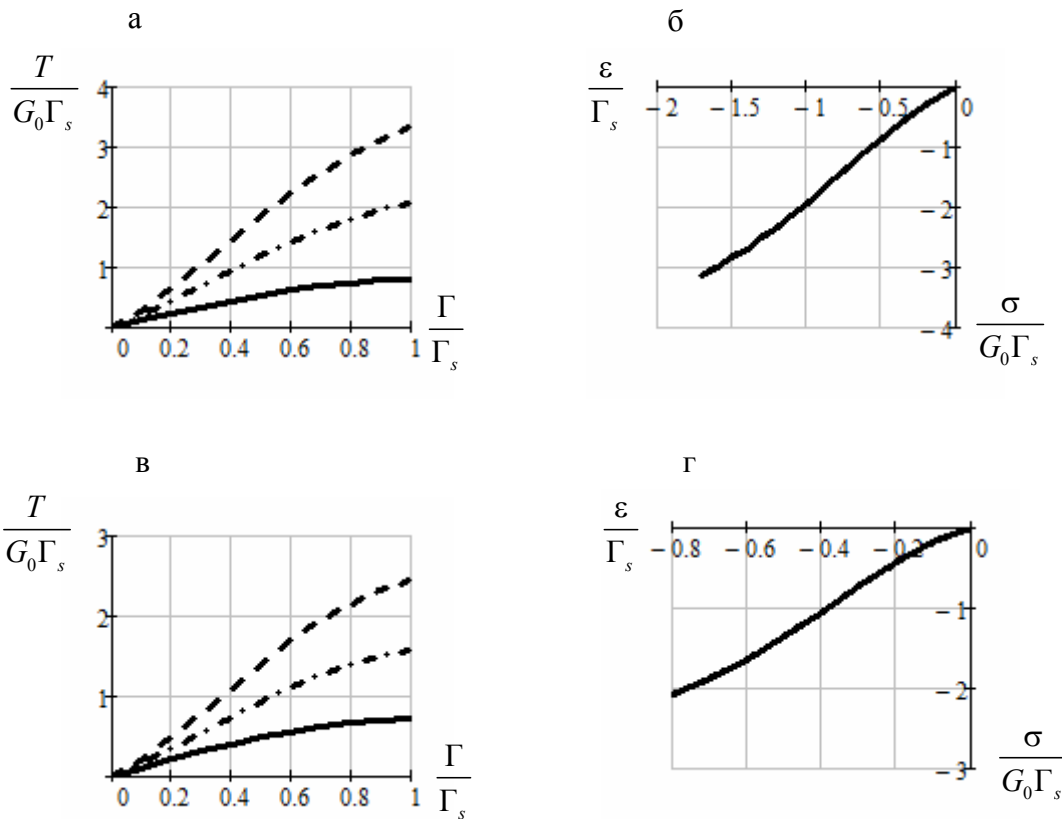


Рис. 3. Диаграммы сдвигового и объёмного деформирования при равномерном двухосном и одноосном укорочении



Для заданных констант сыпучей среды условия (13) выполняются и для равномерного двухосного, и для одноосного укорочения.

Численные исследования показывают, что при равномерном двухосном или одноосном укорочении чем выше коэффициент внутреннего трения, тем более жёсткой является сыпучая среда в отношении формоизменения. При возрастании коэффициента дилатансии жёсткость среды как в отношении формоизменения, так и в отношении изменения объёма также увеличивается. Изменение коэффициента дилатансии в большей мере сказывается на среде с большим коэффициентом внутреннего трения. Для значительных значений коэффициента дилатансии и коэффициента внутреннего трения наблюдается переход от выпуклых к вогнуто-выпуклым графикам на диаграммах сдвигового деформирования. При увеличении коэффициента дилатансии нелинейность диаграммы объёмного деформирования возрастает.

3. Одноосное удлинение:  $\varepsilon_1 > 0$ ;  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$  (рис. 4, а, б). Для заданных констант сыпучей среды условия (13<sub>2</sub>) не выполняются, если коэффициент внутреннего трения  $f = 0,9$ . В данном случае величина  $\Gamma^* = 0,417$ .

4. Равномерное двухосное удлинение:  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 > 0$ ;  $\varepsilon_3 = 0$  (рис. 4, в, г). Для заданных констант сыпучей среды условия (13) не выполняются, если  $f = 0,9$ . Если коэффициент дилатансии  $g = 0,1\Gamma_s$ , то условия (13) не выполняются и для коэффициента трения  $f = 0,5$ , и для  $f = 0,9$ .

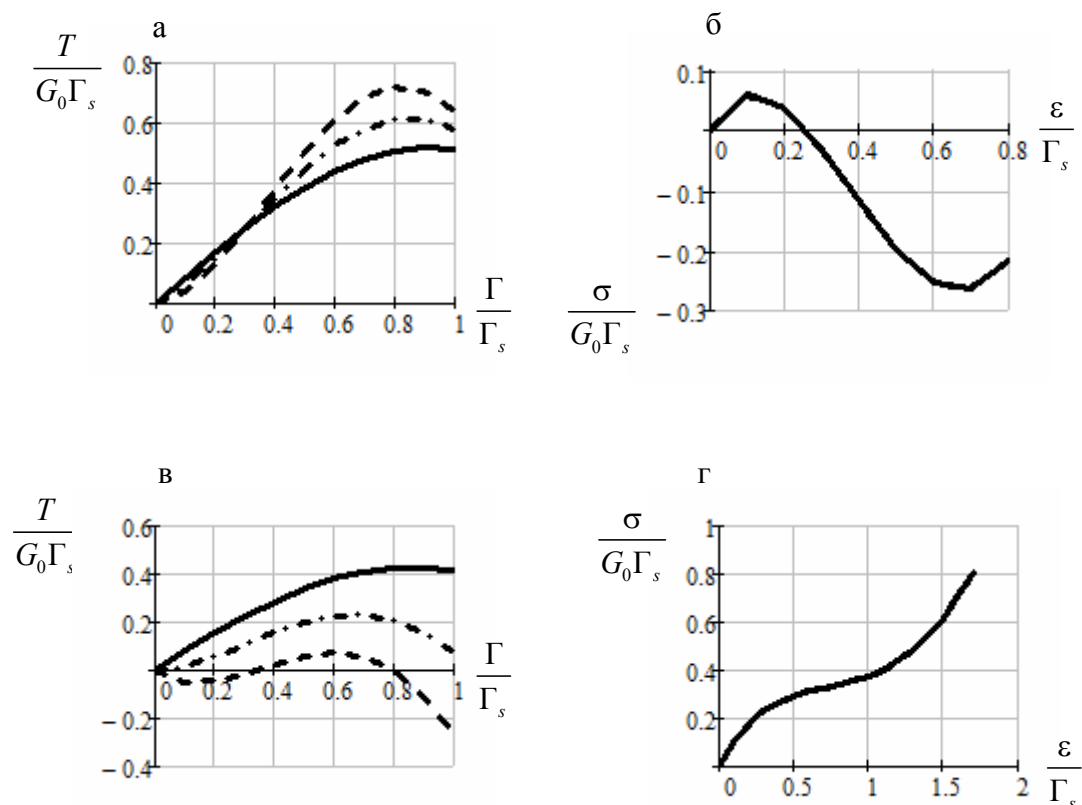


Рис. 4. Диаграммы сдвигового и объёмного деформирования при равномерном двухосном и одноосном удлинении

При одноосном или двухосном удлинении жёсткость среды в отношении формоизменения, вообще говоря, снижается при увеличении коэффициента внутреннего трения или уменьшении коэффициента дилатансии. Что касается изменения объёма, то при увеличении коэффициента дилатансии объёмные деформации возрастают, вообще говоря, и при больших коэффициентах дилатансии становятся сугубо нелинейными.

При больших значениях коэффициента дилатансии и коэффициента внутреннего трения наблюдается переход от выпуклых к выпукло-вогнутым графикам на диаграммах сдвигового деформирования.

5. Чистый сдвиг:  $\varepsilon_1 > 0$ ;  $\varepsilon_2 = -\varepsilon_1$ ;  $\varepsilon_3 = 0$  (рис. 5).

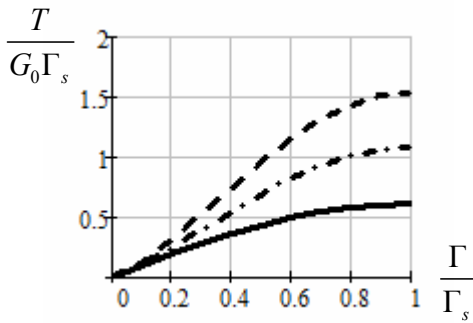


Рис. 5. Диаграмма сдвигового деформирования при чистом сдвиге

При чистом сдвиге диаграмма объёмного деформирования вырождается в точку. При увеличении коэффициента внутреннего трения, так же, как и при увеличении коэффициента дилатансии, жёсткость среды в отношении формоизменения возрастает. Для коэффициента дилатансии  $g \leq 0,1\Gamma_s$  кривые сдвигового деформирования на всём диапазоне изменения коэффициента внутреннего трения практически сливаются в одну.

З а м е ч а н и е. На рис. 3-5 на диаграммах сдвигового деформирования сплошная линия построена для коэффициента внутреннего трения  $f = 0,1$ ; штрихпунктирная линия – для  $f = 0,5$ ; пунктирная линия – для  $f = 0,9$ .

Уравнения Генки для деформационной теории пластичности сыпучей среды, в предположении подобия и коаксиальности девиаторов напряжений и деформаций, запишутся в произвольных осях в следующей форме:

$$\begin{cases} \sigma_x = K(\varepsilon, \Gamma) \cdot \varepsilon + 2G(\varepsilon, \Gamma) \left( \varepsilon_x - \frac{\varepsilon}{3} \right); & \tau_{xy} = G(\varepsilon, \Gamma) \cdot \gamma_{xy}; \\ \sigma_y = K(\varepsilon, \Gamma) \cdot \varepsilon + 2G(\varepsilon, \Gamma) \left( \varepsilon_y - \frac{\varepsilon}{3} \right); & \tau_{yz} = G(\varepsilon, \Gamma) \cdot \gamma_{yz}; \\ \sigma_z = K(\varepsilon, \Gamma) \cdot \varepsilon + 2G(\varepsilon, \Gamma) \left( \varepsilon_z - \frac{\varepsilon}{3} \right); & \tau_{zx} = G(\varepsilon, \Gamma) \cdot \gamma_{zx}. \end{cases} \quad (14)$$

Здесь в соответствии с деформационными соотношениями (9) и (10)

$$\begin{aligned} K(\varepsilon, \Gamma) &= K_0 \left[ \varepsilon - \frac{g}{\varepsilon} \left( 2 - \frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right)^2 \left( \frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right)^2 \right]; \\ G(\varepsilon, \Gamma) &= G_0 \left( 1 - \frac{\Gamma}{2\Gamma_s} \right) + fK_0 \frac{g}{\Gamma_s} \left( 2 - \frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right)^2 \frac{\Gamma}{\Gamma_s} - fK_0 \frac{\varepsilon}{\Gamma}. \end{aligned} \quad (15)$$

Связь между деформациями и перемещениями описывается соотношениями Коши:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}. \end{aligned}$$

**Заключение и выводы.**

1. Деформационная теория пластичности сыпучей среды была разработана для моделирования и описания напряжённо-деформированного состояния сплошных массивов типа грунтов или сыпучих сред. При этом для данного материала массива следует предварительно определить экспериментально четыре независимые константы, например  $G_0, \Gamma_s, f, g$ .

2. Получены аналитические зависимости, ограничивающие область применения деформационной теории сыпучей среды Г.А. Гениева.

3. Для некоторых значений констант среды и определённых видов напряжённого и деформированного состояний её механическое поведение уравнениями деформационной теории пластичности сыпучей среды не описывается.

#### Список литературы

1. Гениев, Г.А. Об одном варианте теории сыпучей среды / Г.А. Гениев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1965. – №6. – С. 22–26.
2. Гениев, Г.А. К вопросу обобщения условия предельного равновесия сыпучей среды / Г.А. Гениев // Основания, фундаменты, механика грунтов. – 1968. – №2. – С. 1–2.
3. Гениев, Г.А. Вопросы прочности и деформируемости грунтовых сред / Г.А. Гениев // Строительные конструкции: сб. – 1970. – Вып. 4.
4. Гениев, Г.А. К вопросу о деформационной теории пластичности сыпучей среды / Г.А. Гениев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1971. – №4. – С. 8–10.
5. Боткин, А.И. О прочности сыпучих и хрупких материалов / А.И. Боткин // Известия НИИ Гидротехники. – 1940. – Т.26. – С. 205–236.

#### References

1. Geniev, G.A. About one variant of loose medium theory / G.A. Geniev // Construction mechanics and structural analysis. – 1965. – № 6. – P.22–26.
2. Geniev, G.A. The question of synthesis of limit equilibrium conditions of loose medium / G.A. Geniev // Footing, ground work, soil mechanics. – 1968. – N 2. – P 1–2.
3. Geniev, G.A. Questions of strength and deformability of ground mediums / G.A. Geniev // Building constructions: collection. – 1970. – Iss. 4.
4. Geniev, G.A. The question of deformation theory of loose medium plasticity / G.A. Geniev // Construction mechanics and structural analysis. – 1971. – N 4. – P 8–10.
5. Botkin, A.I. About strength of loose and brittle materials / A.I. Botkin // News of NII Hydrotechnics. – 1940. – Vol.26. – P.205–236.

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

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

**Береговой Александр Маркович,**  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Городское  
строительство и архитектура»  
E-mail: ambereg@rambler.ru

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

*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 of the department «Urban  
construction and Architecture»  
E-mail: ambereg@rambler.ru

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

## ЭНЕРГОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ

А.М. Береговой, В.А. Береговой

Выполнен анализ проектных решений, повышающих энергоактивность наружных ограждающих конструкций в процессе солнечной инсоляции их поверхности. Предложены аналитические зависимости теплоаккумулирующей способности системы пассивного использования солнечной энергии и системы дополнительного отопления здания. Даны результаты экспериментального исследования энергоактивности светопрозрачного полистирольного лака на инсолируемой поверхности в конструкции навесного фасада.

*Ключевые слова:* наружные ограждающие конструкции, навесные вентилируемые фасады, критерий эффективности альтернативных источников энергии, энергоактивные элементы, светопрозрачные краски

## ENERGY-ACTIVE ELEMENTS OF EXTERNAL ENCLOSING STRUCTURES

А.М. Beregovoy, V.A. Beregovoy

Analysis of design decisions, increasing the energy activity of external enclosing structures in the process of solar insolation of their surface is given. The analytical dependence of thermal storage capacity of the system of passive use of solar energy and additional heating system of the building is proposed. The results of an experimental study of the energy activity of a translucent polystyrene lacquer on an insulated surface in the construction of a hinged facade are given.

*Keywords:* external enclosure structures, hinged ventilated facade, the criterion of the effectiveness of alternative energy sources, energy-active elements, light-transparent paints

В практике проектирования наружных ограждающих конструкций известны такие способы повышения их теплотехнической эффективности, как навесные вентилируемые фасады, система пассивного использования солнечной энергии (СПИСЭ), прозрачные теплоизоляционные материалы и теплоизоляционные краски.

Навесные вентилируемые фасады имеют следующие преимущества перед обычной системой проектирования наружных ограждений [1]:

- способствуют долговременному сохранению основных функциональных свойств наружных стен в различных условиях эксплуатации зданий, в том числе имеющих влажный и мокрый режимы помещений;
- эффективно защищают помещения от перегрева при воздействии интенсивной солнечной радиации в летнее время;

– повышают энергоэффективность здания, если в качестве навесного экрана применяется светопрозрачное ограждение.

В [2] на основе использования условной температуры наружного воздуха  $t_n^y$  дается решение задачи по определению теплоаккумулирующей способности  $Q_c$  внутреннего слоя упомянутой системы СПИСЭ и нахождению требуемого количества дополнительного тепла  $Q_{\text{доп}}$  для удовлетворения тепловой потребности здания.

Для случая, когда теплоаккумулирующая способность внутреннего слоя  $Q_c$  достаточна для удовлетворения потребности помещения (здания) в отоплении, значение  $Q_c$  находится по формуле

$$Q_c = \gamma \cdot c \cdot \delta^2 \cdot \Delta t (q_k + q_{\text{вент}}) (t_b - t_n) / (t_n^y - t_b) \lambda. \quad (1)$$

Если тепла солнечной радиации недостаточно для удовлетворения тепловой потребности помещения (здания) и требуется дополнительное отопление, то:

$$(t_n^y - t_b) k \cdot F \cdot z + Q_{\text{доп}} = (q_k + q_{\text{вент}}) (t_b - t_n), \quad (2)$$

или

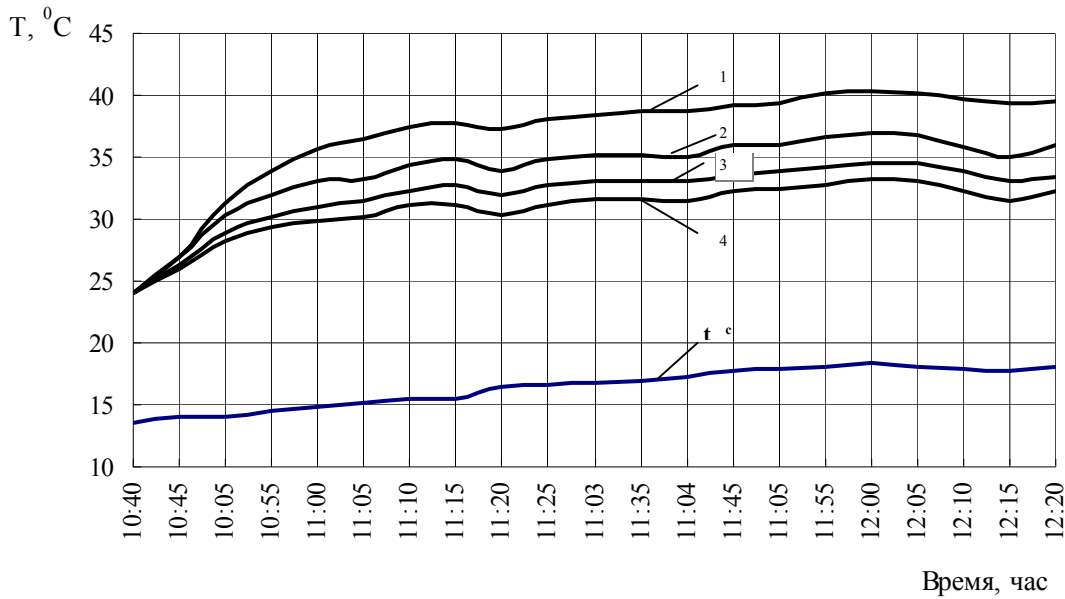
$$[(t_n^y - t_b) \lambda \cdot Q_c / \gamma \cdot c \cdot \delta^2 \cdot \Delta t] + Q_{\text{доп}} = (q_k + q_{\text{вент}}) (t_b - t_n). \quad (3)$$

Прозрачные теплоизоляционные материалы из вспененных акрилатов, гранулированных и однородных аэрогелей, пленочных сотовых материалов из поликарбоната значительно (на 60-90 %) снижают трансмиссионные теплопотери наружных стен, открывая принципиально новые возможности в проектировании энергоэффективных зданий.

Покрытия из теплоизоляционных красок на водной или акриловой основе с добавками в виде стекловолокна, перлита, пеностекла или керамических микросфер толщиной 2-4 мм заменяют примерно такую же толщину эффективного утеплителя (пенополистирола, минеральной ваты) ограждающей конструкции. Мнение о сверхнизкой теплопроводности составов красок типа «Корунд» из керамических гранул не подтверждено исследованиями [3]. Результаты эксперимента, полученные авторами настоящей работы, также показали, что покрытие из этой краски канадского производства имеет коэффициент теплопроводности в пределах 0,035 – 0,040 Вт/(м·°С).

Разновидностью теплоизоляционных красок являются светопрозрачные покрытия [4]. Они имеют такую же незначительную толщину и потому, хотя и обладают весьма малым термическим сопротивлением по сравнению со светопрозрачной теплоизоляцией, при наличии многочисленных воздушных включений могут повысить энергоактивность поверхности ограждающей конструкции, что объясняется механизмом «парникового эффекта», возникающего в их пористой структуре.

Оценка степени энергоактивности светопрозрачного покрытия с воздушными включениями и являлась целью поставленного эксперимента. Здесь светопрозрачным покрытием служили 2 слоя полистирольного лака, в которых при нанесении на поверхность образовывались многочисленные микропузырьки воздуха. В качестве других светопрозрачных покрытий использовали битое стекло по слою этого же лака, полиэтиленовую пленку с воздушной прослойкой толщиной 5 мм. Исследуемые слои наносили на тонкостенные изделия из строительной керамики (плитки темно-коричневого цвета) и помещали вместе с контрольным образцом в специально сконструированную камеру, имеющую 1-слойное остекление с инсолируемой стороны. Тонкостенная керамическая плитка обеспечивает быстрый прогрев воздушной прослойки. Испытания проводились в солнечную погоду при положительной температуре наружного воздуха  $t_n^c$ . Результаты исследования показаны на рисунке [5]. Температура прогрева воздушных прослоек зависит от способности исследуемых покрытий воспринимать тепло солнечной радиации. Наиболее быстрый прогрев прослоек наблюдался под образцами, экранированными полиэтиленовой пленкой или покрытыми 2 слоями полистирольного лака. Контрольный образец без светопрозрачного покрытия поверхности отличался наименьшей энергоактивностью.



Температуры воздушной прослойки в процессе инсоляции под образцами из строительной керамики:

- 1 – полиэтиленовая пленка; 2 – двухслойный полистирольный лак (с воздушными пузырьками); 3 – полистирольный лак с битым стеклом; 4 – контрольный образец без покрытия

Оценивалась энергоэффективность проектных решений на основе критерия эффективности использования альтернативных источников энергии [6]

$$K_{\text{эф}}^{\text{аэн}} = q_{\text{от}}^{\text{п}} / q_{\text{от}}^{\text{р.аэн}}, \quad (4)$$

где  $q_{\text{от}}^{\text{п}}$  – расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания по нормам тепловой защиты зданий [6],

$$q_{\text{от}}^{\text{п}} = [k_{\text{об}} + k_{\text{вент}} - (k_{\text{быт}} + k_{\text{рад}}) \cdot v\zeta] \cdot (1 - \xi) \cdot \beta \cdot h; \quad (5)$$

$q_{\text{от}}^{\text{р.аэн}}$  – та же величина, но с учетом удельных характеристик теплопоступлений от использования новых энергосберегающих решений  $\sum k_i$ , в том числе на основе альтернативных источников энергии,

$$q_{\text{от}}^{\text{р.аэн}} = [k_{\text{об}} + k_{\text{вент}} - (k_{\text{быт}} + k_{\text{рад}} + \sum k_i) \cdot v\zeta] \cdot (1 - \xi) \cdot \beta \cdot h. \quad (6)$$

В зависимости от площади энергоактивной стены величина  $K_{\text{эф}}^{\text{аэн}}$  при использовании рассмотренных энергосберегающих решений может достигать значений 1,05...1,15.

### Выводы

1. Использование проектных решений по пассивной системе солнечной энергии и светопрозрачному покрытию в конструкции навесного экрана стен позволяет повысить энергоэффективность здания в пределах указанного значения критерия  $K_{\text{эф}}^{\text{аэн}}$ .

2. Светопрозрачное покрытие с наибольшим эффектом может применяться в конструктивном решении навесного фасада, которое обеспечивает интенсивный теплообмен между инсолируемой поверхностью и воздушной средой помещения.

3. В основной стене целесообразно устроить систему приточных каналов для циркуляции нагреваемого воздуха из подэкранного пространства в воздушную внутреннюю среду.

## Список литературы

1. Нормы по проектированию и монтажу. Навесные фасадные системы с воздушным зазором. – URL: <http://pandia.u/77/314/35292.ph/> (дата обращения 03.03.18).
2. Береговой, А.М. Теплоаккумулирующие свойства энергоактивной стены в системе естественной вентиляции и отопления здания / А.М. Береговой, В.А. Береговой, О.Л. Викторова // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №1. – С. 74–77.
3. Герман, М.Л. Математическая модель для расчета теплозащитных свойств композиционного покрытия «Керамические микросферы – связующее» / М.Л. Герман, П.С. Гринчук // Инженерно-физический журнал. – 2002. – Т.75, №6. – С.43–53.
4. Исследование энергоактивных свойств светопрозрачных покровных слоев. – URL: <https://fasadinfo.ua/articles/recomendacii/385> (дата обращения 03.03.18).
5. Береговой, А.М. Энергоэффективные здания и их конструкции с учетом использования местных материалов: монография / А.М. Береговой, В.А. Береговой. – Пенза: ПГУАС, 2006. – 204 с.
6. Береговой, А.М. Технико-экономическая эффективность энергосберегающих решений в архитектурно-строительном проектировании / А.М. Береговой, М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №2. – С. 144–148.

## References

1. Standards for design and installation. Hinged facade systems with air gap. – URL: <http://pandia.u/77/314/35292.ph/> circulation date 03.03.18).
2. Beregovoy, A.M. Heat-accumulating properties of the energy-active wall in the system of natural ventilation and heating of the building /A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy, O. L. Victorova // Regional architecture and engineering – 2017. – No.1. – P. 74–77.
3. German, M.L. Mathematical model for calculation of thermal properties of the composite coating «Ceramic microspheres – binder» / M.L. German, P.S. Grinchuk // Journal of Engineering physics. – 2002. – Vol. 75, No. 6. – P. 43–53.
4. Investigation of energy-active properties of translucent cover layers. – URL: <https://fasadinfo.ua/articles/recomendacii/385> (circulation date 03.03.18).
5. Beregovoy, A.M. Energy efficient buildings and their designs with the use of local materials: monograph. / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy. – Penza: PGWC, 2006. – 204 p.
6. Beregovoy, A.M. Techno-economic efficiency of energy savings solutions in architecture and construction design /A.M. Beregovoy, M.A. Derina, L.N. Petryanina // Regional architecture and engineering. – 2015. – No.2. – P. 144–148.

УДК 519.87 : 697.92

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

**Кузина Валентина Владимировна,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: kuzina@pguas.ru

**Кошев Александр Николаевич,**  
доктор химических наук, профессор,  
советник РААСН, действительный член  
Нью-Йоркской академии наук и Академии  
информатизации образования, профессор  
кафедры «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: koshev@pguas.ru

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

**Kuzina Valentina Vladimirovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Information and  
computing systems»  
E-mail: kuzina@pguas.ru

**Koshev Alexander Nikolaevich,**  
Doctor of Chemistry Science, Professor,  
Adviser of the Russian Academy of  
Architectural and Building Sciences full  
member of the New York Akademy of  
Sciences and Akademy of informationof  
education, Professor of the department  
«Information and computing systems»  
E-mail: koshev@pguas.ru

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЛЕВЕНБЕРГА – МАРКВАРДА ПРИ РЕШЕНИИ НАУЧНЫХ ЗАДАЧ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА

В.В. Кузина, А.Н. Кошев

Предложен метод оптимизации критериев для решения задач строительных наук, основанный на модификации метода Левенберга – Марквардта. Приводится алгоритм выбора параметра, позволяющего расширить область и увеличить скорость сходимости алгоритма применяемого метода.

Рассматриваются примеры решения задач строительной отрасли с использованием предложенного метода минимизации.

*Ключевые слова: задачи строительства, метод минимизации функций, модификация метода Левенберга – Марквардта*

## ABOUT FEATURES OF APPLICATION OF LEVENBERG – MARQUARDT METHOD IN SOLVING SCIENTIFIC PROBLEMS IN CONSTRUCTION

V.V. Kuzina, A.N. Koshev

A method is proposed for minimizing the function of criteria for solving the problems of building sciences, based on the modification of Levenberg – Marquardt method. An algorithm is given for selecting a parameter that allows expanding the sphere and increasing the rate of convergence of the algorithm of the applied method.

Examples of solving construction problems using the proposed minimization method are given.

*Keywords: construction problems, method of minimization of functions, modification of Levenberg-Marquardt method*

Математические модели из области строительной науки представляют собой всё многообразие математических объектов: от простейших линейных и нелинейных уравнений до сложных систем интегродифференциальных уравнений, задач оптимизации и оптимального управления.



Среди множества математических методов, применяемых при решении задач строительства, особое место занимают методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений. Нелинейные системы либо непосредственно описывают некоторые строительные процессы, например, такие, как распределение нагрузок, прилагаемых к элементам строительной конструкции [1, 2], или другие задачи строительной механики, либо возникают в результате преобразования сложных интегродифференциальных моделей, например, таких, как модели, описывающие распределения гидравлических характеристик в системах трубопроводов теплоцентралей [3], или модели для расчета распределения массивных примесей в ограниченном пространстве [2], а также в других научных задачах в области строительства и строительных технологий.

Известно, что задачу по решению системы  $n$  нелинейных алгебраических уравнений с  $n$  неизвестными  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = 0$ ;  $\mathbf{f} = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T$ ;  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  можно привести к задаче на минимизацию функции:

$$t(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n f_i^2(\mathbf{x}). \quad (1)$$

И наоборот, задача о нахождении минимума некоторой функции может быть сведена к решению нелинейной системы путем приравнивания к нулю ее частных производных [4–9].

В частности, алгоритм минимизации суммы квадратов (1) использовался нами при решении задачи моделирования и оптимизации портового причального сооружения – причальной стенки из массивной кладки с различного вида надстройками. Основной проблемой при проектировании и строительстве такого массивного сооружения является высокая материалоемкость, обуславливающая его значительную стоимость.

Один полный расчет гравитационной конструкции в соответствии с действующими нормативами требует затраты 50–55 чел/ч. Такой объем расчетных работ не дает возможности выполнить более 1–2 подборочных расчетов и соответственно получить конструкцию с оптимальными размерами.

При математическом моделировании использовался метод предельных состояний, принятый для расчета портовых гидротехнических сооружений. Выбор оптимальной схемы производился из условия минимума стоимости конструкции при выполнении ограничений, заданных условиями строительства [1].

Независимыми параметрами, подлежащими оптимизации, были выбраны наиболее значимые геометрические размеры сооружения: ширина подводной части  $x_1$  и ширина надстройки  $x_2$ . В соответствии с действующими нормативными документами вводились:

1) ограничения устойчивости надстройки в основании по схеме плоского сдвига и устойчивости всего сооружения по схеме плоского сдвига в контакте сооружение – постель;

2) ограничения величин сжимающих и растягивающих напряжений по контакту надстройка – основание, а также величин сжимающих и растягивающих напряжений на контакте сооружение – основание.

Математическая постановка задачи выглядит следующим образом: минимизировать общую стоимость сооружения  $S(x_1, x_2) \rightarrow \min$  при ограничениях  $f_i(x_1, x_2) \leq 0$ ,  $i = 1, \dots, m$ .

Отметим, что общая стоимость сооружения складывается из стоимости каждого из элементов конструкции: стоимости основания, стоимости надстройки и стоимости обратной засыпки. Вид функций  $f_1(x_1, x_2) \dots f_m(x_1, x_2)$  чрезвычайно громоздкий и не может быть представлен в аналитической форме. Функции  $S(x_1, x_2)$ ,  $f_i(x_1, x_2)$  не линейны относительно координат  $x_1, x_2$ , и, следовательно, решаемая задача является задачей нелинейного программирования. Для формирования целевой функции  $F(x_1, x_2)$ , подлежащей минимизации, был использован метод штрафных функций, сводящий задачу к безусловной минимизации функции следующего вида:

$$F(x_1, x_2) = S(x_1, x_2) + t_k \sum [ |f_i(x_1, x_2)| - f_i(x_1, x_2) ]^2. \quad (2)$$

Так как функция  $S(x_1, x_2)$  является строго возрастающей относительно переменных, целесообразно начальные значения  $x_1^0, x_2^0$  принимать минимально возможными для данного сооружения. При этом, как правило, начальное приближение не попадает в область выполнения ограничений, что и явилось основным критерием при выборе метода решения задачи. Условным окончанием процесса минимизации функции  $F(x_1, x_2)$  может считаться выполнение всех ограничений.

Метод решения задачи основан на модификации метода Левенберга – Марквардта [6, 7], представляющей собой комбинацию методов Ньютона и наискорейшего спуска, что позволяет расширить область и увеличить скорость сходимости алгоритма при решении сложных задач минимизации критериев, в том числе и при решении задач строительных наук.

Метод Левенберга – Марквардта является итерационным, при этом последовательность, сходящаяся к решению, определяется следующим образом:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \Delta\mathbf{x}^{(k)}, \quad (3)$$

где  $\Delta\mathbf{x}^{(k)}$  – решение системы линейных уравнений следующего вида:

$$(M + \mu I_e) \Delta\mathbf{x}^{(k)} = -\mathbf{F}; \quad (4)$$

$$M = W^T W, \quad \mathbf{F} = W^T \mathbf{f}. \quad (5)$$

Здесь  $W$  – матрица Якоби системы (1);  $I_e$  – единичная матрица;  $\mu$  – числовой параметр.

Введение параметра  $\mu$  позволяет расширить область сходимости алгоритма Ньютона – Гаусса и, с помощью смещения к линии наискорейшего спуска, препятствовать расходимости. При  $\mu \cong 0$   $\Delta\mathbf{x}^{(k)}(\mu) \approx -M^{-1}\mathbf{F}$ , что является шагом в методе Ньютона – Гаусса. При достаточно большом значении  $\mu$  получаем:  $\Delta\mathbf{x}^{(k)}(\mu) \approx \mathbf{F}/M$ , что соответствует приращению шага вдоль направления наискорейшего спуска.

Предлагается следующий алгоритм выбора параметра  $\mu$ .

Из разложения  $t(\mathbf{x})$  в ряд Тейлора в точке  $\mathbf{x}^{(k)}$  имеем:

$$t(\mathbf{x}^{(k)} + \Delta\mathbf{x}) - t(\mathbf{x}^{(k)}) = 2(\Delta\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{F}^{(k)} + \omega,$$

где  $\omega$  – члены разложения порядка выше первого.

Составим отношение:

$$R = \frac{t^{(k)}(\mathbf{x}^{(k)} + \Delta\mathbf{x}) - t^{(k)}(\mathbf{x}^{(k)})}{2(\Delta\mathbf{x})^T \mathbf{F}^{(k)}}.$$

Может возникнуть два случая.

1.  $t(\mathbf{x}^{(k)} + \Delta\mathbf{x}) - t(\mathbf{x}^{(k)}) < 0$ ;
2.  $t(\mathbf{x}^{(k)} + \Delta\mathbf{x}) - t(\mathbf{x}^{(k)}) \geq 0$ .

Множество проведенных численных экспериментов и эвристические рассуждения позволили нам составить следующий алгоритм вычисления наиболее эффективного значения параметра  $\mu$ .

1. Если  $\sigma_2 < R \leq 1 + \sigma_3$ , то  $\mu^{(k+1)} = \mu^{(k)} (1 + \gamma |R - \sigma_2| \cdot |R - (1 - \sigma_3)|)$ ;  $\sigma_2 = 0,8$ ;  
 $\sigma_3 = 0,4$ ;  $\gamma = 1$ .

2. Если  $R < \sigma_1$  ( $\sigma_1 = 0,4$ ), то  $\mu^{(k+1)} = \frac{\mu^{(k)}}{1 + \nu |R|}$ .

3. Если  $R \geq 2 - \sigma_4$  ( $\sigma_4 = 0, 4$ ), то  $\mu^{(k+1)} = \frac{\mu^{(k)}}{1 + \nu |R - 2 - \sigma_4|}$ .

4. Если  $\sigma_1 \leq R \leq \sigma_2$  или  $1 + \sigma_3 \leq R \leq 2 - \sigma_4$ , то  $\mu^{(k+1)} = \mu^{(k)}$ .

5. Во всех других случаях целесообразно уменьшать  $\mu$  по соотношению

$$\mu^{(k+1)} = \frac{\mu^{(k)}}{1 + |R|}.$$

На скорость сходимости метода влияет также начальное значение параметра  $\mu_n$ . Если начальное приближение  $\mathbf{x}^{(0)}$  далеко от решения  $\mathbf{x}^*$ , то можно брать  $\mu_n > 1$ , если  $\mathbf{x}^{(0)}$  близко к  $\mathbf{x}^*$ , то  $\mu_n < 1$ . При решении практических задач мы принимали  $\mu_n = 1$ . В алгоритме для уточнения решения предусмотрен автоматический переход на метод Ньютона.

Работоспособность алгоритма подтверждена решением ряда разнообразных систем нелинейных алгебраических уравнений. Описанный метод во многом удовлетворяет указанным требованиям к методам решения систем нелинейных уравнений и успешно использовался при решении задач распределения потенциалов полей различной природы, решения интегральных уравнений Фредгольма первого и второго рода и других задач строительной физики [8–12].

Используя описанные методы математического моделирования и оптимизации, позволяющие получить существенные выгоды при оптимизации процессов в строительной физике и параметров сооружаемых объектов строительства, в частности, при проектировании причального сооружения, можно значительно повысить производительность труда описанных сооружений, снизить стоимость сооружения не менее чем на 10 % [1].

#### Список литературы

1. Koshev, A.N. Mathematical modeling in tasks of construction / A.N. Koshev, V.V. Kuzina // *Procedia Engineering*, 161 (2016). – “Elsevier BV”. – P. 1874-1878. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.726.
2. Кошев, А.Н. Математическое моделирование как элемент управления в задачах строительной отрасли / А.Н. Кошев, В.В. Кузина // *Региональная архитектура и строительство*. – 2012. – №2 (13). – С.167–176.
3. Файзуллин, Р.Ф. О решении систем нелинейных алгебраических уравнений специального вида / Р.Ф. Файзуллин // *Математические структуры и моделирование*. – 2001. – Вып. 7. – С. 79–84.
4. Поляк, Б.Т. Методы минимизации при наличии ограничений / Б.Т. Поляк // *Итоги науки и техники, серия «Математический анализ»: сб.* – М.: ВИНТИ, 1974. – С. 147–194.
5. Моисеев, М.Н. Математика ставит эксперимент / М.Н. Моисеев. – М.: Наука, 1979. – 222 с.
6. Levenberg, K.A. / A method for the solution of certain non linear problem in least squares / K.A. Levenberg // *An apple math*, 1944, V. 2. – P. 164.
7. Marquardt, B.D. An algorithm for least squares estimation / B.D. Marquardt // *An apple math*. – 1969. – V. 11. – P. 431.
8. Ортега, Дж. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными / Дж. Ортега, В. Рейнболдт. – М.: Мир, 1975. – 558 с.
9. Розенброк, Х. Вычислительные методы для инженеров химиков / Х. Розенброк, С. Стори. – М.: Мир, 1968. – 443 с.
10. Поддубный, Н.П. Программа для решения систем нелинейных уравнений / Н.П. Поддубный. – Новосибирск, 1973. – Зарегистр. во Всесоюзном фонде алгоритмов и программ. П.00611.

11. Поляк, Б.Т. Стандартная программа минимизации функции многих переменных / Б.Т. Поляк, В.А. Соколов. – М.: Изд-во МГУ, 1967. – 68 с. – (Серия «Стандартные программы решения задач математического программирования»).
12. Бакушинский, А.Б. Об одном численном методе решения интегральных уравнений Фредгольма I рода / А.Б. Бакушинский // Журн. выч. математики и мат. физики. – 1965. – Т. 5, № 4. – С. 744–747.

### References

1. Koshev, A.N. Mathematical modeling in tasks of construction / A.N. Koshev, V.V. Kuzina // *Procedia Engineering*, 161 (2016). – “Elsevier BV”. – P. 1874-1878. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.726.
2. Koshev, A.N. Mathematical modeling as an element of management in the tasks of the construction industry / A.N. Koshev, V.V. Kuzina // *Regional architecture and engineering*. – 2012. – № 2 (13). – P.167–176.
3. Faizullin, R.F. On the solution of systems of non-linear algebraic equations of a special form / R.F. Fayzullin // *Mathematical structures and modeling*. – 2001. – No. 7. – P. 79–84.
4. Polyak, B.T. Methods of minimization under constraints / B.T. Polyak // *The Results of Science and Technology, Series “Mathematical Analysis”*. – М.: VINITI, 1974. – P. 147–194.
5. Moiseev, M.N. Mathematics makes an experiment / M.N. Moiseyev. – М.: “Nauka”, 1979. – 222 p.
6. Levenberg, K.A. / A method for the solution of a certain non-linear problem in least squares / K.A. Levenberg // *An apple math*. – 1944. – V. 2. – P. 164.
7. Marquardt, B.D. An algorithm for least squares estimation / B.D. Marquardt // *An apple math*. – 1969. – V. 11. – P. 431.
8. Ortega, J. Iterative methods for solving nonlinear systems of equations with many unknowns / J. Ortega, W. Reinboldt. – М.: “Mir”, 1975. – 558 p.
9. Rosenbrock, H. Computational methods for chemical engineers / H. Rosenbrock, S. Story. – М.: Mir, 1968. – 443 p.
10. Poddubny, N.P. Program for solving systems of nonlinear equations / .P. Poddubny.– Novosibirsk, 1973. – All-Union Fund of Algorithms and Programs. P.00611.
11. Polyak, B.T. A standard program for minimizing the function of many variables. Series: “Standard programs for solving mathematical programming problems” / B.T. Polyak, V.A. Sokolov. – М.: MSU publishing house, 1967. – 68 p.
12. Bakushinsky, A.B. On a numerical method for solving Fredholm integral equations of the first kind / A.B. Bakushinsky // *Zh. Vych. Math. and Math. Phys.* – 1965. – Vol. 5, No. 4. – P. 744–747.

УДК 721:699.86:692.23:697.9

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

**Дерина Мария Александровна,**  
кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры  
«Городское строительство и архитектура»  
E-mail: gsia@pguas.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Derina Maria Aleksandrovna,**  
Candidate of Sciences, Senior lecturer  
of the department «Urban construction and  
Architecture»  
E-mail: gsia@pguas.ru

## ВЫБОР УТЕПЛИТЕЛЯ ДЛЯ НАВЕСНОГО ФАСАДА С ВЕНТИЛИРУЕМЫМ ВОЗДУШНЫМ ЗАЗОРОМ

М.А. Дерина

Приведены требования к выбору утеплителя при устройстве навесного фасада с вентилируемым воздушным зазором. Представлены основные характеристики утеплителей и конструктивные решения фасада с утеплителем. Дана методика расчета толщины различных видов утеплителя в зависимости от термического сопротивления конструкции.

*Ключевые слова:* навесной фасад, конструктивное решение, утеплитель, тепловая изоляция, воздушный зазор, ветрозащитная мембрана

## CHOICE OF INSULATION FOR SUSPENDED FACADE WITH A VENTILATED AIR GAP

M.A. Derina

Requirements for the choice a heater for a hinged facade with a ventilated air gap are made. Main required characteristics of insulation and structural solutions of the facade with insulation are presented. The method of calculating the thickness of different types of insulation depending on the thermal resistance of the structure is given.

*Keywords:* hinged facade, design solution, insulation, thermal insulation, air gap, windproof membrane

При устройстве навесного вентилируемого фасада здания важную роль играет утеплитель как один из основных факторов, способствующих снижению тепловых потерь здания. Именно поэтому он должен быть правильно подобран и смонтирован с учетом назначения здания, климата и материала стен.

Так как в вентилируемом фасаде есть воздушный зазор, который может способствовать распространению огня, то нормами противопожарной безопасности строго запрещено использовать в качестве утеплителя горючий материал. Также при монтаже фасада утеплитель не накрывают ветро- и влагозащитной пленкой, потому что этот материал очень быстро возгорается. Следовательно, утеплитель должен быть устойчив к влаге и ветру.

Утепленный вентилируемый фасад (рис. 1) должен отвечать следующим условиям:

- паропроницаемость утеплителя (паропроницаемость 0,1–0,3 мг/(м·ч·Па));
- инертность утеплителя по отношению к другим материалам конструкции фасада;
- наличие обустроенного вентиляционного зазора размером 40–60 мм (между слоем утеплителя и облицовочным материалом остается вентилируемое воздушное пространство, способствующее повышению уровня климатического комфорта в помещении и своевременному отводу конденсата).

Кроме этого, актуальным является вопрос целесообразности применения ветрозащитной мембраны в конструкции утепленного вентилируемого фасада (рис. 2).

С одной стороны, ветрозащитная пленка предотвращает эмиссию волокна из утеплителя и позволяет предотвратить фильтрацию воздуха, способствуя сохранению теплозащитных свойств конструкции [1]. С другой стороны, ветрозащитные пленки являются изделиями на полимерной основе и относятся к материалам группы горючести Г2, поэтому при воздействии на них открытого огня происходит их возгорание (при возникновении пожара они могут также способствовать его распространению).

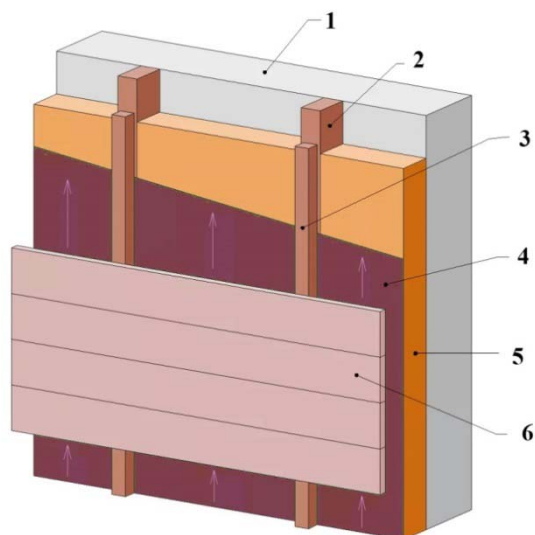


Рис. 1. Конструкция утепленного вентилируемого фасада:

- 1 – несущая стена; 2 – первая обрешетка;
- 3 – вторая обрешетка; 4 – мембрана;
- 5 – утеплитель; 6 – облицовочный слой

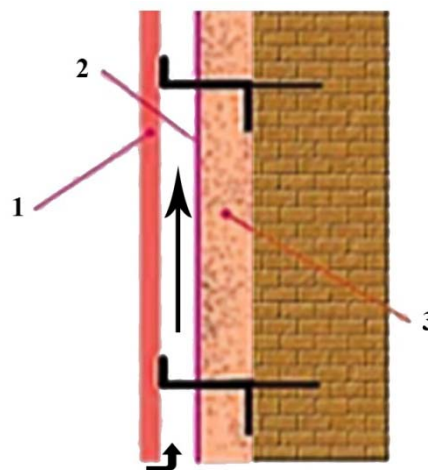


Рис. 2. Конструкция утепленного вентилируемого фасада с ветрозащитной мембраной:

- 1 – фасадная панель; 2 – мембрана;
- 3 – утеплитель

Одним из конструктивных решений устройства теплоизоляции в системах вентилируемых фасадов является использование плотных минераловатных утеплителей без ветрозащитной мембраны. В этом случае основным критерием выбора теплоизоляции является плотность материала. Требования к плотности утеплителя для навесных фасадных систем закреплены в ряде региональных строительных норм РФ. Плотность наружного слоя минераловатного утеплителя устанавливается не менее  $80\text{--}90\text{ кг/м}^3$ , плотность внутреннего слоя устанавливается не менее  $30\text{ кг/м}^3$  (в случае использования двухслойной системы изоляции).

Достаточно жесткие волокнистые плиты сами по себе являются хорошей ветрозащитой, так как они остаются гибкими и, тем не менее, довольно прочными. Такие плиты удобны при монтаже и надежны в эксплуатации [2, 3].

Существует ряд характеристик материала утеплителя в конструкции навесного вентилируемого фасада, в зависимости от которых осуществляется выбор этого материала для конкретного типа здания и климатических условий (см. таблицу). Немаловажной является экономическая сторона вопроса – она определяет обоснованность и целесообразность применения того или иного вида материала утеплителя. Так, самым экономически выгодным видом является стекловата, которая также не уступает по паропроницаемости и теплопроводности другим видам материалов.

Между плитами утеплителя и стеной не должно оставаться пустот и зазоров, так как даже при сантиметровом зазоре в стыках между плитами утеплителя потери теплоты составляют 15 %. Ещё более существенные теплотери возникают при монтаже плит внутреннего утеплителя неплотно к стене. Зазор в 10 мм между плитой утеплителя и основанием снижает теплозащитные характеристики фасада на 52 %.

## Требуемые характеристики утеплителей

Характеристики	Базальтовая вата	Стекловата	Пенопласт	Экструдированный пенополистирол	Эковата
Теплопроводность, м <sup>2</sup> ·°С/Вт	0,032-0,048	0,029-0,052	0,031-0,045	0,023-0,034	0,038-0,041
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	30-220	10-50	10-35	25-45	30-75
Паропроницаемость, Вт	0,25-0,35	0,5-0,6	0,05	0,013	0,67
Горючесть	НГ	Г1/НГ	Г1/Г2/Г3/Г4	Г3/Г4	Г2
Водопоглощение, %	1,5	1,5-2	0,4	0,2-0,4	1
Стоимость, руб./м <sup>2</sup>	350-970	40-145	250-320	450-600	250-780

К верхнему слою утеплителя предъявляются следующие требования [4]. Он должен быть более плотным, чтобы обеспечить защиту утеплителя от механических повреждений. Кроме того, верхний слой рассматривается в качестве огнестойкой защиты конструкции от пожара. С этих позиций в качестве материала верхнего слоя следует выбирать плиты плотностью не менее 75 кг/м<sup>3</sup>. Таким образом, в целях наилучшего соответствия комплексу требований к теплоизоляции в навесных вентилируемых фасадах лучше применять двухслойные решения: нижний слой – из легких неплотных плит, а верхний – из каменной ваты или из стекловаты высокой плотности. В результате получается плотная снаружи конструкция с внутренним слоем, который надежно примыкает к поверхности стены без образования полостей и разрывов.

Однако тепловые потери при монтаже навесных вентилируемых фасадов неизбежны. Наибольшие потери теплоты происходят в местах установки кронштейнов (17 %), тарельчатых анкеров (7,2 %), стыков с балконной плитой (6,6 %). Чтобы сократить эти значения до минимума, необходимо точно подобрать толщину утеплителя в зависимости от характеристик здания, состава конструктивных слоев [5].

Существует несколько методик расчета толщины утеплителя в навесном вентилируемом фасаде, однако методика, рассмотренная в СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», наиболее полно учитывает все факторы, влияющие на выбор материала и толщины утеплителя. В соответствии с ней толщина слоя утеплителя  $\delta_{\text{ут}}$  рассчитывается по формуле

$$\delta_{\text{ут}} = \left( \frac{1}{\frac{1}{R_0^{\text{тп}}} - \sum l_j \psi_j - \sum n_k X_k} - \frac{\delta_k}{\alpha_k} - \frac{1}{\alpha_{\text{вн}} - \alpha_k} \right) \cdot \lambda_{\text{ут}},$$

где  $\psi_j$  – удельные потери теплоты через линейную неоднородность  $j$ -го вида, Вт/(м·°С);  $X_k$  – удельные потери теплоты через точечную неоднородность  $k$ -го вида, Вт/°С;  $\alpha_{\text{вн}}$  – внутренний коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·°С,  $\alpha_{\text{вн}} = 8,7$ ;  $\delta$  – толщина различных слоев наружной стены.

При величине термического сопротивления  $R_0^{\text{тп}} = 1,2$  м<sup>2</sup>·°С/Вт толщина слоя утеплителя из стекловаты составит 56 мм, из пенопласта – 60 мм, а из экструдированного пенополистирола – 36 мм. Толщина утеплителя зависит от теплопроводности ограждающей конструкции для определенной климатической зоны, от теплопроводности самого утеплителя, от критериев теплоустойчивости наружного ограждения, которые, в частности, рассмотрены в [6]. При вычислении толщины утеплителя в конструкции вентилируемого фасада необходимо учитывать все слои материалов, в том числе воздуха. В данном случае воздушный поток, как правило, неподвижен, поэтому учитывается теплопроводность неподвижного воздуха (0,022 Вт/м·°С) [7].

Таким образом, при выборе конструктивного решения вентилируемых навесных фасадов необходимо учитывать параметры утеплителя для снижения тепловых потерь в здании и уменьшения затрат на его отопление. Рассмотренная методика расчета подтверждает, что правильный подбор толщины утеплителя с определенными характеристиками обеспечивает увеличение срока службы конструкций и здания в целом, способствует улучшению его экологических характеристик как на стадии проектирования, так и при проведении капитального ремонта.

### Список литературы

1. Гагарин, В.Г. Расчет теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов, Е.Ю. Цыкановский // АВОК. – 2004. – № 2, № 3.
2. Ватин Н.И. Навесные вентилируемые фасады: обзор основных проблем / Н.И. Ватин // Кровельные и изоляционные материалы. – 2007. – №6(36). – С. 34–36.
3. Практические рекомендации по проектированию энергоэффективных жилых зданий / Н.П. Умнякова [и др.]. – Астана, 2015.
4. Береговой, А.М. Оценка тепловых потерь при эксфильтрации воздуха через пористую структуру материала ограждения / А.М. Береговой, М.А. Дерина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №1. – С. 85.
5. Ветрова, Г. Вентфасады: типичные ошибки при устройстве и проектировании фасадов с минераловатными утеплителями / Г. Ветрова // Кровельные и изоляционные материалы. – 2015. – № 2.
6. Береговой, А.М. Моделирование теплоустойчивости наружных ограждений для оценки тепловых потерь здания и микроклимата его помещений / А.М. Береговой, М.А. Дерина // Моделирование и механика конструкций. – 2016. – № 3. – С. 16.
7. Береговой, А.М. Вопросы повышения энергоэффективности малоэтажных зданий / А.М. Береговой, М.А. Дерина, А.Д. Пильгин // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2016. – №1. – С. 20.

### References

1. Gagarin, V.G. Calculation of thermal insulation of facades with ventilated air gap / V.G. Gagarin, V.V. Kozlov, E.Yu. Tsykanovsky // AVOK. – 2004. – № 2, № 3.
2. Vatin, N.I. Ventilated facades: overview of the main problems / N. I. Vatin // Roofing and insulating materials. – 2007. – No. 6(36). – P. 34–36.
3. Practical recommendations for the design of energy efficient residential buildings / N.P. Umnyakova [etc.]. – Astana, 2015.
4. Beregovoj, A.M., Evaluation of heat losses during exfiltration of air through the porous structure of the material of the insulation / A.M. Beregovoj, M.A. Derina // Regional architecture and engineering. – 2016. – No. 1. – P. 85.
5. Vetrova, G. Ventilated facades: typical errors in the design and construction of facades with mineral wool insulation / G. Vetrova // Roofing and insulation materials. – 2015. – No. 2.
6. Beregovoj, A. M. Modeling of the thermal resistance of cladding for estimating heat loss of a building and its microclimate building / A.M. Beregovoj, M.A. Derina // Modeling and mechanics of structures. – 2016. – No. 3. – P. 16.
7. Beregovoj, A. M. Energy efficiency of low-rise buildings / A.M. Beregovoj, M.A. Derina, A.D. Pilgin // Bulletin of PGUAS: construction, science and education. – 2016. – No. 1. – P. 20.



# ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

## ENGINEERING SYSTEMS

УДК 697.922

*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

**Горшков Валентин Иванович,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Теплогасоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: val-gorshkov@yandex.ru

**Мирошниченко Денис Сергеевич,**  
аспирант  
E-mail: tgv@pguas.ru

*Михайловская военная артиллерийская академия*

Россия, 195009, г. Санкт-Петербург,  
ул. Комсомола, д. 22

**Мельников Евгений Александрович,**  
адъюнкт  
E-mail: val-gorshkov@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

**Gorshkov Valentin Ivanovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Heat, gas supply  
and ventilation»  
E-mail: val-gorshkov@yandex.ru

**Miroshnichenko Denis Sergeevich,**  
Postgraduate  
E-mail: tgv@pguas.ru  
*Mikhailovskaya artillery Military Academy*

Russia, 195009, St. Petersburg,  
22, Komsomol St.

**Melnikov Evgenij Aleksandrovich,**  
Associate  
E-mail: val-gorshkov@yandex.ru

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ УПРАВЛЯЕМЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ ВЕТВЯЩИХСЯ ПРОЦЕССОВ

В.И. Горшков, Д.С. Мирошниченко, Е.А. Мельников

Рассмотрен метод оценки надежности систем вентиляции на основе управляемых стохастических ветвящихся процессов. Исследуемая вентиляционная система представлена как совокупность четырех основных подсистем-модулей, взаимодействующих в процессе функционирования. Определены показатели безотказности функционирования рассматриваемых модулей: вероятность безотказной работы, среднее время наработки на отказ и показатель долговечности – технический ресурс. В рамках исследований на основе полученной математической модели был разработан программно-методический комплекс.

*Ключевые слова: математическое моделирование, прогнозирование отказов, повышение надежности, система вентиляции, управляемые стохастические ветвящиеся процессы, стохастическая ветвящаяся модель*

# MATHEMATICAL MODELING OF RELIABILITY OF VENTILATION SYSTEMS WITH USING OF CONTROLLED STOCHASTIC BRANCHING PROCESSES

V.I. Gorshkov, D.S. Miroshnichenko, E.A. Melnikov

The method for assessing the reliability of ventilation systems based on managed stochastic branching processes is discussed. The ventilation system is represented as a set of four major subsystems-modules that interact in the operation. Indicators of reliability operation considered modules: probability of uptime, mean time between failures (MTBF) and the indicator of durability-technical resource are defined. The research, based on a mathematical model is developed by the program-methodical complex.

*Keywords: mathematical modeling, failure forecasting, improving the reliability of the ventilation system driven by stochastic branching processes, stochastic branching model*

Методы оценки надежности на этапах проектирования и испытаний можно разделить на классические и байесовские. Байесовский анализ отличается от классической статистики предположением, что параметры распределений являются не постоянными, а случайными величинами. На этапе проектирования технических систем в качестве математических моделей повышения надежности используются: модифицированная степенная модель и модифицированная байесовская модель IBM – Рознера. Основные методы оценки надежности изложены в ГОСТ Р 51901.16-2017 [1]. Вместе с тем, на наш взгляд, применение более совершенных математических аппаратов может рассматриваться как альтернатива установленным стандартам методик.

В рамках данной статьи рассмотрен метод оценки надежности на основе управляемых стохастических ветвящихся процессов. Практическая значимость работы состоит в разработке научно обоснованной методики прогнозирования безотказности систем вентиляции на стадии проектирования, которая позволяет комплексно оценивать и прогнозировать изменение безотказности ее элементов на ранних этапах и, следовательно, уменьшить время на поиск и устранение отказов при отработке и наладке.

С применением декомпозиционного подхода и морфологического анализа исследуемая вентиляционная система представлена как совокупность четырех основных подсистем-модулей, взаимодействующих в процессе функционирования. К ним относятся: приточная вентиляция с механическим побуждением движения воздуха, вытяжная вентиляция с механическим побуждением движения воздуха, кондиционирование, приточно-вытяжная система механической вентиляции с рекуперацией.

Определены подсистемы I, II и III иерархического уровня, в которых подсистемы состоят из элементов, узлов и механизмов систем вентиляции, (сборочные единицы). Составлена расчетная схема типовой системы механической вентиляции.

Для описания деградиционных процессов, протекающих в модулях систем механической вентиляции, выбран экспоненциальный закон распределения, что позволило для оценки и прогнозирования безотказности предложить оригинальный математический аппарат высокого уровня – Марковский анализ [2]. Определены показатели безотказности функционирования рассматриваемых модулей: вероятность безотказной работы (ВБР)  $P_{б,р}$ , среднее время наработки на отказ  $T_{ср}$  и показатель долговечности – технический ресурс  $T_{тр}^*$ .

При расчете отказов сборочных единиц модулей типовой системы механической вентиляции введем следующие допущения: а) каждый элемент сборочной единицы модуля и модуль в целом могут находиться в одном из двух возможных состояний – работоспособном или неработоспособном, б) отказы элементов модуля – события независимые, случайные.

При принятых допущениях схема расчета надежности сборочной единицы и модуля представляет собой группу последовательно соединенных элементов, подвергающихся простейшему потоку отказов. По суммарной интенсивности отказов сборочных единиц определяется расчетное значение показателя средней наработки на отказ

исходного варианта схемно-конструктивного построения модуля системы механической вентиляции.

Интенсивность отказов  $i$ -го модуля системы механической вентиляции (СМВ) определяется выражением

$$\lambda_i^{\Sigma} = \sum \lambda_j^{\Sigma}, \quad (1)$$

где  $\lambda_j^{\Sigma}$  – суммарная интенсивность отказов  $j$ -й сборочной единицы.

Для модуля 1 расчетной схемы, показанной на рис. 1, интенсивность отказа складывается из суммы интенсивности отказов его сборочных единиц, рассчитываемой по зависимости (2)

$$\lambda_{\text{м1}}^{\Sigma} = \lambda_{1.1} + \lambda_{1.2} + \lambda_{1.3} + \lambda_{1.4} + \lambda_{1.5}. \quad (2)$$

В свою очередь,

$$\lambda_{1.1} = \frac{1}{T_{1.1}}, \quad (3)$$

где  $T_{1.1}$  – среднее время наработки на отказ сборочной единицы.

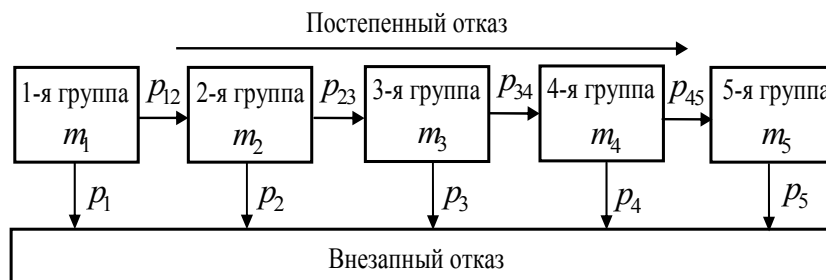


Рис. 1. Расчетная схема прогнозирования постепенных и внезапных отказов вентиляционной системы:

$m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$  – количество сборочных единиц элементов СМВ в группах деградации

По зависимостям (2) и (3) рассчитываются интенсивности отказов для других сборочных единиц модуля 1. Аналогично определяются интенсивности отказов сборочных единиц остальных модулей.

Предлагаемый подход позволяет идентифицировать и классифицировать по общим признакам сборочные единицы модулей вентиляционной системы и провести расчет интенсивности отказов их модулей и СМВ в целом. В дальнейшем это позволит уточнить и спланировать сроки проведения работ по техническому обслуживанию (ТО) и плановому ремонту (ПР) при эксплуатации типовой СМВ.

Для прогнозирования надежности вентиляционных систем предложены стохастические ветвящиеся процессы, которые определяются как Марковские процессы со счетным числом состояний, переходные вероятности которых удовлетворяют дополнительным условиям ветвления [3].

Предложено в терминах стохастических ветвящихся процессов под «частицами» понимать сборочные единицы вентиляционных систем. «Гибель» сборочной единицы трактуется как ее внезапный отказ, «превращение» сборочной единицы трактуем как изменение ее технических параметров во времени в худшую сторону (постепенный отказ) [5]. Типы «частиц» – это сборочные единицы вентиляционных систем с определенными значениями технических параметров, объединенные в группы деградации. Внутри группы деградации сборочные единицы рассматриваются как однотипные. Стохастический ветвящийся процесс является многомерным, его состояние описывается случайным вектором  $\mu = (\mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_n(t))$ . Размерность случайного векто-

ра определяется числом групп деградации. Ограничимся рассмотрением пятимерных ветвящихся процессов – стохастическая система состоит из 5 типов «частиц» (групп деградации сборочных единиц).

Моделирование постепенных отказов элементов системы механической вентиляции (сборочных единиц): за время  $\Delta t$  ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) с вероятностью  $p_{i,i+1} = m_i \alpha_{i,i+1} \Delta t$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ), где  $\alpha_{i,i+1}$  – интенсивность переходов, элемент  $i$ -й группы переходит в  $i + 1$ -ю группу за счет деградации его параметров. Моделирование внезапных отказов элементов СМВ: за время  $\Delta t$  ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) с вероятностью  $p_i = m_i \beta_i \Delta t$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ), где  $\beta_i$  – интенсивность отказов, элемент  $i$ -й группы «гибнет». Вентиляционная система за время  $\Delta t$  переходит в одно из девяти состояний или остается без изменения. Затем процесс повторяется и носит характер ветвления.

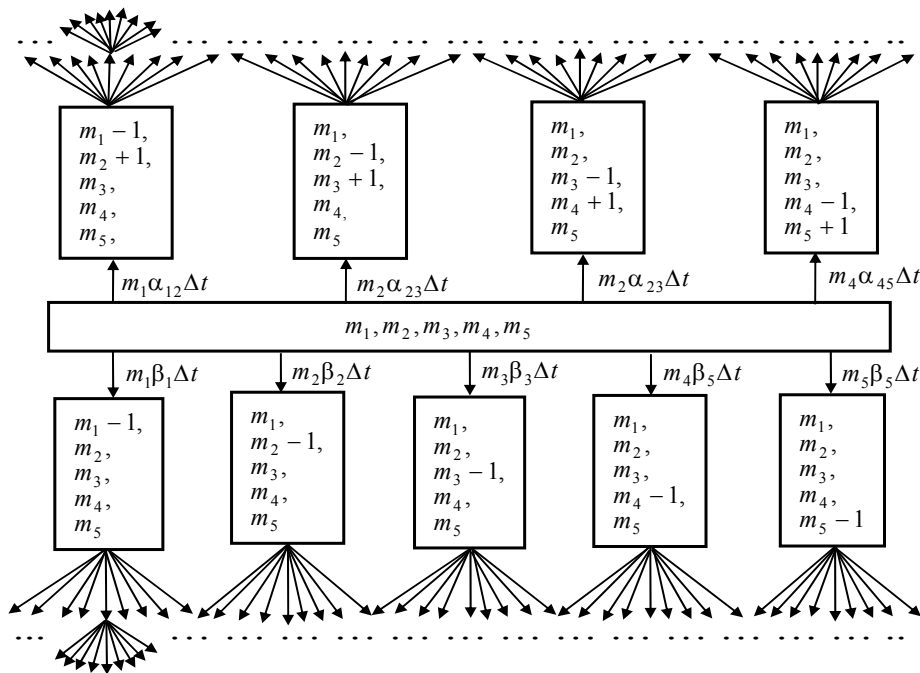


Рис. 2. Структура вероятностных переходов стохастического ветвящегося процесса прогнозирования отказов вентиляционной системы:  
 $\alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{34}, \alpha_{45}$  – постепенный отказ;  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$  – внезапный отказ

На основе структуры вероятностных переходов получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{m_1, m_2, \dots, m_4}(t)}{dt} &= \frac{dP(t; \mu_1(t) = m_1, \mu_2(t) = m_2, \dots, \mu_5(t) = m_5)}{dt} = \\ &= \sum_{i=1}^5 (m_i + 1) \beta_i P(t; \mu_1(t) = m_1, \dots, \mu_i(t) = m_i + 1, \dots, \mu_5(t) = m_5) + (m_i + 1) \times \\ &\times \alpha_{i,i+1} P(t; \mu_1(t) = m_1, \dots, \mu_i(t) = m_i + 1, \mu_{i+1}(t) = m_{i+1} - 1, \dots, \mu_5(t) = m_5) - \\ &- m_i (\alpha_{i,i+1} + \beta_i) P(t; \mu_1(t) = m_1, \mu_2(t) = m_2, \dots, \mu_5(t) = m_5), \end{aligned} \quad (4)$$

$m_1 = 0, 1, 2, \dots, m, \quad m_2 = 0, 1, 2, \dots, m, \quad \dots \quad m_5 = 0, 1, 2, \dots, m,$

где  $P_{m_1, m_2, \dots, m_4}(t)$  – вероятность того, что в момент времени  $t$  в 1-й группе находятся  $m_1$  элементов, во 2-й группе –  $m_2$ , ..., в 5-й группе –  $m_5$  ...

Начальные условия для системы обыкновенных уравнений (в момент времени  $t = 0$  в 1-й группе находятся  $m_1^0$  элементов, ..., в 5-й группе –  $m_5^0$ ):

$$P_{m_1, m_2, \dots, m_5}(0) = \begin{cases} 1, & \text{если } m_1 = m_1^0, m_2 = m_2^0, \dots, m_5 = m_5^0, \\ 0, & \text{если } m_1 \neq m_1^0, m_2 \neq m_2^0, \dots, m_5 \neq m_5^0. \end{cases} \quad (5)$$

Для решения системы дифференциальных уравнений (4) с начальным условием (5) использовался аппарат производящих функций [2]. Получено выражение для вычисления производящей функции:

$$F(t, x_1, x_2, \dots, x_5) = \prod_{i=1}^5 (N_i + \sum_{j=1}^5 M_{ij} x_j)^{m_i^0}, \quad (6)$$

где  $N_i$ ,  $M_{ij}$  соответственно компоненты вектора  $\mathbf{N}$  и матрицы  $\mathbf{M}$ , которые определяются следующим образом:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^{-1} \cdot (\mathbf{D} - \mathbf{I}) \cdot \mathbf{B}, \quad \mathbf{M} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{A}.$$

Здесь  $\mathbf{I}$  – единичная матрица,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -(\beta_1 + \alpha_{12}) & \alpha_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(\beta_2 + \alpha_{23}) & \alpha_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(\beta_3 + \alpha_{34}) & \alpha_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(\beta_4 + \alpha_{45}) & \alpha_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_5 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \exp(-(\beta_1 + \alpha_{12})t) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-(\beta_2 + \alpha_{23})t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-(\beta_3 + \alpha_{34})t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \exp(-(\beta_4 + \alpha_{45})t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \exp(-\beta_5 t) \end{pmatrix}.$$

Используя производящую функцию, были получены выражения для определения математического ожидания  $M_k(t)$  и вероятности  $P_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t)$ :

$$M_k(t) = \prod_{i=1}^5 (N_i + \sum_{j=1}^5 M_{ij})^{m_i^0} \sum_{i=1}^5 m_i^0 (N_i + \sum_{j=1}^5 M_{ij})^{-1} M_{ik}, \quad k = 1, 2, \dots, 5. \quad (7)$$

$$P_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t) = \frac{m_1^0!}{m_1! m_2! \dots m_5! (m_1^0 - m_1 - \dots - m_5)} N_1^{m_1^0 - m_1 - \dots - m_5} M_{11}^{m_1} M_{12}^{m_2} \dots M_{15}^{m_5}. \quad (8)$$

Получены выражения для определения вероятности безотказной работы  $P(t)$ , среднего времени безотказной работы  $T$  (средняя наработка до отказа), интенсивности отказа  $\lambda(t)$ :

$$P(t) = \sum_{m_1=0}^{m_1^0} \sum_{m_2=0}^{m_2^0} \dots \sum_{m_5=0}^{m_5^0} P_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t), \quad T = \sum_{m_1=0}^{m_1^0} \sum_{m_2=0}^{m_2^0} \dots \sum_{m_5=0}^{m_5^0} \int_0^\infty P_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t) dt, \quad (9)$$

$$\lambda(t) = P(t)^{-1} \sum_{m_1=0}^{m_1^0} \sum_{m_2=0}^{m_2^0} \dots \sum_{m_5=0}^{m_5^0} P'_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t), \quad m_1 + m_2 + \dots + m_5 = m_1^0.$$

Разработана методика определения интенсивностей переходов  $\alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{34}, \alpha_{45}, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$  стохастического ветвящегося процесса на этапе проектирования вентиляционной системы по паспортным значениям интенсивностей отказов сборочных единиц. Из сборочных единиц по значениям интенсивности отказов  $\lambda_{\alpha j}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) составляется пять групп:  $\lambda_{\alpha j}^{1 \text{ гр.}}$  ( $j = 1, 2, \dots, r_1$ ),  $\lambda_{\alpha j}^{2 \text{ гр.}}$  ( $j = 1, 2, \dots, r_2$ ),  $\lambda_{\alpha j}^{3 \text{ гр.}}$  ( $j = 1, 2, \dots, r_3$ ),  $\lambda_{\alpha j}^{4 \text{ гр.}}$  ( $j = 1, 2, \dots, r_4$ ),  $\lambda_{\alpha j}^{5 \text{ гр.}}$  ( $j = 1, 2, \dots, r_5$ ), где  $r_1, r_2, \dots, r_5$  – количество сборочных единиц соответственно в группах 1-5. На основе выражений для математического ожидания  $M_k(t)$  (7) получена система уравнений для определения интенсивностей переходов:

$$\begin{cases} M_1(\tau, \alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{34}, \alpha_{45}, k_1\beta_5, k_2\beta_5, k_3\beta_5, k_4\beta_5, \beta_5) = r_1, \\ M_2(\tau, \alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{34}, \alpha_{45}, k_1\beta_5, k_2\beta_5, k_3\beta_5, k_4\beta_5, \beta_5) = r_2, \\ M_3(\tau, \alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{34}, \alpha_{45}, k_1\beta_5, k_2\beta_5, k_3\beta_5, k_4\beta_5, \beta_5) = r_3, \\ M_4(\tau, \alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{34}, \alpha_{45}, k_1\beta_5, k_2\beta_5, k_3\beta_5, k_4\beta_5, \beta_5) = r_4, \\ M_5(\tau, \alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{34}, \alpha_{45}, k_1\beta_5, k_2\beta_5, k_3\beta_5, k_4\beta_5, \beta_5) = r_5 - 1. \end{cases} \quad (10)$$

где  $k_1 = \frac{1}{r_1} \sum_{j=1}^{r_1} \lambda_{\alpha j}^{1 \text{ гр.}}$ ,  $k_2 = \frac{1}{r_2} \sum_{j=1}^{r_2} \lambda_{\alpha j}^{2 \text{ гр.}}$ ,  $k_3 = \frac{1}{r_3} \sum_{j=1}^{r_3} \lambda_{\alpha j}^{3 \text{ гр.}}$ ,  $k_4 = \frac{1}{r_4} \sum_{j=1}^{r_4} \lambda_{\alpha j}^{4 \text{ гр.}}$ ,  
 $\frac{1}{r_5} \sum_{j=1}^{r_5} \lambda_{\alpha j}^{5 \text{ гр.}}$ ,  $\frac{1}{r_5} \sum_{j=1}^{r_5} \lambda_{\alpha j}^{5 \text{ гр.}}$ ,  $\frac{1}{r_5} \sum_{j=1}^{r_5} \lambda_{\alpha j}^{5 \text{ гр.}}$ ,  $\frac{1}{r_5} \sum_{j=1}^{r_5} \lambda_{\alpha j}^{5 \text{ гр.}}$ .

Система уравнений (10) является нелинейной и для ее решения использовался метод Ньютона.

Разработана методика прогнозирования отказов вентиляционных систем с учетом замены и ремонта сборочных единиц. В методике техническое обслуживание вентиляционных систем моделируется путем введения дополнительных вероятностных переходов из групп с большой деградацией сборочных единиц в группы с более низкой деградацией (рис. 3). Постепенный отказ сборочных единиц, ремонт, замена в расчетной схеме моделируются за время  $\Delta t$  ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) с вероятностью  $p_{i,j} = m_i \tilde{\alpha}_{i,j} \Delta t$  ( $i, j = 1, 2, \dots, 5$ ), сборочная единица  $i$ -й группы переходит в  $j$ -ю группу за счет деградации ее параметров ( $i < j$ ) или ремонта (замены на новый) ( $i > j$ ).

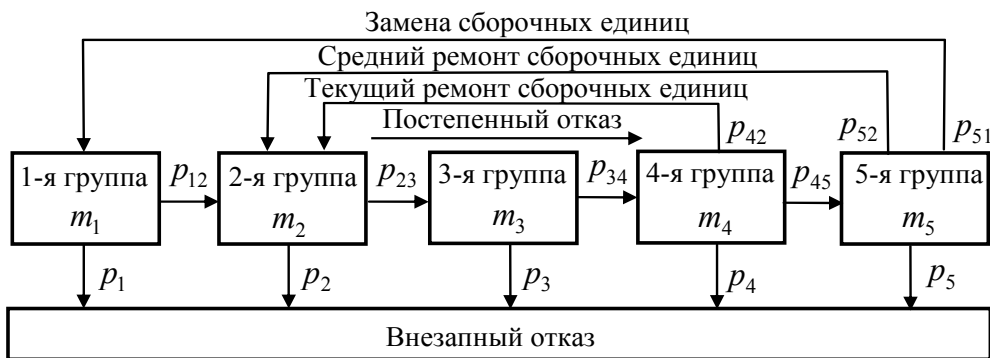


Рис. 3. Расчетная схема прогнозирования постепенных и внезапных отказов вентиляционной системы после технического обслуживания

Внезапный отказ моделируется за время  $\Delta t$  ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) с вероятностью  $p_i = m_i \tilde{\beta}_i \Delta t$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ), сборочная единица  $i$ -й группы «гибнет». На основе расчетной схемы получена структура вероятностных переходов стохастического ветвящегося процесса технического обслуживания, из которого получены система обыкновенных дифференциальных уравнений и начальные условия, аналогичные (4), (5). Методом

аппарата производящих функций система дифференциальных уравнений сведена к уравнению в частных производных первого порядка, которое было решено, и получено выражение для определения вероятности  $\tilde{P}_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t)$  (11), аналогичной (8):

$$\tilde{P}_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t) = \frac{m_1^0!}{m_1! m_2! \dots m_5! (m_1^0 - m_1 - \dots - m_5)} \tilde{N}_1^{m_1^0 - m_1 - \dots - m_5} \tilde{M}_{11}^{m_1} \tilde{M}_{12}^{m_2} \dots \tilde{M}_{15}^{m_5}, \quad (11)$$

где  $\tilde{N}_i$ ,  $\tilde{M}_{ij}$  соответственно компоненты вектора  $\tilde{N}$  и матрицы  $\tilde{M}$ , которые определяются следующим образом:  $\tilde{N} = \tilde{A}^{-1} \cdot (\tilde{D} - \mathbf{I}) \cdot \mathbf{B}$ ,  $\tilde{M} = \tilde{A}^{-1} \cdot \tilde{D} \cdot \tilde{A}$ .

Здесь  $\mathbf{I}$  – единичная матрица,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} -(\tilde{\beta}_1 + \tilde{\alpha}_{12}) & \tilde{\alpha}_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(\tilde{\beta}_2 + \tilde{\alpha}_{23}) & \tilde{\alpha}_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(\tilde{\beta}_3 + \tilde{\alpha}_{34}) & \tilde{\alpha}_{34} & 0 \\ 0 & \tilde{\alpha}_{42} & 0 & -(\tilde{\beta}_4 + \tilde{\alpha}_{45}) & \tilde{\alpha}_{45} \\ \tilde{\alpha}_{51} & \tilde{\alpha}_{52} & 0 & 0 & -\tilde{\beta}_5 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \end{pmatrix},$$

$$\tilde{D} = \begin{pmatrix} \exp(-(\tilde{\beta}_1 + \tilde{\alpha}_{12})t) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-(\tilde{\beta}_2 + \tilde{\alpha}_{23})t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-(\tilde{\beta}_3 + \tilde{\alpha}_{34})t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \exp(-(\tilde{\beta}_4 + \tilde{\alpha}_{45})t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \exp(-\tilde{\beta}_5 t) \end{pmatrix}.$$

Разработана методика определения интенсивностей переходов  $\tilde{\alpha}_{12}, \tilde{\alpha}_{23}, \tilde{\alpha}_{34}, \tilde{\alpha}_{45}$  (постепенный отказ);  $\tilde{\beta}_1, \tilde{\beta}_2, \tilde{\beta}_3, \tilde{\beta}_4, \tilde{\beta}_5$  (внезапный отказ);  $\tilde{\alpha}_{42}, \tilde{\alpha}_{52}, \tilde{\alpha}_{51}$  (замена или ремонт сборочных единиц СМВ). Она аналогична (10) [2].

Вероятность безотказной работы вентиляционной системы при замене или ремонте сборочных единиц определяется как

$$\tilde{P}(t) = \sum_{m_1=0}^{m_1^0} \sum_{m_2=0}^{m_1^0} \dots \sum_{m_5=0}^{m_1^0} \tilde{P}_{m_1, m_2, \dots, m_5}(t), \quad m_1 + m_2 + \dots + m_5 = m_1^0. \quad (12)$$

Дополнительный ресурс вентиляционной системы после технического обслуживания – это скачок вероятностей безотказной работы  $\Delta = \tilde{P}(\tau_{\text{то}}) - P(\tau_{\text{то}})$ , где  $P(\tau_{\text{то}})$  – вероятность безотказной работы вентиляционной системы до замены или ремонта сборочных единиц,  $\tilde{P}(\tau_{\text{то}})$  – вероятность безотказной работы вентиляционной системы после замены или ремонта сборочных единиц,  $\tau_{\text{то}}$  – время технического обслуживания вентиляционной системы.

Основой построения существующих в настоящее время методик прогнозирования дополнительного ресурса систем после технического обслуживания являются Марковские процессы (неветвящиеся). Ограниченность их использования заключается в том, что они не учитывают предысторию состояния параметров сборочных единиц до технического обслуживания (процесс без «памяти»). В работе предложены многомерные стохастические ветвящиеся процессы, которые позволяют успешно решать эту задачу за счет распределения во времени технических параметров сборочных единиц по группам деградации. Группы деградации являются «памятью» процесса системы механической вентиляции, как до технического обслуживания, так и после него.

В рамках исследований на основе полученной математической модели был разработан программно-методический комплекс (ПМК) [3]. ПМК включает в себя программный продукт, структура которого смоделирована в среде MathCAD 14; ПМК прошел государственную экспертизу, получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613937 от 31.03.2015 г.

В информационном блоке производится построение графиков зависимости математических ожиданий количества сборочных единиц в группах деградации от времени эксплуатации модулей с ручным приводом газовой заслонки и вероятности их безотказной работы для вентиляционной системы в целом.

Информационный блок представляет на экран или листинг графическую или табличную информацию, полученную по результатам расчетов (рис. 4).

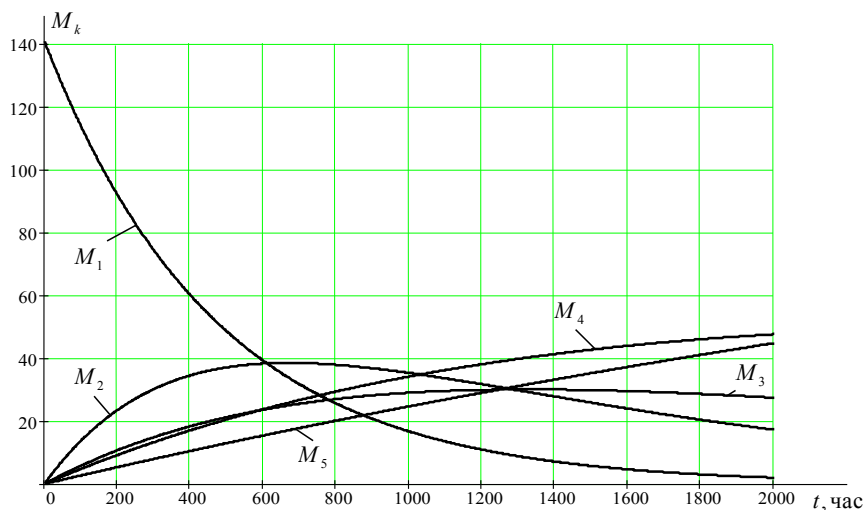


Рис. 4. Зависимость математических ожиданий  $M$  количества сборочных единиц для СМВ в группах деградации от времени эксплуатации вентиляционной системы  $t$

Выводы:

1. Разработан научно-методический аппарат прогнозирования безотказности и долговечности систем механической вентиляции на основе теории управляемых стохастических ветвящихся процессов, который может быть рекомендован к применению при расчетах вероятности безотказной работы и среднего времени наработки на отказ сборочных единиц модулей СМВ и системы в целом на стадии проекта.

2. Разработан программно-методический комплекс прогнозирования безотказности и долговечности модулей типовой системы механической вентиляции. ПМК включает информационный блок, функциональный блок и блок представления информации.

3. Результаты работы апробированы при разработке реальных проектов в г. Пензе и показали высокую работоспособность предложенного метода математического моделирования надежности систем вентиляции.

#### Список литературы

1. ГОСТ Р 51901.16–2017. Менеджмент риска. Повышение надежности. Статистические критерии и методы оценки.
2. ГОСТ 27.310–95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.
3. Прогнозирование отказов вентиляционных систем / В.И. Горшков, Д.С. Мирошниченко, А.А. Святкина, О.В. Тараканов // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №2 (16). – С. 125–131.
4. Горшков, В.И. Математическое моделирование показателей безотказности вентиляционных систем с учетом деградации параметров модулей / В.И. Горшков, Д.С. Мирошниченко, А.А. Святкина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 193–202.
5. Горшков, В.И. Прогнозирование безотказности вентиляционных систем на взрывопожароопасных производствах модулей / В.И. Горшков, Д.С. Мирошниченко, А.А. Святкина // Вопросы оборонной техники. – 2013. – Вып. 3–4. – С. 104–109.



## References

1. GOST R 51901.16–2017. Risk management. Increase reliability. Statistical criteria and evaluation methods.
2. GOST 27.310–95. Reliability in technology. Analysis of types, consequences and criticality of failures. Fundamentals.
3. Prediction of ventilation system failures / V.I. Gorshkov, D.S. Miroshnichenko, A.A. Svyatkina, O.V. Tarakanov // Regional architecture and engineering. – 2013. – No. 2 (16). – P. 125–131.
4. Gorshkov, V.I. Mathematical modeling of ventilation systems reliability indices taking into account module parameters degradation / V.I. Gorshkov, D.S. Miroshnichenko, A.A. Svyatkina // Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Physical and mathematical Sciences. – 2013. – No. 4 (28). – P. 193–202.
5. Gorshkov, V.I. Forecasting reliability of ventilation systems on explosion and fire hazardous production of modules / V.I. Gorshkov, D.S. Miroshnichenko, A.A. Svyatkina // Questions of defense technology. – 2013. – Vol. 3–4. – P. 104–109.

УДК 621.6.036

*Саратовский государственный  
технический университет  
имени Гагарина Ю.А.*

Россия, 410054, г. Саратов,  
ул. Политехническая, 77,  
тел.: (8452)99-88-11; факс: (8452)99-88-10

**Рулев Александр Владимирович**,  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Теплогазоснабжение,  
вентиляция, водообеспечение и  
прикладная гидрогазодинамика»  
E-mail:nautech@inbox.ru

**Усачева Елена Юрьевна**,  
аспирант кафедры «Теплогазоснабжение,  
вентиляция, водообеспечение  
и прикладная гидрогазодинамика»

*Yuri Gagarin State Technical University of  
Saratov*

Russia, 410054, Saratov,  
77, Polytechnicheskaya St.,  
tel.: (8452) 99-88-11; fax: (8452) 99-88-10

**Rulev Alexandr Vladimirovich**,  
Doctor of Sciences, Assistant Professor,  
Professor Head of Department «Heat and  
Gas Supply, Ventilation, Water Supply and  
Applied Hydroaerodynamics»  
E-mail:nautech@inbox.ru

**Usacheva Elena Yurevna**,  
Postgraduate student of the department «Heat  
and Gas Supply, Ventilation, Water Supply  
and Applied Hydroaerodynamics»

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ ПО ТЕПЛОВОМУ РАСЧЕТУ КОНДЕНСАТОРОВ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ В КАЧЕСТВЕ РАБОЧИХ АГЕНТОВ ЗЕОТРОПНЫЕ СМЕСИ

А.В. Рулев, Е.Ю. Усачева

Разработаны методические положения по тепловому расчету конденсаторов тепловых насосов, работающих на зеотропных смесях. Предложенные положения учитывают изменения интенсивности теплообмена и температурных условий в зависимости от непрерывно изменяющегося состава и режимов течения парожидкостной смеси.

*Ключевые слова: методические положения, тепловой расчет, конденсаторы, тепловые насосы, рабочие агенты, зеотропные смеси*

## DEVELOPMENT OF METHODOLOGICAL POSITIONS ACCORDING TO THERMAL CALCULATION OF HEAT PUMPS CONDENSERS UTILIZING AS WORKING AGENTS ZEOTROPE BLENDS

A.V. Rulev, E.Yu. Usacheva

Methods for thermal calculation of condensers of heat pumps operating in isotropic mixtures are developed. The proposed methods take into account changes of heat transfer rate and temperature conditions, depending on the continuously changing composition and flow regimes of liquid-vapor mixture.

*Keywords: methodological guidelines, thermal design, condensers, heat pumps, working agents, zeotrope blends*

### Введение

При использовании в системах теплогазоснабжения и вентиляции (ТГС и В) возобновляемых тепловых источников, имеющих ограниченную объемную тепловую емкость, например воздуха, температура которого при охлаждении и нагревании в тепловом насосе существенно изменяется, использование в качестве рабочего агента веществ с постоянными температурами кипения и конденсации характеризуется снижением энергетической эффективности его применения [1-3]. В то же время реализация цикла с переменными температурами как теплоносителя, так и рабочих

агентов позволяет в этом случае повысить энергетическую эффективность использования тепловых насосов [4, 5].

Рабочие вещества, используемые в качестве компонентов зеоетропной смеси в тепловых насосах, не должны разрушать озоновый слой атмосферы [6] и оказывать негативное влияние на изменение климата [7], должны быть доступными для применения, экономичными, не оказывать вредного влияния на организм человека.

По результатам проведенного анализа установлено, что в наибольшей степени этим требованиям соответствуют зеоетропные смеси, состоящие из R22/R142b, R32/R134a, R32/R152a или предельных углеводородов R290/600 (пропана и бутана), R600a/R601 (изо-бутана и н-пентана), R290/ R601a (пропана и изо-пентана), R600a/R601b (изо-бутана и нью-пентана) [5, 8].

Одним из наиболее важных при разработке и реализации тепловых насосов с переменными температурами как теплоносителя, так и рабочих агентов и не решенным в настоящее время является вопрос теплового расчета конденсаторов и испарителей тепловых насосов, использующих в качестве рабочих агентов зеоетропные смеси. В данной работе приводятся разработанные методические положения по тепловому расчету конденсаторов, работающих на зеоетропных смесях.

### Постановка задачи теплообмена при конденсации зеоетропной смеси в горизонтальной трубе

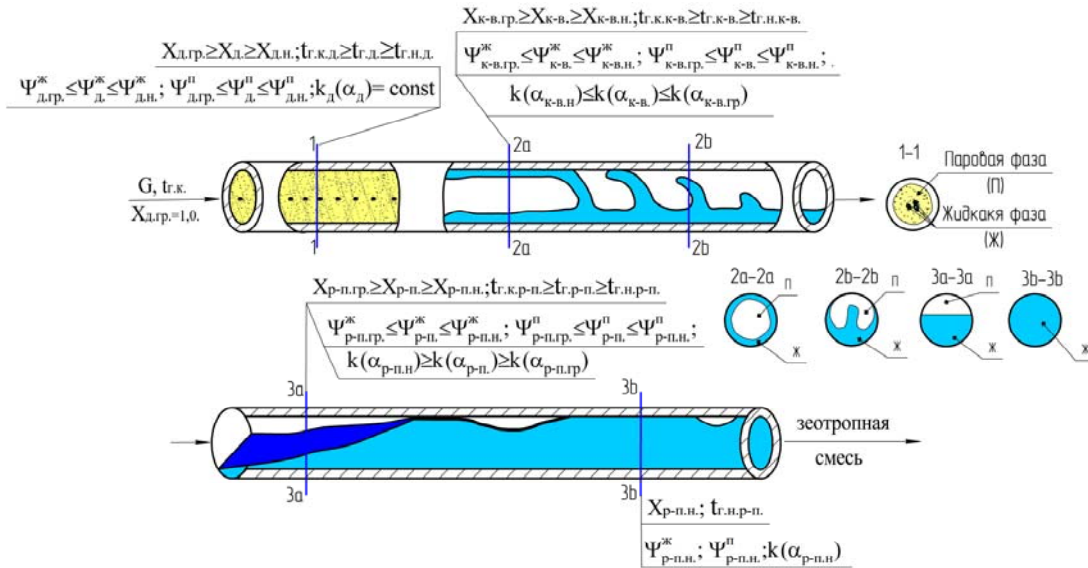
Для конденсации зеоетропных смесей в теплонасосной технике целесообразно использовать горизонтальные или слабонаклонные трубы либо пучки параллельно соединенных труб [1, 4, 5, 8], в которые, согласно [9] и заявке №2017121737 с приоритетом от 20.06.2017, подается насыщенная паровая фаза зеоетропной смеси оптимального состава, при котором достигается минимальный температурный напор.

Постановку задачи теплообмена при конденсации зеоетропной смеси в горизонтальной трубе можно сформулировать следующим образом.

В теплообменное устройство, выполненное в виде одиночной трубы или пучка прямых горизонтальных труб внутренним диаметром  $d$  (см. рисунок) подается паровая фаза зеоетропной смеси с мольным содержанием низкокипящего компонента  $\psi^n$ , с массовым расходом  $G_r$ . От внутренней поверхности теплообменной трубы отводится тепловой поток постоянной интенсивности  $\alpha_r$ . В процессе полной конденсации степень сухости  $X$  изменяется от  $X_{др} = 1,0$  до  $X_{р-п} = X_{р-п.н.}$ . Снижение степени сухости в конденсаторе приводит к уменьшению скорости парожидкостной смеси и обуславливает переход одного режима течения в другой, которые протекают, согласно [10, 11], в следующей последовательности: 1) дисперсный; 2) кольцеволновой; 3) расслоенно-пробковый. При этом для каждого из указанных режимов течения степень сухости изменяется в следующих диапазонах: дисперсный режим  $X_{д.гр} \geq X_{д} \geq X_{д.н.}$ , где  $X_{д.н.} = X_{к-в.гр}$ ; кольцеволновой режим  $X_{к-в.гр} \geq X_{к-в} \geq X_{к-в.н.}$ , где  $X_{к-в.н.} = X_{р-п.гр}$ ; расслоенно-пробковый режим  $X_{р-п.гр} \geq X_{р-п} \geq X_{р-п.н.}$ .

Зеоетропная смесь, поступающая в конденсатор с мольным содержанием низкокипящего компонента в паровой фазе  $\psi^n$ , полностью конденсируется в интервале температур от  $t_{г.к}$  до  $t_{г.н.}$ . При этом для каждого из указанных режимов течения температура конденсации смеси изменяется в следующих диапазонах: дисперсный режим  $t_{г.к.д} \geq t_{г.д} \geq t_{г.н.д}$ , где  $t_{г.н.д} = t_{г.к.к-в}$ ; кольцеволновой режим  $t_{г.к.к-в} \geq t_{г.к-в} \geq t_{г.н.к-в}$ , где  $t_{г.н.к-в} = t_{г.к.р-п}$ ; расслоенно-пробковый режим  $t_{г.к.р-п} \geq t_{г.р-п} \geq t_{г.н.р-п}$ . Отводимый тепловой поток складывается за счет как конденсации, так и охлаждения смеси в интервале температур ее полной конденсации от  $t_{г.к}$  до  $t_{г.н.}$ .

Коэффициенты теплоемкости и скрытой теплоты парообразования насыщенной паровой фазы зеоетропной смеси в диапазонах существования дисперсного, кольцеволнового, расслоенно-пробкового режимов течения сохраняются постоянными и равными их средним значениям, то есть:  $C_{г.д.ср}$ ,  $C_{г.к-в.ср}$ ,  $C_{г.р-п.ср}$  и  $I_{г.д.ср}$ ,  $I_{г.к-в.ср}$ ,  $I_{г.р-п.ср}$ .



Расчетная схема к математической модели теплового расчета проточного трубного конденсатора, работающего на зееотропной смеси

Изменение режимов течения и содержания низкокипящего компонента в паровой  $\Psi^п$  и жидкой  $\Psi^ж$  фазах парожидкостной зееотропной смеси приводит к изменению величины коэффициента теплоотдачи между внутренней поверхностью теплообменной трубы и зееотропной смесью. При этом для каждого из указанных режимов течения содержание низкокипящего компонента в паровой  $\Psi^п$  и жидкой  $\Psi^ж$  фазах и коэффициент теплопередачи  $k(\alpha)$  изменяются в следующих диапазонах:

- дисперсный режим  $\Psi_{д.гр.}^{ж} \leq \Psi_{д.}^{ж} \leq \Psi_{д.н.}^{ж}$ , где  $\Psi_{д.н.}^{ж} = \Psi_{к-в.гр.}^{ж}$ ;  $\Psi_{д.гр.}^{п} \leq \Psi_{д.}^{п} \leq \Psi_{д.н.}^{п}$ , где  $\Psi_{д.н.}^{п} = \Psi_{к-в.н.}^{п}$ ;  $k_d(\alpha_d) = const$ ;
- кольцеволновой режим  $\Psi_{к-в.гр.}^{ж} \leq \Psi_{к-в.}^{ж} \leq \Psi_{к-в.н.}^{ж}$ , где  $\Psi_{к-в.н.}^{ж} = \Psi_{р-п.гр.}^{ж}$ ;  $\Psi_{к-в.гр.}^{п} \leq \Psi_{к-в.}^{п} \leq \Psi_{к-в.н.}^{п}$ , где  $\Psi_{к-в.н.}^{п} = \Psi_{р-п.гр.}^{п}$ ;  $k_{к-в.гр.}(\alpha_{к-в.гр.}) \geq k_{к-в.}(\alpha_{к-в.}) \geq k_{р-п.гр.}(\alpha_{р-п.гр.})$ ;
- расслоенно-пробковый режим  $\Psi_{р-п.гр.}^{ж} \leq \Psi_{р-п.}^{ж} \leq \Psi_{р-п.н.}^{ж}$ ;  $\Psi_{р-п.гр.}^{п} \leq \Psi_{р-п.}^{п} \leq \Psi_{р-п.н.}^{п}$ ;  $k_{р-п.гр.}(\alpha_{р-п.гр.}) \leq k_{р-п.}(\alpha_{р-п.}) \leq k_{р-п.н.}(\alpha_{р-п.н.})$ .

Площадь поверхности проточного трубного конденсатора  $\sum_{X=X_n}^{X=1} F_X$  при полной

конденсации зееотропной смеси внутри трубы определяется на основе уравнения теплового баланса как сумма площадей поверхности его отдельных участков при дисперсном  $F_{X,д.}$ , кольцеволновом  $F_{X,к-в.}$ , расслоенно-пробковом  $F_{X,р-п.}$  режимах течения по формуле

$$\sum_{X_{д.гр.}=1}^{X=X_{р-п.н.}} F_X = \sum_{X_{д.гр.}=1}^{X=X_{р-п.н.}} (F_{X,д.} + F_{X,к-в.} + F_{X,р-п.}). \quad (1)$$

Площади поверхности отдельных участков  $F_{X,д.} + F_{X,к-в.} + F_{X,р-п.}$  в формуле (1) с конденсацией парожидкостной зееотропной смеси внутри трубы рассчитываются следующим образом:

$$F_{X,д.} = \frac{G_{г.х.д.}}{k_d(\alpha_d)} \cdot \left( r_{г.д.ср} \int_{t_{г.н.д.}}^{t_{г.к.д.}} \frac{dX_{г.д.}}{t_{г.д.} - t_{г.д.}} dt_{г.д.} + c_{г.д.ср} \int_{t_{г.н.д.}}^{t_{г.к.д.}} \frac{dt_{г.д.}}{t_{г.д.} - t_{г.д.}} dt_{г.д.} \right); \quad (2)$$

$$F_{X_{г.к-в}} = \frac{G_{г.х.к-в}}{k_{к-в}(\alpha_{к-в})} \cdot \left( r_{г.к-в.ср} \int_{t_{г.н.к-в}}^{t_{г.к.к-в}} \frac{dX_{к-в}/dt_{г.к-в}}{t_{т.к-в} - t_{г.к-в}} dt_{г.к-в} + c_{г.к-в.ср} \int_{t_{г.н.к-в}}^{t_{г.к.к-в}} \frac{dt_{г.к-в}}{t_{т.к-в} - t_{г.к-в}} dt_{г.к-в} \right); \quad (3)$$

$$F_{X_{г.р-п}} = \frac{G_{г.х.р-п}}{k_{р-п}(\alpha_{р-п})} \cdot \left( r_{г.р-п.ср} \int_{t_{г.н.р-п}}^{t_{г.к.р-п}} \frac{dX_{р-п}/dt_{г.р-п}}{t_{т.р-п} - t_{г.р-п}} dt_{г.р-п} + c_{г.р-п.ср} \int_{t_{г.н.р-п}}^{t_{г.к.р-п}} \frac{dt_{г.р-п}}{t_{т.р-п} - t_{г.р-п}} dt_{г.р-п} \right), \quad (4)$$

где  $G_{г.х.д}$ ,  $G_{г.х.к-в}$ ,  $G_{г.х.р-п}$  – соответственно, количества газа, конденсируемого на участках с дисперсным, кольцеволновым и расслоенно-пробковым режимами течения в течение одного часа, кг/ч;  $k_d(\alpha_d)$ ,  $k_{к-в}(\alpha_{к-в})$ ,  $k_{р-п}(\alpha_{р-п})$  – соответственно, коэффициенты теплопередачи как функции от коэффициентов теплоотдачи, характерные для дисперсного, кольцеволнового и расслоенно-пробкового режимов течения, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_{т.д}$ ,  $t_{т.к-в}$ ,  $t_{т.р-п}$  – соответственно, температура теплоносителя на участках с дисперсным, кольцеволновым и расслоенно-пробковым режимами течения, °С;  $t_f$  – температура парожидкостной зеотропной смеси, полностью конденсируемой в интервале температур от  $t_{г.н}$  до  $t_{г.к}$ , определяемых согласно [4, 9], °С;  $t_{г.н.д}$ ,  $t_{г.н.к-в}$ ,  $t_{г.н.р-п}$ ,  $t_{г.к.д}$ ,  $t_{г.к.к-в}$ ,  $t_{г.к.р-п}$  – начальные и конечные температуры конденсируемой парожидкостной зеотропной смеси на участках, соответственно, с дисперсным, кольцеволновым и расслоенно-пробковым режимами течения в проточном трубном конденсаторе при соответствующем паросодержании  $X$ , °С;  $r_{г.д.ср}$ ,  $r_{г.к-в.ср}$ ,  $r_{г.р-п.ср}$ ,  $c_{г.д.ср}$ ,  $c_{г.к-в.ср}$ ,  $c_{г.р-п.ср}$  – средние значения скрытой теплоты парообразования и удельной теплоемкости зеотропной смеси в интервалах температур ее конденсации, соответственно на участках с дисперсным, кольцеволновым и расслоенно-пробковым режимами течения, кДж/кг.

Средние значения скрытой теплоты парообразования и теплоемкости зеотропной смеси принимаются при средних температурах конденсируемой зеотропной смеси  $t_{г.ср.i}$ :  $t_{г.ср.д}$ ,  $t_{г.ср.к-в}$ ,  $t_{г.ср.р-п}$  – на участках, соответственно, с дисперсным, кольцеволновым и расслоенно-пробковым режимами течения в проточном трубном конденсаторе при соответствующих средних значениях степени сухости  $X_{i.ср}$ :  $X_{д.ср}$ ,  $X_{к-в.ср}$ ,  $X_{р-п.ср}$ . Средние значения степени сухости зеотропной смеси определяются согласно [4, 9]:

$$X_{i.ср} = \frac{X_{i.гп} + X_{i.н}}{2} = P_{см} \left( \frac{\psi^{жк}}{P_{см} - 10 \frac{A_{вк}}{C_{вк} + t_{г.ср.i}} \frac{B_{вк}}{C_{вк} + t_{г.ср.i}}} + \frac{1 - \psi^{жк}}{P_{см} - 10 \frac{A_{нк}}{C_{нк} + t_{г.ср.i}} \frac{B_{нк}}{C_{нк} + t_{г.ср.i}}} \right), \quad (5)$$

где  $P_{см}$  – абсолютное давление зеотропной смеси в конденсаторе, Па;  $i$  – номер режима течения: дисперсного  $i=1$ , кольцеволнового  $i=2$ , расслоенно-пробкового  $i=3$ ;  $\psi^{жк}$  – содержание низкокипящего компонента в жидкой фазе на выходе из конденсатора, мол. %;  $A_{вк}$ ,  $B_{вк}$ ,  $C_{вк}$ ,  $A_{нк}$ ,  $B_{нк}$ ,  $C_{нк}$  – средневзвешенные коэффициенты для высококипящей (вк) и низкокипящей (нк) фракций зеотропной смеси в диапазоне температур применения проточного трубного конденсатора, принимаемые согласно [12];  $t_{г.ср.i}$  – средняя температура конденсируемой зеотропной смеси на участках, соответственно:  $i=1$  – с дисперсным,  $i=2$  – кольцеволновым и  $i=3$  – расслоенно-пробковым режимами течения в проточном трубном конденсаторе.

Количество газа, конденсируемого при дисперсном  $G_{г.х.д}$ , кольцеволновом  $G_{г.х.к-в}$  и расслоенно-пробковом  $G_{г.х.р-п}$  режимах течения, определяется в зависимости от граничных значений степени сухости  $X$  и суммарного расхода конденсируемого газа

$X = X_{р-п.н}$   
 $\sum_{X_{д.гп}=1} G_{г.X}$  по формулам:

$$G_{г.X.д} = (X_{д.гп} - X_{к-в.гп}) \cdot \sum_{X_{д.гп}=1}^{X = X_{р-п.н}} G_{г.X}, \quad (6)$$

$$G_{Г,Х,к-в}=(X_{к-в,гр} - X_{р-п,гр}) \cdot \sum_{X_{д,гр}=1}^{X=X_{р-п,н}} G_{Г,Х}; \quad (7)$$

$$G_{Г,Х,р-п}=(X_{р-п,гр} - X_{р-п,н}) \cdot \sum_{X_{д,гр}=1}^{X=X_{р-п,н}} G_{Г,Х}; \quad (8)$$

здесь  $X_{д,гр}$ ,  $X_{к-в,гр}$ ,  $X_{р-п,гр}$  – граничные значения степени сухости парожидкостной зеотропной смеси, при которых наблюдается переход дисперсного в кольцеволновой, кольцеволнового в расслоенно-пробковый режим течения, в долях от единицы;  $X_{р-п,н}$  – начальное значение степени сухости на участке с расслоенно-пробковым режимом течения, в долях от единицы;  $G_{Г,Х}$  – общее количество газа, конденсируемого на всех участках в течение одного часа при изменении степени сухости  $X$  от  $X_{д,гр}=1,0$  до  $X_{р-п}=X_{р-п,н}$ , кг/ч;

Подставляя зависимости (2)-(4) для определения поверхности участков  $F_{Х,д}$ ,  $F_{Х,к-в}$ ,  $F_{Х,р-п}$  для дисперсного, кольцеволнового и расслоенно-пробкового

режимов течения в формулу (1), находим величину суммарной площади  $\sum_{X_{д,гр}=1}^{X=X_{р-п,н}} F_X$

проточного трубного конденсатора.

### Заключение

Методические положения (1)–(8) по тепловому расчету проточных трубных конденсаторов зеотропной смеси с конденсацией паровой фазы внутри трубы позволяют учитывать изменение интенсивности теплообмена и температурных условий в зависимости от непрерывно изменяющихся состава и режимов течения парожидкостной смеси, протекающих в следующей последовательности: дисперсный, кольцеволновой и расслоенно-пробковый.

### Список литературы

1. Рей, Д. Тепловые насосы: пер. с англ. / Д. Рей, Д. Макмайл. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
2. International Simposium on the Industrial Application of Heat Pump, 1982. – №24-26, March. – 189 p.
3. Курицын, Б.Н. Основы энергосбережения в отопительно-вентиляционной технике / Б.Н. Курицын. – Саратов: Изд-во «Надежда», 1996. – 92 с.
4. Shurayts, A.L. Assessing Energy Efficiency of Compression Heat Pumps in Drying Processes when Zeotropic Hydrocarbon Mixtures are Used as Working Agents / A.L. Shurayts, A.V. Rulev, E.Yu. Usacheva // MATEC Web Conf. Volume 73, (2016) 02015 XV International Conference “Topical Problems of Architecture, Civil Engineering, Energy Efficiency and Ecology – 2016”. – P. 1-9. – URL: <http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20167302015>.
5. Букин, В.Г. Холодильные машины, работающие на незеотропных смесях хладагентов / В.Г. Букин, А.Ю. Кузьмин. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2007. – 156 с.
6. Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой: принят Правительством СССР в ноябре 1988 года: вступил в силу с 1 января 1989 года. – URL: <http://www.chillers.ru/bibl/allowances/refrigerants/protokol.php> (дата обращения 03.02.2018 г.)
7. Киотский протокол к рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата: ратифицирован Федеральным законом РФ от 4 ноября 2004 года, N 128-ФЗ: вступил в силу с 16 февраля 2005 года. – URL: [http://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/conventions/kyoto.shtml](http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml) (дата обращения 03.02.2018 г.)

8. Огуречников, Л.А. Конденсация R32/R134a в технологии теплонасосного теплоснабжения / Л.А. Огуречников // Холодильная техника. – 2011. – №2. – С. 46–48.
9. Шурайц, А.Л. Выбор смесей рабочих агентов и их состава в компрессионных тепловых насосах систем теплогазоснабжения и вентиляции для нагрева и охлаждения сред с ограниченной теплоемкостью / А.Л. Шурайц, А.В. Рулев, Е.Ю. Усачева // НЖ строительства и архитектуры. – 2017. – №4(48). – С. 47–57.
10. Теплопередача в двухфазном потоке: пер. с англ. / под ред. Д. Баттерворса и Г. Хьюитта. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.
11. Юсида, Х. Теплообмен при двухфазном течении фреона-12 в горизонтальных трубах / Х. Юсида, С. Ямагучи // Достижения в области теплообмена: сб. статей / под ред. В.М. Боришанского. – М.: Мир, 1970. – С. 252–272.
12. Тиличев, М.Д. Физико-химические свойства индивидуальных углеводородов / М.Д. Тиличев. – М-Л.: Гостоптехиздат, 1947. – Вып. 2–4. – 458 с.

## References

1. Ray, D. Heat Pumps. Trans. from English. / D. Ray, D. McMichael. – М.: Energoizdat, 1982. – 224 p.
2. International Symposium on the Industrial Application of Heat Pump, 1982. – No. 24–26, March. – 189 p.
3. Kuritsyn, B.N. Fundamentals of energy saving in heating and ventilation technology / B.N. Kuritsyn. – Saratov: Publishing house «Nadezhda», 1996. – 92 p.
4. Shurayts, A.L. Assessing Energy Efficiency of Compression Heat Pumps in Drying Processes when Zeotropic Hydrocarbon Mixtures are Used as Working Agents / A.L. Shurayts, A.V. Rulev, E.Yu. Usacheva // MATEC Web Conf. Volume 73, (2016) 02015 XV International Conference «Topical Problems of Architecture, Civil Engineering, Energy Efficiency and Ecology – 2016». – P. 1–9. – URL: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20167302015>.
5. Bukin, V.G. Refrigeration machines operating on non-azeotropic refrigerant mixtures / V.G. Bukin, A.Yu. Kuzmin. – Astrakhan: Publishing house ASTU, 2007. – 156 p.
6. Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer: Adopted by the Government of the USSR in November 1988: Entered into force on January 1, 1989. – URL: <http://www.chillers.ru/bibl/allowances/refrigerants/protokol.php> (circulation date 03.02.2018).
7. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change: Ratified by the Federal Law of the Russian Federation of November 4, 2004 N 128-FZ: Entered into force on February 16, 2005. – URL: [http://www.un.org/en/documents/decl\\_conv/conventions/kyoto.shtml](http://www.un.org/en/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml) (circulation date 03.02.2018).
8. Ogurechnikov, L.A. Condensation of R32 / R134a in the technology of heat pump heat supply / L.A. Ogurechnikov // Refrigeration equipment. – 2011. – №2. – P. 46–48.
9. Shurayts, A.L. Selection of mixtures of working agents and their composition in compression heat pumps of heat and gas supply and ventilation systems for heating and cooling of media with limited heat capacity / A.L. Shurayts, A.V. Rulev, E.Yu. Usachev // NZ construction and architecture. – 2017. – No.4 (48). – P. 47-57.
10. Heat transfer in a two-phase flow: trans. from English / ed. D. Butterworth and G. Hewitt. – М.: Energia, 1980. – 328 p.
11. Yusida, H. Heat transfer in two-phase flow of freon 12 in horizontal pipes / H. Yusida, S. Yamaguchi // Advances in heat transfer: Sat. articles / Ed. V.M. Borishansky. – М.: Mir, 1970. – P. 252–272.
12. Tilicheev, M.D. Physico-chemical properties of individual hydrocarbons / M.D. Tilicheev. – М-Л.: Gostoptekhizdat, 1947. – Issue. 2–4. – 458 с.

УДК 699.86:692.2

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

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

**Королева Тамара Ивановна**,  
кандидат экономических наук,  
профессор кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: korolevatamara@gmail.ru

**Аржаева Наталья Владимировна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: summer981@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

**Koroleva Tamara Ivanovna**,  
Candidate of Economic Sciences,  
Professor of the department «Heat, gas supply  
and ventilation»  
E-mail: korolevatamara@gmail.ru

**Arzhaeva Natalia Vladimirovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Heat, gas supply and  
ventilation»  
E-mail: summer981@yandex.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА В ТОЛЩЕ МНОГОСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ НАРУЖНОГО ОГРАЖДЕНИЯ

Т.И. Королева, Н.В. Аржаева

Рассмотрена возможность конденсации влаги в толще многослойной конструкции наружного ограждения. Особое внимание уделено вероятности конденсации влаги в зависимости от материала несущего слоя конструкции стены. Выполнен сравнительный графо-аналитический анализ многослойных ограждающих конструкций с несущим слоем из керамзитобетона и ячеистого бетона. Определены значения температуры, максимальной упругости водяных паров и действительной упругости водяных паров в толще ограждения. Найдены зоны возможной конденсации при различных температурах наружного воздуха. Сделан вывод о возможности накопления влаги в толще ограждений, выполненных из различных материалов, при одинаковых условиях.

*Ключевые слова: многослойные конструкции наружных ограждений, несущий слой наружной стены, конденсация влаги в толще ограждения, зона конденсации, теплотехнические свойства строительных материалов, влажностный режим, помещения с повышенной влажностью*

## STUDY ON THE CONDENSATION OF WATER VAPOR IN THE THICKER MULTI-LAYER EXTERIOR ENCLOSING

T.I. Koroleva, N.V. Arzhaeva

The possibility of moisture condensation in the thicker multi-layer exterior enclosing is considered. Particular attention is paid to the likelihood of condensation moisture depending on material base layer of wall. Contrastive graph analysis of multilayer enclosing structures with bearing layer of concrete and aerated concrete is made. Values of temperature, maximum elasticity of water vapor and the actual water vapor pressure inside the fence are defined. Possible condensation zone at different temperatures of external air is found. It is proved that accumulation of moisture inside the enclosing exterior, made of various materials under the same conditions is possible .

*Keywords: multi-layer design exterior enclosures, outer wall bearing layer, moisture condensation inside the enclosing, the zone of condensation, thermal properties of building materials, humidity regime, premises with the extra humidity*



Ограждающие конструкции выполняют функции защиты и регулирования воздушного и влажностного режимов помещений. Через ограждения происходит перенос влаги, но этот процесс не должен приводить к их переувлажнению и накоплению влаги в толще конструкции. Повышение влажности материалов, составляющих ограждающую конструкцию, связано с потерей их теплозащитных свойств и долговечности.

Этот вопрос особенно актуален для помещений с повышенной влажностью. Влажные ограждения при отрицательных температурах деформируются, что может вызвать разрушение конструкций.

Нами проведены исследования возможности конденсации влаги в толще многослойной конструкции наружного ограждения с различным несущим слоем помещений 2 влажностных режимов: нормального ( $t = 12-24^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 50-60\%$ ) и мокрого ( $t = 12-24^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 75-90\%$ ).

Пензенская область находится в сухой климатической зоне [1], поэтому для теплотехнического расчета характеристики материалов принимаются по параметру А и Б соответственно [2].

В расчетах принята температура внутреннего воздуха средняя по зданию, равная  $t_{\text{в}}=20^{\circ}\text{C}$ , для помещений с нормальным влажностным режимом относительная влажность внутреннего воздуха принята равной  $\varphi_{\text{в}}=50\%$ , для помещений с мокрым режимом  $\varphi_{\text{в}}=75\%$ .

Расчетные параметры наружного воздуха для г.Пензы:

$t_{\text{н}} = -27^{\circ}\text{C}$  – температура воздуха наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 [1];

$\varphi_{\text{н}} = 83\%$  – средняя месячная относительная влажность воздуха наиболее холодного месяца [1];

$t_{\text{от}} = -4,1^{\circ}\text{C}$  – средняя температура воздуха за отопительный период [1];

$z_{\text{от}} = 200$  сут – продолжительность отопительного периода [1].

При выполнении теплотехнического расчета для холодного периода года необходимо убедиться, что конструктивное решение проектируемого ограждения позволяет обеспечить необходимые санитарно-гигиенические и комфортные условия микроклимата. Для этого требуемое сопротивление теплопередаче,  $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ , определяют по формуле

$$R_0^{\text{тп}} = \frac{n(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{\Delta t^{\text{н}} \alpha_{\text{в}}}, \quad (1)$$

где  $n$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху по [2];  $\Delta t^{\text{н}}$  – нормативный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции,  $^{\circ}\text{C}$ , [2];  $\alpha_{\text{в}}$  – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ , [2].

$$R_0^{\text{тп}} = \frac{1 \cdot (20 - (-27))}{4 \cdot 8,7} = 1,351 \text{ (м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)/ Вт}.$$

Градусо-сутки отопительного периода (ГСОП),  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}$ , следует определять по формуле  $\text{ГСОП} = (t_{\text{в}} - t_{\text{от}}) \cdot z_{\text{от}} = (20 - (-4,1)) \cdot 200 = 4820 \text{ } ^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}$ .

Требуемое сопротивление теплопередаче стены определяется по формуле

$$R_0^{\text{тп}} = a \cdot \text{ГСОП} + b, \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$  – коэффициенты, значения которых принимаются по [4].

$$R_0^{\text{тп}} = 0,00035 \cdot 4820 + 1,4 = 3,087 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}.$$

Величина сопротивления теплопередаче ограждения с учетом энергосбережения равна  $R_0^{\text{тп}} = 3,087 \text{ (м}^2 \cdot \text{°С)/Вт}$ .

Исследованы два варианта конструкций наружного ограждения при различных режимах эксплуатации, перечень и характеристики слоев которых приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

## Характеристики слоев конструкции наружного ограждения

№ слоя	Название строительного материала	Удельный вес $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	Толщина слоя $\delta$ , м	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°С)	Коэффициент паропроницаемости $\mu$ , мг(м·ч·Па)
1	2	3	4	5	6
Вариант 1а – помещение с нормальным режимом эксплуатации (параметры А)					
1	Шпатлевка гипсовая	1600	0,006	0,700	0,120
2	Штукатурка цементно-песчаная М-100	1800	0,018	0,760	0,090
3	Блоки из керамзитобетона	1000	0,300	0,410	0,075
4	Теплоизоляция ISOVER ВЕНТИ	75-95	0,150	0,038	0,300
Вариант 1б – помещение с мокрым режимом эксплуатации (параметры Б)					
1	Керамическая плитка	1400	0,007	0,580	0,160
2	Штукатурка цементно-песчаная М-100	1800	0,018	0,930	0,090
3	Блоки из керамзитобетона	1000	0,300	0,470	0,075
4	Теплоизоляция ISOVER ВЕНТИ	85	0,150	0,039	0,300
Вариант 2а – помещение с нормальным режимом эксплуатации (параметры А)					
1	Шпатлевка гипсовая	1600	0,006	0,700	0,120
2	Штукатурка цементно-песчаная М-100	1800	0,018	0,760	0,090
3	Ячеистый бетон (пенобетон)	400	0,300	0,140	0,230
4	Теплоизоляция ISOVER ВЕНТИ	75-95	0,150	0,038	0,300
Вариант 2б – помещение с мокрым режимом эксплуатации (параметры Б)					
1	Керамическая плитка	1400	0,007	0,580	0,160
2	Штукатурка цементно-песчаная М-100	1800	0,018	0,930	0,090
3	Ячеистый бетон (пенобетон)	400	0,300	0,150	0,230
4	Теплоизоляция ISOVER ВЕНТИ	85	0,150	0,039	0,300

Для каждого варианта определяем:

– значение сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт,

$$R_0^{\text{ф}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}; \quad (3)$$

– плотность теплового потока, проходящего через стену, Вт/м<sup>2</sup>,

$$q = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_0^{\text{ф}}}; \quad (4)$$

– температуры на границе слоев, °С,

$$t_1 = t_{\text{в}} - \frac{q}{\alpha_{\text{в}}}; \quad (5)$$

$$t_2 = t_1 - q \left( \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} \right); \quad (6)$$

$$t_3 = t_2 - q \left( \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right); \quad (7)$$

$$t_4 = t_1 - q \left( \frac{1}{\alpha_B} - \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right); \quad (8)$$

$$t_5 = t_H + \frac{q}{\alpha_H}. \quad (9)$$

Определяем температуру внутренней поверхности в углу  $\tau_{уг}$  по уравнению [8]:

$$\frac{\tau_{уг} - \tau_{вп}}{t_B - t_H} = 0,18 - 0,036 R_0^\phi,$$

откуда

$$\tau_{уг} = \tau_{вп} - (0,18 - 0,036 R_0^\phi) \cdot (t_B - t_H). \quad (10)$$

Полученные результаты приведены в табл. 2 и на рис. 1.

Т а б л и ц а 2

Результаты теплотехнического расчета ограждений

Вариант конструкции	$R_0^\phi$	$q$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$\tau_{уг}$
Вариант 1а	4,87	9,65	18,89	18,81	18,58	11,52	-26,58	18,67
Вариант 1б	4,67	10,06	18,84	18,72	18,53	12,11	-26,56	18,29
Вариант 2а	6,28	7,48	19,14	19,08	18,90	2,86	-26,67	21,31
Вариант 2б	6,036	7,88	19,10	19,01	18,86	3,29	-26,66	20,52

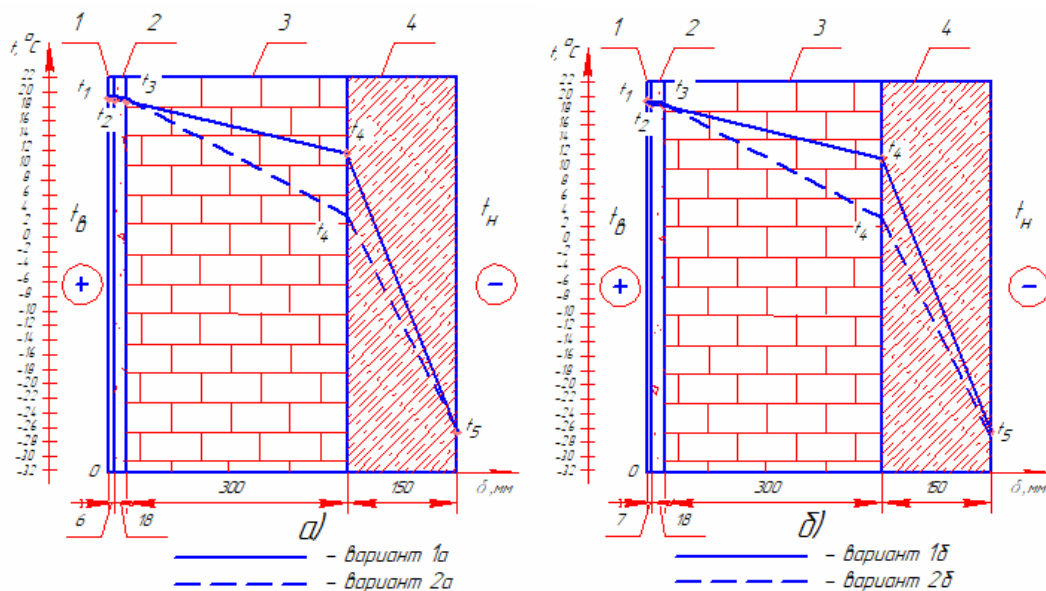


Рис. 1. Распределение температур на границах слоев конструкции ограждения для помещений с нормальным (а) и влажным (б) режимами эксплуатации

Действительная упругость водяных паров наружного воздуха

$$e_H = \frac{\varphi_H}{100} E_H = \frac{83}{100} \cdot 51 = 42,33 \text{ Па.}$$

Действительная упругость водяных паров внутреннего воздуха

$$\text{при влажности } 50 \% \quad e_b = \frac{\varphi_b}{100} E_b = \frac{50}{100} \cdot 2339 = 1169,5 \text{ Па};$$

$$\text{при влажности } 75 \% \quad e_b = \frac{\varphi_b}{100} E_b = \frac{75}{100} \cdot 2339 = 1754,25 \text{ Па}.$$

По таблицам [2] в соответствии со значениями температур на границах слоев определяем максимальные значения упругости водяных паров (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Максимальные значения упругости водяных паров на границах слоев

Вариант конструкции	Максимальная упругость водяных паров $E$ , Па				
	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$
Вариант 1а	2169	2169	2129	1357	51
Вариант 1б	2169	2156	2129	1412	51
Вариант 2а	2211	2197	2183	748	51
Вариант 2б	2211	2197	2169	769	51

Для каждого варианта определяем:

Общее сопротивление паропроницанию,  $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$ .

$$R_0^{\Pi} = R_b^{\Pi} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + R_n^{\Pi}, \quad (11)$$

где сопротивление паропроницанию внутренней и наружной поверхности рассчиты-

вается по формуле  $R_x^{\Pi} = 0,134 \cdot \left(1 - \frac{\varphi_x}{100}\right)$ ;

$$R_n^{\Pi} = 0,134 \cdot \left(1 - \frac{83}{100}\right) = 0,023 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)/мг};$$

$$\text{для влажности } 50 \% \quad R_b^{\Pi} = 0,134 \cdot \left(1 - \frac{50}{100}\right) = 0,067 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)/мг};$$

$$\text{для влажности } 75 \% \quad R_b^{\Pi} = 0,134 \cdot \left(1 - \frac{75}{100}\right) = 0,034 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)/мг}.$$

Действительные значения упругости водяных паров на границах отдельных слоев для всех вариантов конструкций ограждения, Па, определяем по формулам [8]

$$e_1 = e_b - (e_b - e_n) \frac{R_b^{\Pi}}{R_0^{\Pi}}, \quad (12)$$

$$e_2 = e_b - (e_b - e_n) \frac{R_b^{\Pi} + \frac{\delta_1}{\mu_1}}{R_0^{\Pi}}, \quad (13)$$

$$e_3 = e_b - (e_b - e_n) \frac{R_b^{\Pi} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2}}{R_0^{\Pi}}, \quad (14)$$

$$e_4 = e_b - (e_b - e_n) \frac{R_b^{\Pi} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3}}{R_0^{\Pi}}, \quad (15)$$

$$e_4 = e_b - (e_b - e_n) \frac{R_B^{\Pi} + \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \frac{\delta_3}{\mu_3} + \frac{\delta_4}{\mu_4}}{R_0^{\Pi}} \quad (16)$$

Результаты расчета приведены в табл. 4 и на рис. 2.

Т а б л и ц а 4

Результаты расчета влажностного режима конструкций ограждения

Вариант конструкции	Общее сопротивление паропро-ницанию $R_0^{\Pi}$ , ( $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$ )/ $\text{мг}$	Действительная упругость водяных паров $e$ , Па				
		$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$
Вариант 1а	4,89	1153,9	1142,25	1095,67	164,08	47,64
Вариант 1б	4,8	1742,3	1726,7	1655,37	228,78	50,45
Вариант 2а	2,144	11,24,28	1107,99	1002,85	317,16	54,31
Вариант 2б	2,104	1727,00	1691,41	1528,71	467,61	60,86

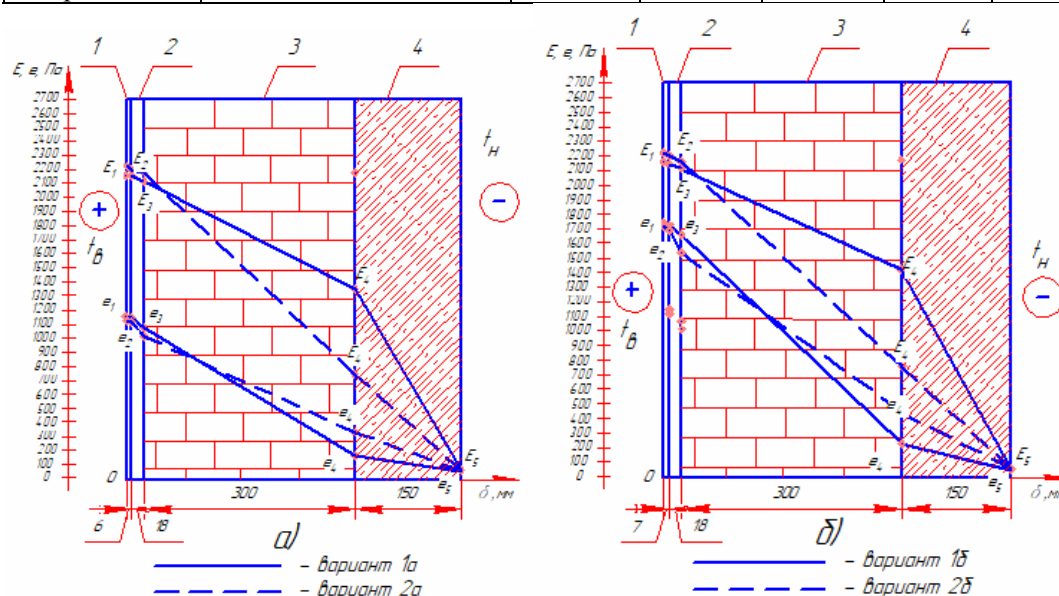


Рис. 2. Максимальное и действительное значение упругости водяных паров в толще ограждения помещений с нормальным (а) и влажным (б) режимами эксплуатации

С целью оценки возможности конденсации влаги в толще многослойной конструкции наружного ограждения необходимо сравнить действительные значения упругости водяных паров с максимальными на границах отдельных слоев.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Конденсация влаги в толще ограждения по варианту №1, а также на внутренней поверхности ограждения и в углу стены, происходить не будет, так как выполняются условия  $E_5 > e_5$ ,  $E_{вп} > e_b$  и  $E_{уг} > e_b$  при нормальных и мокрых условиях эксплуатации. Следовательно, керамзитобетон ( $\gamma=1000$  кг/куб.м.) может быть использован в качестве конструктивного слоя.

2. Для конструкции наружного ограждения по варианту № 2 и для нормальных и для мокрых условий эксплуатации  $E_5 < e_5$ . Это означает, что в слое утеплителя на расстоянии от 4 до 5 мм от наружной поверхности будет происходить конденсация водяных паров. Однако систематическое накопление влаги в данном случае происходить не будет, т.к. зона конденсации водяных паров примыкает к наружной поверхности слоя утеплителя.

3. Конденсация влаги на внутренней поверхности и в углу стены ограждения по варианту № 2 происходить не будет, так как выполняются условия  $E_{вп} > e_b$  и  $E_{уг} > e_b$  при нормальных и мокрых условиях эксплуатации. Следовательно, ячеистый бетон

(пенобетон) ( $\gamma=400$  кг/куб.м.) также может быть использован в качестве конструктивного слоя.

### Список литературы

1. СП 131.13330.2012. Строительная климатология.
2. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий.
3. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий.
4. Оценка влажностного режима многослойной стеновой конструкции в годовом цикле / С.В. Корниенко, Н.И. Ватин, М.Р. Петриченко, А.С. Горшков // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – №6.
5. Еремкин, А.И. Тепловой режим зданий / А.И. Еремкин, Т.И. Королева. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 363 с.
6. Research of conditions of condensate formation in enclosure mass and its influence on thermal engineering properties of wall structures / T.I. Koroleva, N.V. Arzhaeva, G.I. Greisukh, E.G. Ezhov // Internation Jorunal of Applied Engineering Reseach (IJAER). Paper Code 49434, Delhi, INDIA. – 2016. – Vol. 11, No 21. – P 10402-10407.
7. Королева, Т.И. Утепление наружных ограждений в эксплуатируемых зданиях / Т.И. Королева, Н.Ю. Иващенко // Материали за IX Международна научна практична конференция, бъдещето въпроси от света на науката – 2013, 17-25 декември, 2013. – Т. 38. Здание и архитектура. – София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2013.
8. Малявина, Е.Г. Строительная теплофизика / Е.Г. Малявина. – М.: МГСУ, 2011.

### References

1. SP 131.13330.2012. Building climatology.
2. SP 50.13330.2012. Thermal protection of buildings.
3. SP 23-101-2004. Designing of thermal protection of buildings.
4. Assessment of humidity conditions multilayer wall structure in the annual cycle / S.V. Kornienko, N.I. Vatin, M.R. Petrichenko, A.S. Gorshkov // Construction of the improvement of unique buildings and structures. – 2015. – No. 6.
5. Eremkin, I.A. Thermal regime of buildings / A.I. Eremkin, T. I. Koroleva. – Rostov n/D: Feniks, 2008. – 363 p.
6. Research of conditions of condensate formation in enclosure mass and its influence on thermal engineering properties of wall structures / T.I. Koroleva, N.V. Arzhaeva, G.I. Greisukh, E.G. Ezhov // Internation Jorunal of Applied Engineering Reseach (IJAER). Paper Code 49434, Delhi, INDIA. – 2016. – Vol. 11, No 21. – P 10402-10407.
7. Koroleva, T. I. Insulation of outer enclosures in existing buildings / T.I. Koroleva, N.Yu. Ivashchenko // Proceedings of the IX International scientific-practical conference, the future issues from the world of science in 2013 17-25 December, 2013. – Vol. 38. Building and architecture. – Sophia: "ByalGRAD-BG" LTD., 2013.
8. Malyavina.G. Building Thermophysics / E.G. Malyavina. – M.: MGSU, 2011.

УДК 699.86:692.2

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

**Королева Тамара Ивановна,**  
кандидат экономических наук,  
профессор кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: korolevatamara@gmail.ru

**Аржаева Наталья Владимировна,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: summer981@yandex.ru

**Мельников Илья Евгеньевич,**  
студент  
E-mail: farvater335@gmail.com

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Koroleva Tamara Ivanovna,**  
Candidate of Economic Sciences,  
Professor of the department «Heat, gas supply  
and ventilation»  
E-mail: korolevatamara@gmail.ru

**Arzhaeva Natalia Vladimirovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Heat, gas supply and  
ventilation»  
E-mail: summer981@yandex.ru

**Melnikov Ilya Evgenievich,**  
student  
E-mail: farvater335@gmail.com

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ

Т.И. Королева, Н.В. Аржаева, И.Е. Мельников

Рассмотрена возможность использования методики расчета влажностного состояния неоднородных ограждающих конструкций. Предложена методика расчета влажностного состояния на примере ограждающей конструкции стены облегченной кирпичной кладки. Установлено, что суть расчета влажностного поля сводится к определению величины упругости водяных паров в каждом из узлов.

*Ключевые слова: неоднородная ограждающая конструкция, влажностный режим, упругость водяных паров, паропроницание ограждающих конструкций*

## STUDY OF THE MOISTURE STATUS OF HETEROGENEOUS STRUCTURES OF EXTERIOR ENCLOSING

T.I. Koroleva, N.V. Arzhaeva, I.E. Melnikov

Possibility of calculation of humidity state of heterogeneous enclosing structures is given. The technique of calculation of humidity condition on the example of enclosing structure of walls of light masonry is offered. It is estimated that of the humidity area is limited to determining the elasticity values of water vapour at each node.

*Keywords: heterogeneous enclosing structures, moisture regime, elasticity of water vapor, water vapor walling*

В настоящее время выбор варианта ограждающей конструкции стены в большинстве случаев базируется на теплотехническом расчете стены. Расчет влажностного состояния ограждающей конструкции производят нечасто, однако неблагоприятный влажностный режим может сильно повлиять на теплотехнические и прочностные качества ограждающей конструкции.

Современные методики расчета теплотехнических и влажностных характеристик ограждающих конструкций в основном предназначены для конструкций, однородных в продольном сечении стены. Для более точного теплотехнического расчета неоднородных в продольном и поперечном сечении ограждающих конструкций можно

воспользоваться методикой построения плоского температурного поля, однако такой расчет не отображает влажностного состояния конструкции.

С целью рассмотрения влажностного состояния неоднородной ограждающей конструкции в данной статье предложена методика расчета влажностного состояния на примере ограждающей конструкции стены облегченной кирпичной кладки.

Для примера была выбрана стена облегченной кирпичной кладки «типа Б» согласно пособию по проектированию каменных и армокаменных конструкций к СНиП II-22-81. Данная конструкция стены была выбрана как наиболее яркий и простой пример неоднородной ограждающей конструкции.

Кирпичная кладка выполняется из обыкновенного глиняного кирпича на цементно-песчаном растворе, в качестве минеральной засыпки принят щебень из вспученного перлита. Характеристики материалов взяты согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» и СТО 00044807-001-2006 «Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий».

Параметры наружного воздуха приняты согласно СП 131.13330.2012 «Строительная климатология» для города Пензы (условия эксплуатации – А;  $t_{\text{ХП}}^{0,92} = -27^{\circ}\text{C}$ ;  $\varphi_{\text{н}} = 83\%$ ). Параметры внутреннего воздуха принимаем равными:  $t_{\text{в}} = 18^{\circ}\text{C}$ ;  $\varphi_{\text{в}} = 60\%$ .

Общий вид конструкции стены приведен на рис. 1.

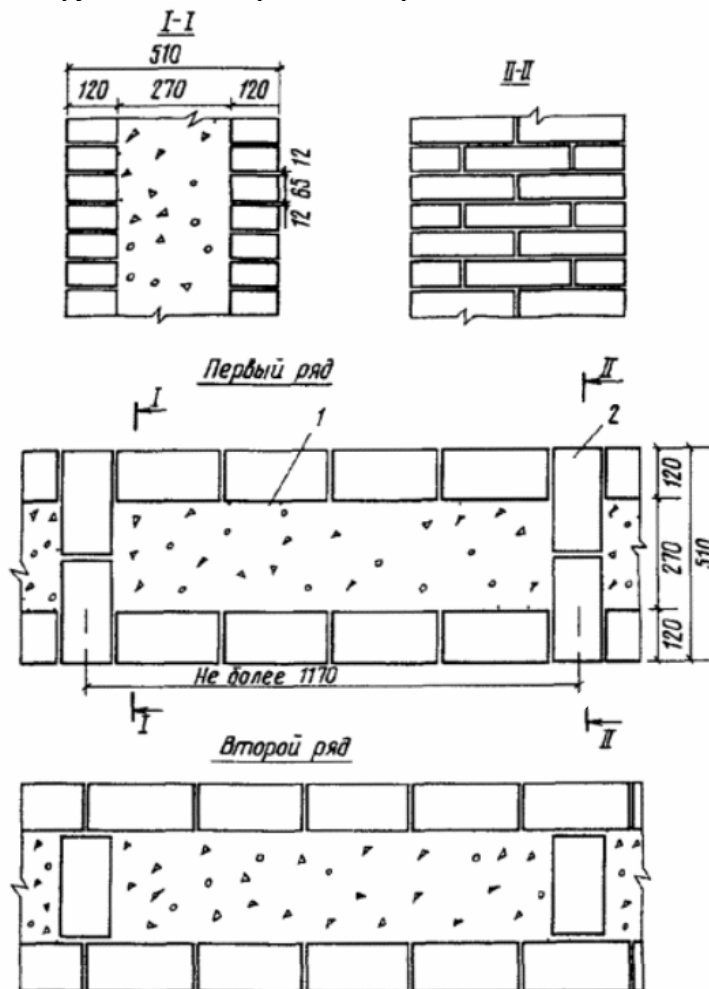


Рис. 1 Облегченная кладка. Тип Б:

1 – щебень из вспученного перлита,  $\rho = 600 \text{ кг/м}^3$ ;  $\mu = 0,26 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$ ; 2 – кирпичная кладка из сплошного обыкновенного глиняного кирпича,  $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$ ;  $\mu = 0,11 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$

Для расчета принимаем часть ограждающей конструкции стены от середины перемычки до середины слоя перлитовой засыпки (от оси симметрии до оси симметрии),



т.к. это типовой участок стены, повторяющийся многократно. Производим разбивку на оси и узлы в характерных точках. Расчетная схема изображена на рис. 2.

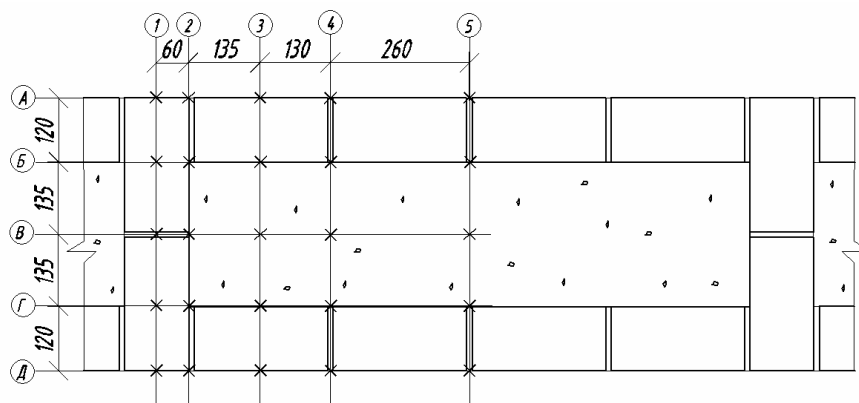


Рис. 2. Расчетная схема ограждающей конструкции

Суть расчета влажностного поля сводится к определению величины упругости водяных паров в каждом из узлов. Величина упругости водяных паров в узле будет зависеть от величины упругости водяных паров в соседних узлах, расстояния до этих узлов, площади паропередачи и материала между узлами.

Подробный расчет приведен для узлов «А1» и «Б2». Остальные узлы рассчитываются аналогичным образом.

#### Узел А1:

– к узлу А2 паропередача происходит по кирпичной кладке: расстояние между узлами  $\Delta = 0,06$  м; площадь, по которой происходит паропередача  $F = \frac{0,12}{2} = 0,06$  м<sup>2</sup>; коэффициент паропродности материала между узлами  $\mu = 0,11$  мг/(м·ч·Па).

Найдем коэффициент паропередачи, мг/(ч·Па), от узла А1 к узлу А2 с учетом площади паропередачи:

$$M_{A1-A2} = \frac{\mu}{\Delta} \cdot F = \frac{0,11}{0,06} \cdot 0,06 = 0,11 \text{ мг/(ч·Па)}. \quad (1)$$

Определим количество передаваемого водяного пара, мг/ч, к узлу А2:

$$G_{A1-A2} = (e_{A1} - e_{A2}) M_{A1-A2}; \quad (2)$$

– к узлу Б1 паропередача происходит по кирпичной кладке: расстояние между узлами  $\Delta = 0,12$  м; площадь, по которой происходит паропередача  $F = \frac{0,06 + 0,06}{2} = 0,06$  м<sup>2</sup>; паропродность материала между узлами  $\mu = 0,11$  мг/(м·ч·Па).

Найдем коэффициент передачи тепла, мг/(ч·Па), от узла А1 к узлу Б1 с учетом площади паропередачи:

$$M_{A1-B1} = \frac{0,11}{0,12} \cdot 0,06 = 0,055 \text{ мг/(ч·Па)}.$$

Определим количество передаваемого водяного пара, мг/ч, к узлу Б1:

$$G_{A1-B1} = (e_{A1} - e_{B1}) M_{A1-B1};$$

– к наружному воздуху паропередача происходит по площади  $F = 0,06$  м<sup>2</sup>, при  $M_n = \frac{1}{R_{nn}} = \frac{1}{0,0133} = 75,2$  мг/(м<sup>2</sup>·ч·Па).

Найдем коэффициент передачи водяного пара, мг/(ч·Па), от узла А1 к наружному воздуху:

$$M_{A1-n} = M_n \cdot F = 75,2 \cdot 0,06 = 4,512 \text{ мг/(ч·Па)}.$$

Определим количество передаваемого водяного пара, мг/ч, от узла к наружному воздуху:

$$G_{A1-n} = (e_{A1} - e_n) M_{A1-n}.$$

Составим уравнение материального баланса по количеству водяного пара для данного узла:

$$2 \cdot G_{A1-A2} + G_{A1-B1} + G_{A1-n} = 0.$$

Узел А2 в расчете взят дважды, так как узел А1 находится на оси симметрии ограждающей конструкции и с противоположной стороны оси находится симметричный узлу А2 узел.

Подставим значения количества водяного пара:

$$2 \cdot (e_{A1} - e_{A2}) M_{A1-A2} + (e_{A1} - e_{B1}) M_{A1-B1} + (e_{A1} - e_n) M_{A1-n} = 0.$$

Выразим из уравнения парциальное давление водяных паров в узле А1:

$$e_{A1} = \frac{2 \cdot M_{A1-A2} e_{A2} + M_{A1-B1} e_{B1} + M_{A1-n} e_n}{2 \cdot M_{A1-A2} + M_{A1-B1} + M_{A1-n}}. \quad (3)$$

Подставив значения коэффициентов паропередачи, получим:

$$e_{A1} = \frac{2 \cdot 0,11 e_{A2} + 0,055 e_{B1} + 4,512 e_n}{2 \cdot 0,11 + 0,055 + 4,512} = 0,046 e_{A2} + 0,011 e_{B1} + 0,942 e_n.$$

#### **Узел Б2:**

– к узлу А2 паропередача происходит по кирпичной кладке:  $\Delta = 0,12 \text{ м}$ ;  
 $F = \frac{0,06 + 0,135}{2} = 0,0975 \text{ м}^2$ ;  $\mu = 0,11 \text{ мг/(м·ч·Па)}$ .

$$M_{B2-A2} = \frac{0,11}{0,12} \cdot 0,0975 = 0,089 \text{ мг/(ч·Па)};$$

– к узлу Б1 паропередача происходит по кирпичной кладке:  $\Delta = 0,06 \text{ м}$ ;  
 $F = \frac{0,12 + 0,135}{2} = 0,1275 \text{ м}^2$ ;  $\mu = 0,11 \text{ мг/(м·ч·Па)}$ .

$$M_{B2-B1} = \frac{0,11}{0,06} \cdot 0,127 = 0,234 \text{ мг/(ч·Па)};$$

– к узлу Б3 паропередача происходит по кирпичной кладке и минеральной засыпке:  $\Delta = 0,135 \text{ м}$ ;  $F = \frac{0,06 + 0,135}{2} = 0,1275 \text{ м}^2$ .

Для расчета определим усредненный коэффициент паропроницаемости материала между узлами:

$$\mu = \frac{0,06 \cdot 0,11 + 0,135 \cdot 0,26}{0,195} = 0,189 \text{ мг/(м·ч·Па)}.$$

$$M_{B2-B3} = \frac{0,189}{0,135} \cdot 0,1275 = 0,179 \text{ мг/(ч·Па)};$$

– к узлу В2 паропередача происходит по монтажной пене и минеральной засыпке:

$$\Delta = 0,135 \text{ м}; F = \frac{0,06 + 0,135}{2} = 0,0975 \text{ м}^2;$$

Для расчета определим усредненный коэффициент паропроницаемости материала между узлами:

$$\mu = \frac{0,06 \cdot 0,11 + 0,135 \cdot 0,26}{0,195} = 0,214 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}).$$

$$M_{\text{В2-В2}} = \frac{0,214}{0,135} \cdot 0,0975 = 0,154 \text{ мг}/(\text{ч} \cdot \text{Па});$$

$$e_{\text{В2}} = \frac{0,089e_{\text{А2}} + 0,234e_{\text{Б1}} + 0,179e_{\text{Б3}} + 0,214e_{\text{В2}}}{0,089 + 0,234 + 0,179 + 0,214} =$$

$$= 0,136e_{\text{А2}} + 0,356e_{\text{Б1}} + 0,273e_{\text{Б3}} + 0,235e_{\text{В2}}.$$

Произведя таким образом расчет всех узлов, получим систему из 25 уравнений:

$$e_{\text{А1}} = 0,046e_{\text{А2}} + 0,943e_{\text{н}} + 0,011e_{\text{Б1}};$$

$$e_{\text{А2}} = 0,015e_{\text{А1}} + 0,006e_{\text{А3}} + 0,967e_{\text{н}} + 0,012e_{\text{Б2}};$$

$$e_{\text{А3}} = 0,005e_{\text{А2}} + 0,005e_{\text{А3}} + 0,978e_{\text{н}} + 0,012e_{\text{Б3}};$$

$$e_{\text{А4}} = 0,003e_{\text{А3}} + 0,002e_{\text{А5}} + 0,983e_{\text{н}} + 0,012e_{\text{Б4}};$$

$$e_{\text{А5}} = 0,002e_{\text{А4}} + 0,985e_{\text{н}} + 0,012e_{\text{Б5}};$$

$$e_{\text{Б1}} = 0,818e_{\text{Б2}} + 0,096e_{\text{А1}} + 0,086e_{\text{Г1}};$$

$$e_{\text{Б2}} = 0,356e_{\text{Б1}} + 0,273e_{\text{Б3}} + 0,136e_{\text{А2}} + 0,235e_{\text{В2}};$$

$$e_{\text{Б3}} = 0,241e_{\text{Б2}} + 0,251e_{\text{Б4}} + 0,164e_{\text{А3}} + 0,344e_{\text{Б3}};$$

$$e_{\text{Б4}} = 0,223e_{\text{Б3}} + 0,112e_{\text{Б5}} + 0,215e_{\text{А4}} + 0,451e_{\text{Б4}};$$

$$e_{\text{Б5}} = 0,200e_{\text{Б4}} + 0,258e_{\text{А5}} + 0,541e_{\text{Б5}};$$

$$e_{\text{Г1}} = 0,836e_{\text{Б2}} + 0,082e_{\text{Б1}} + 0,082e_{\text{Г1}};$$

$$e_{\text{Г2}} = 0,303e_{\text{Б1}} + 0,318e_{\text{Б3}} + 0,189e_{\text{Б2}} + 0,189e_{\text{Г2}};$$

$$e_{\text{Г3}} = 0,250e_{\text{Б2}} + 0,260e_{\text{Б4}} + 0,245e_{\text{Б3}} + 0,245e_{\text{Г3}};$$

$$e_{\text{Г4}} = 0,234e_{\text{Б3}} + 0,117e_{\text{Б5}} + 0,325e_{\text{Б4}} + 0,325e_{\text{Г4}};$$

$$e_{\text{Г5}} = 0,212e_{\text{Б4}} + 0,394e_{\text{Б5}} + 0,394e_{\text{Г5}};$$

$$e_{\text{Г1}} = 0,818e_{\text{Г2}} + 0,086e_{\text{Б1}} + 0,096e_{\text{Д1}};$$

$$e_{\text{Г2}} = 0,356e_{\text{Г1}} + 0,273e_{\text{Г3}} + 0,235e_{\text{Б2}} + 0,136e_{\text{Д2}};$$

$$e_{\text{Г3}} = 0,241e_{\text{Г2}} + 0,251e_{\text{Г4}} + 0,344e_{\text{Б3}} + 0,164e_{\text{Д3}};$$

$$e_{\text{Г4}} = 0,223e_{\text{Г3}} + 0,112e_{\text{Г5}} + 0,451e_{\text{Б4}} + 0,215e_{\text{Д4}};$$

$$e_{\text{Г5}} = 0,200e_{\text{Г4}} + 0,541e_{\text{Б5}} + 0,258e_{\text{Д5}};$$

$$e_{\text{Д1}} = 0,168e_{\text{Д2}} + 0,020e_{\text{Г1}} + 0,812e_{\text{Б}};$$

$$e_{\text{Д2}} = 0,057e_{\text{Д1}} + 0,025e_{\text{Д3}} + 0,022e_{\text{Г2}} + 0,896e_{\text{Б}};$$

$$e_{\text{Д3}} = 0,020e_{\text{Д2}} + 0,020e_{\text{Д4}} + 0,023e_{\text{Г3}} + 0,937e_{\text{Б}};$$

$$e_{\text{Д4}} = 0,014e_{\text{Д3}} + 0,007e_{\text{Д5}} + 0,023e_{\text{Г4}} + 0,956e_{\text{Б}};$$

$$e_{\text{Д5}} = 0,010e_{\text{Д4}} + 0,024e_{\text{Г5}} + 0,966e_{\text{Б}}.$$

Решение ведется методом итерации (последовательного приближения) в табличной форме. Для первого приближения упругость водяных паров в узлах найдем с помощью формулы

$$e_n = e_b - (e_b - e_n) \frac{R_b + \sum R}{R_\phi}, \quad (4)$$

где  $e_b$  – упругость водяных паров во внутреннем воздухе помещения, Па;  $e_n$  – упругость водяных паров в наружном воздухе, Па;  $R_\phi$  – фактическое сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции в направлении поперечной оси, ( $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$ )/мг;  $R_b$  – сопротивление паропроницанию внутренней поверхности ограждающей конструкции, ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт;  $\sum R$  – сумма сопротивлений паропроницанию слоев ограждающей конструкции в направлении поперечной оси от внутренней поверхности до расчетного узла, ( $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$ )/мг.

Для определения упругости водяных паров  $e_b$  и  $e_n$  воспользуемся следующей формулой:

$$e = \frac{\varphi}{100} E, \quad (5)$$

где  $\varphi$  – относительная влажность воздуха, %;  $E$  – максимальная упругость водяных паров в воздухе при данной температуре, Па.

$$e_b = \frac{60}{100} \cdot 2339 = 1403 \text{ Па};$$

$$e_n = \frac{83}{100} \cdot 51 = 41,2 \text{ Па}.$$

Расчет по формуле 4 производим для осей «1», «3», «4», и «5». Для узлов на оси «2» значения температур определим как среднее арифметическое смежных узлов по осям «1» и «3». Результат заносим в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Начальные значения упругости водяного пара в узлах, Па

	1	2	3	4	5
А	45,07	45,91	46,76	46,76	46,76
Б	362,76	432,60	502,44	502,44	502,44
В	720,16	719,74	719,32	719,32	719,32
Г	1077,56	1006,89	936,21	936,21	936,21
Д	1395,25	1393,57	1391,89	1391,89	1391,89

Расчет ведем с помощью программы Microsoft Excel. Процесс расчета останавливаем на приближении, в котором значения упругости водяных паров от предыдущего приближения отличаются не более чем на 1 Па (табл. 2–9).

Т а б л и ц а 2

Значения упругости водяных паров в узлах, Па. 1-е приближение

	1	2	3	4	5
А	45,11	45,91	46,75	46,76	46,76
Б	419,90	441,67	485,58	502,44	502,44
В	719,81	719,74	719,43	719,32	719,32
Г	1019,74	997,88	953,26	936,21	936,21
Д	1394,97	1393,62	1391,92	1391,89	1391,89

Значения упругости водяных паров в узлах, Па. 2-е приближение

	1	2	3	4	5
А	45,77	46,02	46,55	46,76	46,76
Б	427,30	457,42	487,81	498,68	502,44
В	719,75	719,68	719,48	719,35	719,32
Г	1012,31	981,95	951,13	940,01	936,21
Д	1393,83	1393,41	1392,31	1391,89	1391,89

Т а б л и ц а 4

Значения упругости водяных паров в узлах, Па. 3-е приближение

	1	2	3	4	5
А	45,86	46,21	46,58	46,71	46,76
Б	440,24	460,66	490,65	499,18	501,68
В	719,70	719,64	719,49	719,37	719,33
Г	999,16	978,68	948,32	939,55	936,97
Д	1393,65	1393,01	1392,26	1391,98	1391,89

Т а б л и ц а 5

Значения упругости водяных паров в узлах, Па. 4-е приближение

	1	2	3	4	5
А	46,02	46,25	46,61	46,72	46,75
Б	442,90	466,07	491,57	499,74	501,79
В	719,65	719,62	719,49	719,39	719,34
Г	996,46	973,16	947,41	939,04	936,88
Д	1393,32	1392,93	1392,19	1391,97	1391,91

Т а б л и ц а 6

Значения упругости водяных паров в узлах, Па. 5-е приближение

	1	2	3	4	5
А	46,05	46,31	46,62	46,72	46,75
Б	447,33	467,26	493,02	499,96	501,90
В	719,63	719,59	719,50	719,41	719,35
Г	991,92	971,94	945,94	938,83	936,79
Д	1393,26	1392,79	1392,17	1391,96	1391,91

Т а б л и ц а 7

Значения упругости водяных паров в узлах, Па. 6-е приближение

	1	2	3	4	5
А	46,10	46,33	46,64	46,73	46,75
Б	448,31	469,24	493,37	500,31	501,95
В	719,59	719,58	719,49	719,41	719,36
Г	990,91	969,90	945,59	938,50	936,75
Д	1393,14	1392,75	1392,13	1391,95	1391,90

Т а б л и ц а 8

Значения упругости водяных паров в узлах, Па. 7-е приближение

	1	2	3	4	5
А	46,11	46,35	46,65	46,73	46,75
Б	449,93	469,68	493,93	500,39	502,03
В	719,58	719,55	719,49	719,42	719,36
Г	989,22	969,43	945,01	938,42	936,69
Д	1393,12	1392,70	1392,12	1391,95	1391,90

Значения упругости водяных паров в узлах, Па. 8-е приближение

	1	2	3	4	5
А	46,13	46,36	46,65	46,73	46,75
Б	450,29	470,41	494,06	500,53	502,05
В	719,55	719,54	719,48	719,42	719,37
Г	988,84	968,66	944,88	938,28	936,68
Д	1393,08	1392,69	1392,11	1391,94	1391,90

Для оценки результатов вычислений определим численную разницу между изначально выбранными значениями и получившимися в ходе расчета (табл. 10).

Т а б л и ц а 10

Численная разница между изначально выбранными значениями упругости водяных паров и полученными в ходе расчета

	1	2	3	4	5
А	1,06	0,44	0,10	0,02	0,00
Б	87,53	37,81	8,38	1,91	0,39
В	0,61	0,20	0,15	0,10	0,05
Г	88,72	38,23	8,67	2,07	0,47
Д	2,18	0,88	0,22	0,05	0,01

Как видно из табл. 10, наибольшая разница значений наблюдается в углах примыкания слоя минеральной засыпки и кирпичной кладки. Это объясняется неоднородностью ограждающей конструкции, а также тем, что при выборе изначально принятых значений для расчета была лишь косвенно принята во внимание неоднородность слоев в направлении продольной оси стены.

#### Выводы

На основании расчета приведенной конструкции наружного ограждения на температуры в узлах и ее влажностного состояния можно сделать выводы о возможности выпадения конденсата в узлах.

Изложенную методику расчета влажностного поля можно использовать для расчета влажностного состояния неоднородных ограждающих конструкций с достаточно высокой точностью.

На основании данной методики впоследствии можно выполнять более точный анализ влажностного состояния ограждающих конструкций.

#### Список литературы

1. Оценка влажностного режима многослойной стеновой конструкции в годовом цикле / С.В. Корниенко, Н.И. Ватин, М.Р. Петриченко, А.С. Горшков // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – №6.
2. Малявина, Е.Г. Строительная теплофизика / Е.Г. Малявина. – М.: МГСУ, 2011.
3. Еремкин, А.И. Тепловой режим зданий / А.И. Еремкин, Т.И. Королева. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 363 с.
4. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин. – Изд. 4-е, преераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1973. – С. 287.

#### References

1. Estimation of humidity regime of multilayer wall structure in the annual cycle / S.V. Kornienko, N.I. Vatin, M.R. Petrichenko, A.S. Gorshkov // Construction of unique buildings and structures. – 2015. – № 6.
2. Malyavina, E.G. Building Thermophysics / E.G. Malyavina. – M.: MGSU, 2011.
3. Eremkin, I.A. Thermal regime of buildings / A.I. Eremkin, T.I. Koroleva. – Rostov n/D: Feniks, 2008. – 363 p.
4. Fokin, K. F. Construction heat engineering of building envelopes / K. F. Fokin. – Ed. 4th, Rev. and extra. – M.: Stroyizdat, 1973. – P. 287.

УДК 628.3

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

**Андреев Сергей Юрьевич**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Водоснабжение, водоотведение  
и гидротехника»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

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

**Сафронов Максим Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Водоснабжение, водоотведение  
и гидротехника»  
E-mail: mksafronov@rambler.ru

*Пензенский государственный  
технологический университет*  
Россия, 440039, г. Пенза,  
проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а / 11,  
тел. (8412) 49-54-41; факс (8412) 49-60-86

**Яхкин Михаил Ильич**,  
кандидат технических наук, ст. научный  
сотрудник отдела научных исследований  
E-mail: yah@sura.ru

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

**Andreev Sergey Yuryevich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Water supply, sewerage and  
hydraulic engineering»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

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

**Safronov Maxim Aleksandrovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Water supply, sewerage and  
hydraulic engineering»  
E-mail: mksafronov@rambler.ru  
*Penza State Technological University*

Russia, 440039, Penza,  
1A / 11 Baidukova / Gagarin St.,  
tel. (8412) 49-54-41; fax (8412) 49-60-86

**Yakhkind Michael Il'ich**,  
Candidate of Sciences, Senior Researcher of  
the Scientific Research department  
E-mail: yah@sura.ru

## НОВАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСТЕНОЧНОГО СЛОЯ ТРУБЧАТЫХ КАПЛЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД

С.Ю. Андреев, М.И. Яхкин, И.А. Гарькина, М.А. Сафронов

Приведены результаты теоретических исследований гидродинамических характеристик трубчатых гидродинамических каплеобразователей. Показано, что наиболее интенсивное перемешивание в линейных трубчатых гидродинамических устройствах происходит в пристеночной области потока, где в переходном подслое зарождаются элементарные турбулентные вихри, обуславливающие появление низкомасштабной составляющей турбулентных пульсаций скорости потока. Элементарные турбулентные вихри по планетарному механизму формируют турбулентные моли, обуславливающие появление крупномасштабной составляющей турбулентных пульсаций скорости потока. Турбулентные моли взаимодействуют с несущим их потоком жидкости и дрейфуют к его оси. Под действием прямого каскада энергии линейные размеры элементарных турбулентных вихрей уменьшаются и достигают критической величины  $\lambda_0$  (внутреннего масштаба турбулентности), в результате чего происходит диссипация содержащейся в них энергии. Получены математические зависимости, позволяющие определять величины пульсационных составляющих скорости потока  $\Delta u_\lambda$  и коэффициентов турбулентной диффузии в пристеночных и приосевых областях потока жидкости. Использование предложенной методики расчета позволит оптимизировать процесс эксплуатации и проектирования трубчатых гидродинамических каплеобразователей.

*Ключевые слова: элементарные турбулентные вихри, турбулентные моли, прямой каскад энергии, внутренний масштаб турбулентности, пульсационная составляющая скорости, коэффициент турбулентной диффузии*

## NEW CALCULATION METHOD OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF WALL LAYER OF TUBULAR DROP FORMERS USED IN TREATMENT OF OILY WASTE WATER

S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, I.A. Garkina, M.A. Safronov

The results of theoretical researches of hydrodynamic characteristics of the tubular hydrodynamic liquid drop formers are presented. It is shown that the most intensive mixing in the linear tubular hydrodynamic devices occurs in wall area of the flow where the elemental turbulent vortexes causing appearance of a small-scale component of flow speed turbulent pulsations are risen in the transition sublayer. The elemental turbulent vortexes form, by the planetary mechanism, the turbulent moles causing appearance of a large-scale component of flow speed turbulent pulsations. The turbulent moles interact with the liquid flow bearing them and drift to its axis. The linear dimensions of the elemental turbulent vortexes decrease under the influence of the direct cascade of energy and reach critical value  $r_0$  (internal scale of turbulence), a dissipation of energy containing in them occurs as a result of it. The mathematical dependences are obtained allowing to determine values of flow speed pulsation components  $\Delta v_\lambda$  and turbulent diffusion coefficients in wall and axial areas of the liquid flow. The use of the proposed calculation method allow to optimize processes of designing and operation of the tubular hydrodynamic drop formers.

*Keywords: elemental turbulent vortexes, turbulent moles, direct cascade of energy, internal scale of turbulence, speed pulsation component, turbulent diffusion coefficient*

В процессе добычи нефти образуются попутные сточные воды, основным загрязнителем которых являются нефтяные эмульсии. Для очистки нефтесодержащих сточных вод нефтепромыслов, как правило, используются механические методы. Механические методы предполагают технические приемы очистки: отстаивание, разделение эмульсий в поле действия центробежных вил, фильтрование сточных вод, содержащих нефтяные эмульсии, через твердый или жидкий фильтрующие слои, флотацию.

Флотаторы и фильтры не получили широкого распространения в практике очистки сточных вод нефтепромыслов ввиду сложности их эксплуатации. Наиболее широко в настоящее время как в качестве предварительной, так и в качестве окончательной ступени очистки нефтесодержащих сточных вод получил метод их отстаивания в безнапорных вертикальных или напорных горизонтальных резервуарах.

Эффективность процесса очистки нефтесодержащих сточных вод методом отстаивания напрямую зависит от дисперсного размера содержащихся в них эмульсий. Эффективному расслоению нефтесодержащих сточных вод в процессе их отстаивания препятствует эффект образования прочной «бронирующей» оболочки вокруг содержащихся в сточных водах каплях нефтяной эмульсии.

В образующейся на промыслах нефтепластовой воде содержатся твердые мелко-дисперсные частички (глины, гипса, песка и т.п.), адсорбирующиеся на поверхности капель нефтяной эмульсии, в результате чего образуются защитные оболочки, которые препятствуют слиянию и укрупнению этих капель при их взаимном столкновении (коалесценции). В процессе формирования защитной оболочки происходит непрерывное увеличение ее механической прочности.

При этом нефтяная эмульсия становится более устойчивой и происходит ее «старение». «Старение» нефтяной эмульсии в начальный период происходит весьма интенсивно. Со временем скорость этого процесса постепенно замедляется [1].

В практике очистки нефтесодержащих сточных вод с целью повышения эффективности отстаивания используется технологический прием их предварительной обработки в объемных или трубчатых гидродинамических каплеобразователях, позволяющий разрушить «бронирующие» оболочки нефтяных эмульсий. В объемных каплеобразователях столкновение и слияние (коалесценция) капель нефтяной эмульсии достигается путем ввода сточных вод в объем аппарата через сопла, направленные под различными углами друг к другу, или за счет турбулизации потока внутри аппарата механическими мешалками.

Более компактными и производительными, чем объемные каплеобразователи, являются трубчатые гидродинамические каплеобразователи. Трубчатые гидродинамиче-



ские каплеобразователи конструктивно выполняются в виде пакета труб расчетной длины и диаметра.

В трубчатых каплеобразователях разрушение «бронирующей» оболочки нефтяных эмульсий происходит под действием турбулентной пульсационной составляющей скорости. Наибольшую интенсивность турбулентная пульсационная составляющая скорости потока имеет в пристеночной области потока. Ее величина в соответствии с рекомендациями [1] может быть вычислена по эмпирической формуле

$$\Delta v_{\lambda}^3 = \frac{0,2v}{Re^{0,125}} \text{ м/с}, \quad (1)$$

где  $v$  – средняя скорость потока жидкости в трубчатом каплеобразователе, м/с;  $Re$  – критерий Рейнольдса.

Величина критерия Рейнольдса определяется по формуле

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр трубы каплеобразователя, м;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с.

Величину другого технологического параметра каплеобразователя – коэффициента турбулентной диффузии в пристеночной области потока  $D_T^3$  – в соответствии с рекомендациями [1] надлежит определять по эмпирической формуле

$$D_T^3 = \frac{0,0033dv}{Re^{0,125}} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (3)$$

Формулы (1) и (3) представляют собой экспериментальные (эмпирические) математические зависимости. Эмпирические математические зависимости дают наиболее точные результаты только в узких границах значений их параметров, которые соответствуют условиям проведения исходных экспериментов.

Наряду с эмпирическими математическими зависимостями могут быть получены теоретические математические зависимости, являющиеся теоретическим моделями, базирующимися на фундаментальных закономерностях материального мира и устанавливающими существенные, устойчивые и неслучайные связи между свойствами рассматриваемых объектов.

Получить теоретические математические зависимости возможно на основе анализа гипотез, описывающих особенности турбулентного потока жидкости [2, 3]. К таким гипотезам в частности относится предположение о том, что непосредственно в пристеночном слое турбулентного потока жидкости существует узкий слой толщиной  $\delta_*$ , в пределах которого решающую роль играет вязкость жидкости. Этот пристеночный слой принято называть вязким подслоем. В вязком подслое величина сил вязкого трения превышает значения сил инерции ( $Re_{\delta_*} < 1$ ), вследствие чего величины касательного напряжения силы вязкого трения  $\tau_*$  и градиента скорости  $G_*$  имеют постоянные значения. Они могут быть определены по формулам

$$G_* = \frac{2v}{R} = \frac{v_*^2}{\alpha\nu} = \text{const}, \text{ с}^{-1}; \quad (4)$$

$$\tau_* = \frac{F_T}{S} = \alpha\mu G_* = \text{const}, \text{ Н/м}^2, \quad (5)$$

где  $R$  – гидравлический радиус ( $R = \frac{1}{2}d$ ), м;  $v_*$  – динамическая скорость (скорость касательного напряжения), м/с;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий увеличение значения коэффициента кинематической вязкости пристеночного вязкого подслоя при

турбулентном режиме (при ламинарном режиме  $\alpha = 1$ );  $S$  – площадь контакта поверхности «жидкость – стенка трубы»,  $\text{м}^2$ ;  $F_T$  – величина силы трения, Н;  $\mu = \nu \rho$  – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с.

Величины динамической скорости  $v_*$  и коэффициента  $\alpha$  могут быть определены по формулам

$$v_* = v \sqrt{\frac{\lambda}{8}}; \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{64} \text{Re}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения.

Символ \* в величинах  $G_*$  и  $\tau_*$  обозначает, что рассматриваемые характеристики принадлежат вязкому пристеночному подслою.

Из (7) с учетом (2) и (6) имеем

$$\lambda = 64 \frac{\alpha v}{\nu d} = 16 \frac{\alpha v}{\nu R} \cdot \frac{v}{v},$$

откуда

$$G_* = \frac{2v}{R} = v^2 \frac{\lambda}{8} \cdot \frac{1}{\alpha v} = \frac{v_*^2}{\alpha v}.$$

Поскольку в вязком пристеночном подслое  $G_* = \text{const}$ , величина осредненной местной скорости меняется от нуля у стенки потока до значения  $\bar{u}_* = v_*$  на расстоянии  $y = \delta_*$  от стенки потока по линейному закону

$$\bar{u}_* = G_* y, \text{ м/с}. \quad (8)$$

К другой гипотезе, описывающей особенности турбулентного потока, относится предположение о том, что вязкий подслой граничит с переходным подслоем толщиной  $\delta_{**}$ . В переходном подслое выполняется условие  $\text{Re}_{\delta^*} > 1$ . В переходном подслое периодически зарождаются элементарные турбулентные вихри, имеющие масштаб  $\lambda_{**} = \delta_{**}$ . Турбулентные вихри, отрываются из переходного подслоя и уносятся течением, турбулизируя поток в его центральной части – турбулентном ядре, что обеспечивает поддержание устойчивого турбулентного режима.

Вязкий и переходный подслои вместе образуют вязкий слой. Толщину вязкого подслоя и переходного подслоя можно определить по формуле

$$\delta_* = \delta_{**} = R \sqrt{\frac{\lambda}{32}}, \text{ м}. \quad (9)$$

Наряду с вихревой турбулентностью, развивающейся в объеме жидкости, различают и волновую турбулентность, наблюдаемую на поверхности жидкости. Процессы рассеивания (диссипации) энергии для волновой турбулентности изучены более полно, чем для вихревой. Возникающая на поверхности жидкости волна имеет гладкую поверхность, длину волны  $l$ , м, и определенную частоту колебаний  $\nu_l$ , обуславливающую уровень ее энергии (рис. 1,а).

а

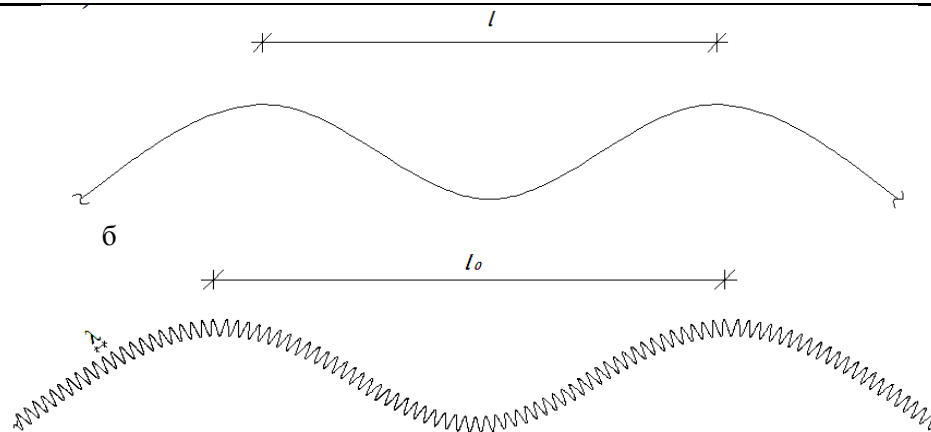


Рис. 1. Схема стадий процесса волнового движения при уменьшении энергии волны:  
 а – свободная волна, обладающая максимумом энергии;  
 б – волна, снизившая свою энергию в процессе образования на ее поверхности ряби

Через некоторое время на поверхности волны возникает рябь – колебания, имеющие более высокую частоту  $\nu_\lambda$  (а следовательно, и энергию) и меньшую длину волны  $\lambda$  (рис. 1,б). Эти колебания принято называть низкомасштабной турбулентностью. Процессы передачи энергии от текущей волны (крупномасштабной турбулентности) к низкомасштабной турбулентности принято называть «прямым каскадом» энергии.

В ходе функционирования прямого каскада частота колебаний, а следовательно, и энергия низкомасштабной турбулентности увеличиваются, а длина волны ряби  $\lambda$  (низкомасштабной турбулентности) – уменьшается. При достижении некоторого критического значения длины волны  $\lambda_0$  вызывающие ее силы инерции по величине сравниваются с силами трения, в результате чего произойдет рассеивание содержащейся в ней энергии в окружающую среду и превращение ее в теплоту.

В результате функционирования обратного каскада энергии частота несущей волны уменьшается, ее энергия снижается, а масштаб (длина волны  $l$ ) увеличивается. Можно предположить, что механизм рассеивания энергии при вихревой турбулентности осуществляется по тем же принципам, что и при волновой турбулентности.

Возникающие в переходном слое элементарные турбулентные вихри, имеющие масштаб  $\lambda_{**}$ , обладают некоторым моментом вращательного движения  $M_\lambda = \lambda_{**} \nu_* \Delta m$ , которого до их возникновения не было в потоке. По закону сохранения момента количества движения образовавшиеся элементарные вихри должны прийти в движение вокруг некоторого центра в направлении, противоположном направлению своего вращения, в результате чего образуется турбулентный моль, имеющий масштаб  $l$ , м, скорость орбитального движения  $u_l$ , м/с, и момент количества движения  $M_l = l u_l \Delta m$  (рис. 2). Образование турбулентного моля позволяет скомпенсировать возникший момент вращательного движения  $M_\lambda = \lambda_{**} \nu_* \Delta m$ , при этом

$$M_\lambda = -M_l;$$

$$\lambda_{**} \nu_* \Delta m = -l u_l \Delta m;$$

$$\lambda_{**} \nu_* = -l u_l. \quad (10)$$

Длина орбиты вращения турбулентных вихрей будет определять размер крупномасштабной турбулентности (турбулентного моля)  $l$ .

Величина одиночного турбулентного вихря будет определять размер низкомасштабной турбулентности  $\lambda_{**}$ .

В соответствии с планетарной гипотезой механизма вихревой турбулентности образовавшиеся турбулентные моли будут взаимодействовать с несущим их потоком жидкости и испытывать действия силы Магнуса, в результате чего происходит дрейф турбулентных молей к оси потока.

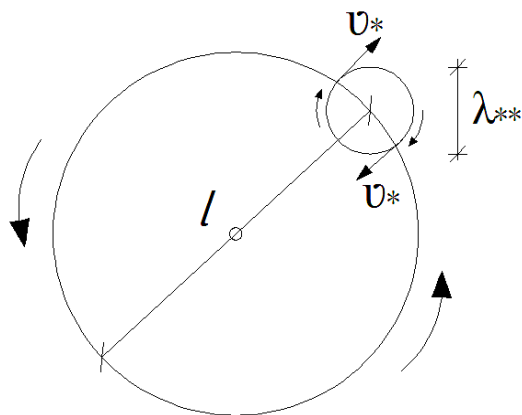


Рис. 2. Схема образования турбулентного моля (планетарного механизма вихревой турбулентности)

Под действием прямого каскада энергии размеры элементарного турбулентного вихря  $\lambda$  (масштаб низкомасштабной турбулентности) будут уменьшаться, а величина заключенной в нем энергии – увеличиваться. При уменьшении размеров элементарного турбулентного вихря до критической величины  $\lambda_0$  произойдет рассеивание содержащейся в нем энергии в окружающую среду.

Обратный каскад энергии обеспечивает увеличение длины орбитали турбулентного моля  $l$  (масштаб крупномасштабной турбулентности) и снижение частоты планетарного вращения, а следовательно, и энергии высокомасштабной турбулентности.

Минимальный размер турбулентных вихрей  $\lambda_0$ , при котором произойдет диссипация содержащейся в них энергии, принято называть внутренним масштабом турбулентности.

Размер  $\lambda_0$  зависит от величины удельной секундной диссипации энергии потока

$\varepsilon_T = \frac{1}{2} v_* G_*^2, \text{ м}^2/\text{с}^3$ , от вязкости и плотности среды, в которой происходит рассеивание энергии (величины кинематического коэффициента вязкости среды  $\nu$ ) [2].

Взаимодействуя с потоком жидкости, турбулентные моли вызывают крупномасштабные пульсации потока. Турбулентные вихри обуславливают появление низкомасштабной составляющей пульсации скорости турбулентного потока. В процессе каскада энергии турбулентных вихрей минимального масштаба (нулевого масштаба  $\lambda_0$ ) происходит диссипация заключенной в них энергии и возникают турбулентные пульсации скорости потока нулевого масштаба. Эти пульсации скорости потока будут иметь следующие характеристики:

- 1) масштаб турбулентных пульсаций (нулевого масштаба)  $\lambda_0, \text{ м}$ ;
- 2) скорость турбулентных пульсаций нулевого масштаба  $\Delta v_{\lambda_0}, \text{ м/с}$ ;
- 3) градиент скорости турбулентных пульсаций нулевого масштаба  $G_{\lambda_0}, \text{ с}^{-1}$ .

Характеристики пульсаций скорости турбулентного потока нулевого масштаба  $\lambda_0$  могут быть описаны замкнутой системой уравнений, выведенной в соответствии с представлениями теории изотропной турбулентности А.Н. Колмогорова [2]:

$$\begin{cases} \lambda_0 = \sqrt[4]{\frac{\nu^3}{\varepsilon_T}} & \text{м}; \\ \Delta v_{\lambda_0} = \sqrt[4]{\varepsilon_T \nu} & \text{м/с}; \\ G_{\lambda_0} = \sqrt{\frac{\varepsilon_T}{\nu}} & \text{с}^{-1}; \end{cases} \quad (11)$$

с учетом  $\varepsilon_T = \frac{1}{2} v_*^2 G_*$ ;  $G_* = \frac{v_*^2}{\alpha v}$ ;  $\frac{v_*}{G_*} = \delta_*$  система уравнений (11) может быть преобразована следующим образом:

$$\lambda_0 = \sqrt[4]{\frac{v^3}{\varepsilon_T}} = \sqrt[4]{\frac{v^3}{\frac{1}{2} v_*^2 G_*}} = \sqrt[4]{\frac{2v^3}{v_*^2 \frac{v_*^2}{\alpha v}}} = \frac{v}{v_*} \frac{v_*}{v_*} \frac{\alpha}{\alpha} \sqrt[4]{2\alpha} = \frac{v_*}{G_*} \sqrt[4]{\frac{2}{\alpha^3}} = \delta_* \sqrt[4]{\frac{2}{\alpha^3}} \text{ м.} \quad (12)$$

$$\Delta v_{\lambda_0} = \sqrt[4]{\varepsilon_T v} = \sqrt[4]{\frac{1}{2} v_*^2 G_* v} = \sqrt[4]{\frac{1}{2} v_*^2 \frac{v_*^2}{\alpha v} v} = v_* \sqrt[4]{\frac{1}{2\alpha}} \text{ м/с.} \quad (13)$$

$$G_{\lambda_0} = \sqrt{\frac{\varepsilon_T}{v}} = \sqrt{\frac{1}{2} v_*^2 G_* \frac{1}{v} \frac{\alpha}{\alpha}} = G_* \sqrt{\frac{\alpha}{2}} \text{ с}^{-1}. \quad (14)$$

Таким образом, имеем систему уравнений, описывающую турбулентные пульсации скорости нулевого масштаба:

$$\begin{cases} \lambda_0 = \delta_* \sqrt[4]{\frac{2}{\alpha^3}} \text{ м;} \\ \Delta v_{\lambda_0} = v_* \sqrt[4]{\frac{1}{2\alpha}} \text{ м/с;} \\ G_{\lambda_0} = G_* \sqrt{\frac{\alpha}{2}} \text{ с}^{-1}. \end{cases} \quad (15)$$

Турбулентные вихри, зарождающиеся в переходном слое и обуславливающие появление низкомасштабной составляющей пульсации скорости в пристенных областях потока, имеют значение величины коэффициента кинематической вязкости  $\nu_* = \alpha v$ ; их характеристики могут быть описаны системой уравнений

$$\begin{cases} \lambda_\delta = \sqrt[4]{\frac{v_*^3}{\varepsilon_T}} = \sqrt[4]{\frac{\alpha^3 v^3}{\varepsilon_T}} \text{ м;} \\ \Delta v_\lambda = \sqrt[4]{\varepsilon_T v_*} = \sqrt[4]{\varepsilon_T \alpha v} \text{ м/с;} \\ G_\lambda = \sqrt{\frac{\varepsilon_T}{v_*}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_T}{\alpha v}} \text{ с}^{-1}. \end{cases} \quad (16)$$

С учетом  $\varepsilon_T = \frac{1}{2} v_*^2 G_*$ ;  $G_* = \frac{v_*^2}{\alpha v}$ ;  $\frac{v_*}{G_*} = \delta_*$  система уравнений (16) может быть преобразована следующим образом:

$$\lambda_\delta = \sqrt[4]{\frac{v_*^3}{\varepsilon_T}} = \sqrt[4]{\frac{\alpha^3 v^3}{\frac{1}{2} v_*^2 G_*}} = \sqrt[4]{\frac{2\alpha^3 v^3}{v_*^2 \frac{v_*^2}{\alpha v}}} = \frac{\alpha v}{v_*} \frac{v_*}{v_*} \sqrt[4]{2} = \frac{v_*}{G_*} \sqrt[4]{2} = \delta_* \sqrt[4]{2} \text{ м.} \quad (17)$$

$$\Delta v_\lambda = \sqrt[4]{\varepsilon_T v_*} = \sqrt[4]{\frac{1}{2} v_*^2 G_* \alpha v} = \sqrt[4]{\frac{1}{2} v_*^2 \frac{v_*^2}{\alpha v} \alpha v} = v_* \sqrt[4]{\frac{1}{2}} \text{ м/с.} \quad (18)$$

$$G_\lambda = \sqrt{\frac{\varepsilon_T}{v_*}} = \sqrt{\frac{1}{2} v_*^2 G_* \frac{1}{\alpha v}} = G_* \sqrt{\frac{1}{2}} \quad \text{с}^{-1}. \quad (19)$$

Таким образом, имеем систему уравнений:

$$\begin{cases} \lambda = \delta_* \sqrt[4]{2} \quad \text{м}; \\ \Delta v_\lambda = v_* \sqrt[4]{\frac{1}{2}} \quad \text{м/с}; \\ G_\lambda = G_* \sqrt{\frac{1}{2}} \quad \text{с}^{-1}. \end{cases} \quad (20)$$

Существующие эмпирические данные свидетельствуют о том, что наиболее интенсивное перемешивание в линейных трубчатых каплеобразователях происходит в пристеночной области потока. Эффективность перемешивания жидкости характеризуется величиной коэффициента турбулентной диффузии  $D_T$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

За относительное перемещение двух микрообъемов жидкости на расстояние  $l$ , м, друг от друга в процессе перемешивания в турбулентном потоке ответственны турбулентные пульсации скорости  $\Delta v_l$ , имеющие масштаб  $\lambda \leq l$ , так как при  $\lambda \geq l$  оба микрообъема жидкости будут перемещаться как единое целое. В связи с этим величина коэффициента турбулентной диффузии в пристеночной области трубчатого смесителя может быть определена как

$$D_{T\lambda}^T = 2\lambda \Delta v_\lambda \quad \text{м}^2/\text{с}. \quad (21)$$

С учетом (16) можно записать:

$$D_{T\lambda}^T = 2\lambda \Delta v_\lambda = 2 \sqrt[4]{\frac{\alpha^3 v^3}{\varepsilon_T}} \cdot \sqrt[4]{\varepsilon_T \alpha v} = 2\alpha v. \quad (22)$$

В приосевой области потока в спектре турбулентных пульсаций скорости будут преобладать турбулентные пульсации нулевого масштаба. В этом случае

$$D_{T\lambda_0}^T = 2\lambda_0 v_{\lambda_0} = 2 \sqrt[4]{\frac{v^3}{\varepsilon_T}} \cdot \sqrt[4]{\varepsilon_T v} = 2v. \quad (23)$$

Таким образом, величина коэффициента турбулентной диффузии в пристеночной области потока  $D_{T\lambda}^T$  будет в  $\alpha$  раз превышать величину коэффициента турбулентной диффузии в приосевой области потока:

$$D_{T\lambda}^T = \alpha D_{T\lambda_0}^T. \quad (24)$$

Величины низкомасштабных турбулентных пульсаций скорости потока в пристеночной области превышают величину турбулентных пульсаций скорости нулевого масштаба в приосевой области потока в

$$\frac{\Delta v_\lambda}{\Delta v_{\lambda_0}} = v_* \sqrt[4]{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{v_*} \sqrt[4]{2\alpha} = \sqrt[4]{\alpha} \quad \text{раз}.$$

Таким образом,

$$\Delta v_\lambda = \sqrt[4]{\alpha} \Delta v_{\lambda_0}. \quad (25)$$

Масштаб пульсаций  $\lambda$ , имеющих турбулентную составляющую пульсаций скорости потока  $\Delta v_\lambda$ , связан с числом Рейнольдса соотношением

$$Re_\lambda = \frac{\lambda \Delta v_\lambda}{\nu} . \quad (26)$$

Для низкомасштабных турбулентных пульсаций скорости потока в пристеночной области число Рейнольдса в соответствии с (20) определится как

$$Re_{\lambda\delta} = \frac{\lambda_\delta \Delta v_{\lambda\delta}}{\nu} = \frac{\delta_* \sqrt[4]{2} \cdot v_* \sqrt[4]{\frac{1}{2}}}{\nu} = \frac{\delta_* v_*}{\nu} = \alpha . \quad (27)$$

Для турбулентных пульсаций скорости потока нулевого масштаба приосевой области потока число Рейнольдса в соответствии с (16) определится как

$$Re_{\lambda_0} = \frac{\lambda_0 \Delta v_{\lambda_0}}{\nu} = \frac{\delta_* \sqrt[4]{\frac{2}{\alpha^3}} \cdot v_* \sqrt[4]{\frac{1}{2\alpha}}}{\nu} = \frac{\delta_* v_*}{\nu} \frac{1}{\alpha} = \alpha \cdot \frac{1}{\alpha} = 1 . \quad (28)$$

Из (27) и (28) следует, что величина числа Рейнольдса  $Re_\lambda$  для низкомасштабных турбулентных пульсаций скорости в пристеночной области потока будет превышать величину числа Рейнольдса  $Re_{\lambda_0}$  для турбулентных пульсаций скорости нулевого масштаба в приосевой области потока в  $\alpha$  раз, при этом число Рейнольдса  $Re_{\lambda_0} = 1$ .

$$Re_{\lambda\delta} = \alpha Re_{\lambda_0} = \alpha . \quad (29)$$

В таблице представлены значения величин пульсационной составляющей скорости потока  $\Delta v_\lambda^3$ , вычисленные по формуле (1), и  $\Delta v_\lambda^T$ , вычисленные по формуле (18), а также значения коэффициентов турбулентной диффузии в пристеночной области потока  $D_T^3$ , вычисленные по формуле (3), и  $D_T^T$ , вычисленные по формуле (22) в трубчатом гидродинамическом каплеобразователе диаметром  $d=0,05$  м с величиной эквивалентной шероховатости  $\Delta=0,1 \cdot 10^{-3}$  м.

Величины коэффициентов гидравлического трения  $\lambda$  в переходной зоне определяли по формуле А.Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{\alpha} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} , \quad (30)$$

в области квадратичного закона сопротивления шероховатых русел – по формуле Л. Прандтля

$$\lambda_{\text{кв}} = \frac{0,25}{\left( \lg 3,7 \frac{d}{\Delta} \right)^2} = \text{const} . \quad (31)$$

Значения числа Рейнольдса в критической точке перехода турбулентного режима в области квадратичного закона сопротивления определяли по формуле

$$R_{\text{кр}} = \frac{64}{\sqrt{\lambda_{\text{кв}}}} \frac{d}{\Delta} . \quad (32)$$

Величина средней скорости потока $v$ , м/с	1	2	3	4,2238	5	6	7
Значение числа Рейнольдса $Re$	49505	99010	148515	209099	247525	297030	346535
Величина коэффициента $\lambda$	0,0265	0,0250	0,0245	0,0234	0,0234	0,0234	0,0234
Величина динамической скорости $v^*$	0,05757	0,1119	0,1660	0,2285	0,2705	0,3246	0,3787
Величина коэффициента $\alpha$	20,5062	38,7429	56,8360	76,5188	90,5806	108,6967	126,8129
Величина $\Delta v_{\lambda}^{\circ}$ , м/с	0,0518	0,0950	0,1354	0,1827	0,2117	0,2484	0,2842
Величина $\Delta v_{\lambda}^T$ , м/с	0,0484	0,0941	0,1396	0,1921	0,2275	0,2730	0,3184
Относительная погрешность вычислений $\Delta v_{\lambda}$ , %	6,6	1,0	3,0	4,9	6,9	9,0	10,7
Величина коэффициента $D_T^{\circ}$ , м <sup>2</sup> /с	0,00004272	0,00007835	0,0001117	0,0001507	0,0001747	0,0002049	0,0002345
Величина коэффициента $D_T^T$ , м <sup>2</sup> /с	0,00004142	0,00007826	0,0001148	0,0001545	0,0001830	0,0002196	0,0002562
Относительная погрешность вычислений $D_T$ , %	3,0	0,1	2,7	2,5	4,5	6,7	8,5

В соответствии с данными [1] наибольший эффект разрушения нефтяных эмульсий наблюдается при работе трубчатых гидродинамических каплеобразователей в области значений чисел Рейнольдса  $Re=100000-150000$ .

Приведенные в таблице данные показывают, что величина относительной погрешности значений пульсационных скоростей, вычисленных по эмпирической формуле (1) и предложенной нами теоретической формуле (18) для трубчатого гидродинамического устройства, работающего при оптимальном диапазоне скоростей  $v=2-3$  м/с, не превышает значения 3,0 %, а величина оптимальной погрешности значений коэффициентов турбулентной диффузии, вычисленных по эмпирической формуле (3) и теоретической формуле (22), при этом не превышает значения 2,7%.

Таким образом, предлагаемая нами методика расчета трубчатых гидродинамических каплеобразователей обладает более точными прогнозирующими свойствами и позволяет оптимизировать процесс их работы при более широком диапазоне изменения технологических параметров.

#### Список литературы

1. Адельшин, А.Б. Интенсификация очистки нефтесодержащих сточных вод на основе применения струйно-отстойных аппаратов / А.Б. Адельшин, Н.И. Потехин. – Казань: КГАСА, 1997. – 207 с.



2. Андреев, С.Ю. Новая методика гидравлического расчета трубчатых смешивательных устройств, работающих в области квадратичного закона сопротивления / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №2. – С.132–140.

3. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2000. – 576 с.

#### References

1. Adelshin A. B. Intensification of treatment oil-containing waste water on the basis of use of the jet-settling mechanisms / Adelshin A. B. N. And. Potekhin. – Kazan: KGAS, 1997. – 207 p.

2. Andreev, S.Yu. New method of hydraulic calculation of a tubular mixing device, working in the area of quadratic law of resistance / S.Yu. Andreev, I.A. Garkina, V.A. Knyazev // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 2. – P. 132–140.

3. Prandtl, L. Hydroaeromechanics / L. Prandtl. – Izhevsk: SIC Regular and chaotic dynamics, 2000. – 576 p.

УДК 628.3

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

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

**Андреев Сергей Юрьевич,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Водоснабжение, водоотведение  
и гидротехника»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

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

*Пензенский государственный  
технологический университет*  
Россия, 440039, г. Пенза,  
проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а / 11,  
тел. (8412) 49-54-41; факс (8412) 49-60-86

**Яхкин Михаил Ильич,**  
кандидат технических наук, ст. научный  
сотрудник отдела научных исследований  
E-mail: yah@sura.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Andreev Sergey Yuryevich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Water supply, sewerage and  
hydraulic engineering»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

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

*Penza State Technological University*

Russia, 440039, Penza,  
1A / 11 Baidukova / Gagarin St.,  
tel. (8412) 49-54-41; fax (8412) 49-60-86

**Yakhkind Michael Il'ich,**  
Candidate of Sciences, Senior Researcher of  
the Scientific Research department  
E-mail: yah@sura.ru

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИН МЕСТНЫХ ОСРЕДНЕННЫХ СКОРОСТЕЙ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ТРУБЧАТОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

С.Ю. Андреев, М.И. Яхкин, И.А. Гарькина

Приведены результаты теоретических исследований гидродинамических закономерностей распределения величин местных осредненных скоростей турбулентного потока жидкости в поперечном сечении трубчатого гидродинамического смесительного устройства.

Показано, что для описания гидродинамических закономерностей турбулентного потока жидкости может быть использован параболический закон изменения величин местной скорости движения жидкости, применяемый при ламинарном движении, с введением поправочных коэффициентов  $A=\beta$  и  $B=2\beta-1$ . Получены математические зависимости, позволяющие определить величину градиента скорости в вязком слое  $G_*$ , среднюю величину градиента скорости в переходном подслое  $G_{**}$ , величину градиента скорости на границе переходного слоя  $G_{**}$ , значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\gamma$ , характеризующих величины коэффициентов кинематической вязкости в вязком подслое и переходном подслое, коэффициента  $\beta$ , характеризующего уменьшение величины местной осредненной скорости на оси потока. Выведены математические зависимости, позволяющие вычислить величину осредненной местной скорости турбулентного потока жидкости на границе переходного подслоя. Использование предложенной методики расчета позволит оптимизировать процессы проектирования и эксплуатации трубчатых смесительных устройств в турбулентном режиме движения жидкости.

*Ключевые слова: вязкий подслой, переходных подслоя, градиент скорости, касательные напряжения, критическая точка турбулентного режима*

## HYDRODYNAMIC REGULARITIES OF DISTRIBUTION OF LOCAL AVERAGED SPEED VALUES OF TURBULENT LIQUID FLOW IN CROSS-SECTION OF TUBULAR HYDRODYNAMIC DEVICE

S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, I.A. Garkina

The results of theoretical researches of hydrodynamic regularities of distribution of local averaged speed values of the turbulent liquid flow in a cross-section of the tubular hydrodynamic mixing device are presented.

It is shown that the parabolic law of change of local liquid motion speed values applied at laminar motion can be used for the description of hydrodynamic regularities of the turbulent liquid flow with introduction of correction factors  $A=\beta$  and  $B=2\beta-1$ . Mathematical dependences are obtained allowing to determine speed gradient value in the viscous sublayer  $G_*$ , average of speed gradient in the transition sublayer  $G_{**}$ , speed gradient value on the transition sublayer border  $G_{r**}$ , values of coefficients  $\alpha$  and  $\gamma$  characterizing values of kinematic viscosity coefficients in the viscous sublayer and the transition sublayer, coefficient  $\beta$  characterizing decrease of local averaged speed value from the flow axis. Mathematical dependences are deduced allowing to calculate averaged local speed value of the turbulent liquid flow on the viscous sublayer border. The use of the proposed calculation method allow to optimize processes of designing and operation of the tubular mixing devices in the turbulent mode of liquid flow.

*Keywords:* viscous sublayer, transition sublayer, speed gradient, tangential tensions, critical point of turbulent mode

В практике инженерного расчета трубчатых гидродинамических смесительных устройств, используемых в технологических процессах реагентной очистки природных и сточных вод, возникают две основные задачи: определение величины потерь напора по длине и установление распределения местных осредненных скоростей потока по поперечному сечению устройства. Как величина потерь напора по длине, так и распределение местных усредненных скоростей потока могут сильно меняться в зависимости от режима движения потока жидкости. Наиболее характерным в практике использования трубчатых гидродинамических смесительных устройств является развитый турбулентный режим движения потока в области квадратичного закона сопротивления шероховатых русел, при котором происходит наиболее интенсивное перемешивание жидкости под действием пульсаций скоростей и давлений в процессе ее движения.

Возникновение турбулентности в потоке жидкости, движущейся в трубчатом смесительном устройстве, имеющем круглое сечение диаметром  $d$ , м (радиус  $r_0 = \frac{1}{2}d$

и гидравлический радиус  $R = \frac{1}{2}r_0$ , м), приводит к повышению гидравлического сопротивления (величины гидравлического трения  $\lambda$ ) и уменьшению величины местной осредненной скорости на оси потока  $\bar{u}_{\max}$  относительно аналогичных характеристик ламинарного потока, что может быть учтено введением поправочных коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \alpha, \quad (1)$$

$$\bar{u}_{\max} = 2\nu\beta, \text{ м/с}, \quad (2)$$

где  $\text{Re} = \frac{\nu d}{\nu}$  – критерий Рейнольдса;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\nu$  – средняя скорость движения потока жидкости,  $\text{м/с}$ .

Величина коэффициента  $\alpha$  может быть определена по формуле

$$\alpha = \frac{\lambda}{16} \frac{\nu R}{\nu} = \frac{igR^2}{2\nu\nu}, \quad (3)$$

где  $i$  – величина гидравлического уклона;  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Как при ламинарном режиме движения жидкости, так и при турбулентном режиме в пристеночной области трубчатого гидродинамического смесителя формируется вязкий подслои жидкости, имеющий толщину  $\delta_*$ , в пределах которого местная скорость потока изменяется по линейному закону от нуля у стенки до значения  $u_* = \nu_*$  на расстоянии  $y = \delta_*$  от стенки трубы. Движение жидкости в этом вязком потоке, при котором число Рейнольдса  $Re_\delta$  меньше единицы, немецкий физик Л. Прандтль назвал ползущим течением.

Величина касательного напряжения силы продольного внутреннего трения  $\tau_*$  в этом подслое имеет постоянную величину и определяется по формуле

$$\tau_* = \frac{F_T}{s} = \mu_* G_* = \nu_*^2 \rho, \text{ Н/м}^2, \quad (4)$$

где  $F_T$  – величина силы трения, м;  $s$  – площадь раздела фаз «жидкость – стенка трубы»,  $\text{м}^2$ ;  $\mu_* = \nu \rho$  – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с;  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\nu_*$  – динамическая скорость (скорость касательного напряжения), м/с.

Величина динамической скорости вычисляется по формуле

$$\nu_* = \sqrt{\frac{\tau_*}{\rho}} = \sqrt{iRg} = \nu \sqrt{\frac{\lambda}{8}}, \text{ м/с}. \quad (5)$$

Из формулы (4) следует, что величина градиента скорости в вязком пристеночном слое будет постоянной величиной (поскольку  $\tau_* = \text{const}$ ). Она может быть определена по формуле

$$G_* = \frac{\nu_*}{\delta_*} = \frac{2\nu}{R} = \frac{\nu_*^2}{\nu} = \frac{\nu_*^2}{\alpha\nu} = \frac{\nu_*^2}{\nu + \nu_T}, \text{ с}^{-1}, \quad (6)$$

где  $\nu_T$  – кинематический коэффициент турбулентной вязкости (коэффициент Буссинекса),  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Символ \* в  $\tau_*$ ;  $G_*$ ;  $\nu_*$ ;  $\delta_*$ ;  $\mu_*$ ;  $\nu_*$  обозначает, что рассматриваемые характеристики принадлежат к вязкому пристеночному подслою [1]. Толщина вязкого пристеночного подслоя может быть определена по формуле

$$\delta_* = R \sqrt{\frac{\lambda}{64}}, \text{ м}. \quad (7)$$

Для вязкого пристеночного подслоя будет справедливо равенство

$$\nu_*^2 = \frac{\tau_*}{\rho} = \alpha\nu G_* = (\nu + \nu_T) G_*, \text{ м}^2/\text{с}^2. \quad (8)$$

Значение величины коэффициента кинематической турбулентной вязкости (коэффициента Буссинекса) в пристеночном подслое может быть определено как

$$\nu_T = \frac{\nu_*^2}{G_*} - \nu, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (9)$$

Считается, что для продольного однородного течения при любом режиме движения жидкости справедливы линейные законы распределения величины касательных напряжений  $\tau_r$  и величины градиента скоростей  $G_r$  по текущему радиусу  $r$  живого сечения [2].

$$\tau_r = \tau_* \left(1 - \frac{y}{r_0}\right) = \tau_* \left(\frac{r_0 - y}{r_0}\right) = \tau_* \frac{r}{r_0}, \text{ Н/м}^2. \quad (10)$$

$$G_r = G_* \left(1 - \frac{y}{r_0}\right) = G_* \left(\frac{r_0 - y}{r_0}\right) = G_* \frac{r}{r_0}, \text{ с}^{-1}. \quad (11)$$

Формулу для определения величины местной скорости потока  $u_r$  можно получить из уравнения (11) с учетом (6)

$$du_r = -G_* \frac{r}{r_0} dr, \text{ м/с}, \quad (12)$$

откуда

$$u_r = \int_0^{r_0} -G_* \frac{r}{r_0} dr = \int_0^{r_0} -\frac{2\nu}{R} \frac{r}{r_0} dr = \int_0^{r_0} -\frac{4\nu}{r_0^2} r dr = -\frac{2\nu}{r_0} r^2 + C.$$

Постоянная интегрирования  $C$  может быть определена из условия при  $r_0$  величина  $u_r=0$ , тогда  $C = \frac{2\nu}{r_0^2} r_0^2$ , откуда

$$u_r = \frac{2\nu}{r_0^2} (r_0^2 - r^2) = 2\nu \left( 1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right), \text{ м/с}. \quad (13)$$

Формула (13) была получена английским физиком и математиком Джорджем Габриэлем Стоксом для описания параболического закона изменения величины местной скорости движения жидкости  $u_r$  в поперечном сечении круглой трубы при ламинарном движении жидкости [2].

Ламинарный режим течения жидкости переходит в турбулентный при увеличении средней скорости потока жидкости  $\nu$  в критической точке  $Re_{кр}$ . С увеличением значения средней скорости потока жидкости  $\nu$  величина коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  будет уменьшаться, что в соответствии с формулой (7) обуславливает уменьшение толщины вязкого пристеночного подслоя  $\delta_*$ . При некотором значении  $\delta_*$  толщина вязкого пристеночного подслоя будет сопоставима с величиной, эквивалентной шероховатости русла потока  $\Delta$ . В этом случае возникает динамическое сопротивление дальнейшему сжатию вязкого пристеночного подслоя, что приводит к увеличению значения коэффициента кинематической вязкости в  $\alpha$  раз. В формулу (6), соответствующую турбулентному режиму движения жидкости, вводится коэффициент  $\alpha$ , представляющий собой множитель, который учитывает увеличение вязкости пристеночного подслоя ( $\nu_* = \alpha\nu = \nu + \nu_T$ ), происходящее из-за появления турбулентной составляющей движения жидкости (турбулентной вязкости, величина которой определяется коэффициентом  $\nu_T$ ). В переходном подслое, в отличие от вязкого пристеночного подслоя, величина сил инерции превышает значение сил вязкого трения ( $Re_\delta > 1$ ), удельная кинетическая энергия элементарных струек  $E_k$ ,  $m^2/c^2$ , превышает величину удельной массовой диссипации энергии  $\varepsilon_R$ ,  $m^2/c^2$  (удельную работу сил вязкого трения), что обуславливает протекание процессов освобождения накопленной в вязком подслое упругой потенциальной энергии, в результате чего здесь зарождаются элементарные турбулентные вихри и происходит уменьшение величины касательного напряжения силы вязкого трения с  $\tau_*$  до  $\tau_{**}$ . Средняя величина градиента скорости в переходном подслое достигает величины  $G_{**}$ . Градиент скорости на границе переходного подслоя (вязкого слоя) при  $y=2\delta_*$  и  $r=r_0-2\delta_*$  имеет величину  $G_{r**}$ .

Таким образом, для корректного описания турбулентного режима движения жидкости в формуле (12) вместо значения  $G_*$  нужно принимать величину  $G_{r**}$  и интервал измерения текущего радиуса  $0 \leq r \leq r_0 - 2\delta_*$ .

Закон распределения местных осредненных скоростей турбулентного потока по радиусу трубы круглого сечения  $\bar{u}_r = f(r)$  должен обеспечить условие равенства суммы элементарных расходов  $dQ$  в кольцевых сечениях площадью  $d\omega$ , имеющих толщину  $dr$

и удаленных от оси потока на расстоянии  $r$ , тогда  $Q = \int_0^{r_0} \bar{u}_r d\omega$ :

$$Q = \int_0^{r_0} f(r) 2\pi r dr, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (14)$$

Получить корректные результаты можно, подставляя в формулу (13) корректирующие коэффициенты  $A$  и  $B$ :

$$\bar{u}_r = 2\nu \left( A - B \frac{r^2}{r_0^2} \right).$$

Величина коэффициента  $A$  может быть определена из условия  $r_0=0 \quad u_r=u_{\max}=2\nu\beta$ , откуда  $A=\beta$ .

Значение коэффициента  $B$  может быть определено из условия

$$Q = \int_0^{r_0} 2\nu \left( \beta - B \frac{r^2}{r_0^2} \right) 2\pi r dr = \nu\pi r_0^2, \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$\int_0^{r_0} 2\nu \left( \beta - B \frac{r^2}{r_0^2} \right) 2\pi r dr = \int_0^{r_0} 4\pi\nu\beta r dr - \int_0^{r_0} \frac{4\pi\nu B}{r_0^2} r^3 dr =$$

$$= 4\pi\nu\beta \frac{r_0^2}{2} - \frac{4\pi\nu B}{r_0^2} \frac{r_0^4}{4} = \pi r_0^2 \nu (2\beta - B),$$

откуда

$$\pi r_0^2 \nu (2\beta - B) = \pi \nu r_0^2;$$

$$2\beta - B = 1;$$

$$B = 2\beta - 1.$$

Таким образом, функция распределения местных осредненных скоростей турбулентного потока по радиусу  $r$  примет вид

$$\bar{u}_r = 2\nu \left[ \beta - (2\beta - 1) \frac{r^2}{r_0^2} \right], \text{ м/с}. \quad (15)$$

На рис. 1 представлены профили распределенных местных скоростей  $u_r$  по радиусу трубы круглого сечения  $r$  для ламинарного и турбулентного потоков при одном и том же расходе  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$  (средней скорости потока  $\nu$ ), но разных значениях коэффициентов кинематической вязкости  $\nu_{\text{л}}$  и  $\nu_{\text{т}}$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ , пропускаемых жидкостей, построенные по формулам (13) и (15).

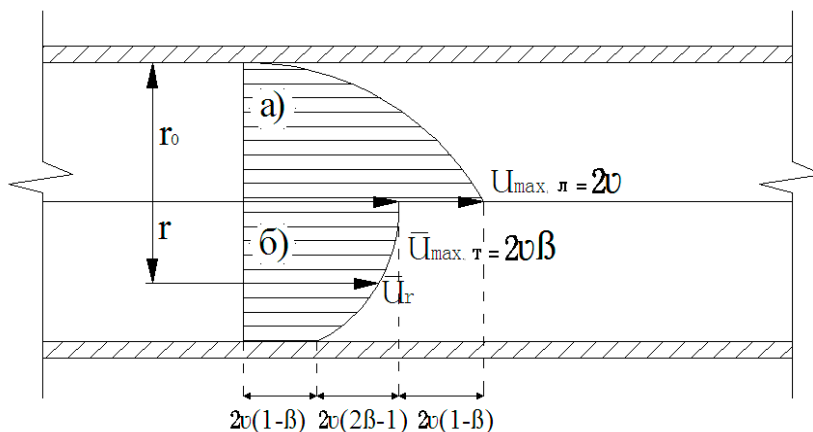


Рис. 1. Профили распределения местных скоростей потока  $u_r$  по текущему радиусу трубы круглого сечения  $r$ , построенные по формулам (13) и (15)

Если сравнивать кривые распределения величин местных скоростей потока  $u_r$  по текущему радиусу  $r$  в ламинарном  $u_r$  и турбулентном  $\bar{u}_r$  потоках (рис.1), то можно обнаружить существенные различия этих кривых.

Максимальная местная скорость на оси ламинарного потока имеет величину  $u_{\max \text{ л}} = 2\nu$ , максимальная осредненная скорость на оси турбулентного потока имеет величину  $\bar{u}_{\max \text{ т}} = 2\nu\beta$ .

Дефицит максимальной осредненной скорости на оси турбулентного потока составляет

$$\Delta\bar{u}_t = u_{\max \text{ л}} - \bar{u}_{\max \text{ т}} = 2\nu - 2\nu\beta = 2\nu(1-\beta) \text{ м/с.} \quad (16)$$

В соответствии с формулой (15) величина скорости псевдопроскальзывания в пристеночной области турбулентного потока при  $r=r_0$  будет иметь величину

$$\bar{u}_0 = 2\nu[\beta - (2\beta - 1)] = 2\nu(1-\beta) \text{ м/с.} \quad (17)$$

В реальности на стенке трубы скорость турбулентного потока жидкости будет иметь нулевое значение. Формула (15) корректно описывает распределение местных осредненных скоростей турбулентного потока только до границы переходного подслоя (вязкого слоя), находящейся от стенки трубы на расстоянии  $y=2\delta^*$ , м.

Величина местной осредненной скорости на границе переходного подслоя с учетом формулы (7) имеет значение

$$\begin{aligned} \bar{u}_{r^{**}} &= 2\nu \left[ \beta - (2\beta - 1) \left( \frac{r_0 - 2\delta^*}{r_0} \right)^2 \right] = 2\nu \left[ \beta - (2\beta - 1) \left( \frac{2R - 2R\sqrt{\frac{\lambda}{32}}}{2R} \right)^2 \right] = \\ &= 2\nu \left[ \beta - (2\beta - 1) \left( 1 - \sqrt{\frac{\lambda}{32}} \right)^2 \right] \text{ м/с.} \end{aligned} \quad (18)$$

Дефицит скорости псевдопроскальзывания турбулентного потока составит

$$\Delta\bar{u}_0 = \bar{u}_{\max \text{ т}} - \bar{u}_0 = 2\nu\beta - 2\nu(1-\beta) = 2\nu(2\beta - 1) \text{ м/с.} \quad (19)$$

Формулу (15) с учетом  $G_* = \frac{2\nu}{R} = \frac{\nu_*^2}{\alpha\nu}$  и  $2\nu = \frac{\nu_*^2}{\alpha\nu} R$  можно представить в виде

$$u_r = \frac{\nu_*^2}{\alpha\nu} R \left[ \beta - (2\beta - 1) \frac{r^2}{r_0^2} \right] = R \frac{\nu_*^2}{\alpha\nu} \left[ 1 - (2\beta - 1) \frac{r^2}{r_0^2} - (1-\beta) \right],$$

откуда  $\nu_*^2 = \frac{\alpha\nu}{R} u_r + \nu_*^2 (2\beta - 1) \frac{r^2}{r_0^2} + \nu_*^2 (1-\beta)$ .

С учетом  $\nu_*^2 = \frac{\tau_*}{\rho}$  и  $\tau_r = \tau_* (2\beta - 1) \frac{r^2}{r_0^2}$  имеем

$$\varepsilon_R = \frac{1}{2} \nu_*^2 = \frac{1}{2} \frac{\alpha\nu}{R} u_r + \frac{1}{2} \frac{\tau_*}{\rho} (2\beta - 1) \frac{r^2}{r_0^2} + \frac{1}{2} \nu_*^2 (1-\beta) \text{ м}^2/\text{с}^2; \quad (20)$$

$$\varepsilon_R = \frac{1}{2} \nu_*^2 = \frac{1}{2} \frac{\alpha\nu}{R} u_r + \frac{1}{2} \frac{\tau_r}{\rho} \frac{r}{r_0} + \frac{1}{2} \nu_*^2 (1-\beta) \text{ м}^2/\text{с}^2. \quad (21)$$

Анализируя уравнения (20) и (21), можно сделать следующие выводы.

1. Величина удельной массовой диссипации энергии турбулентного потока жидкости  $\varepsilon_R$  имеет постоянное значение по всему поперечному сечению потока.

2. Величина удельной массовой диссипации энергии  $\varepsilon_R$  в рассматриваемой точке ядра турбулентного потока жидкости является суммой трех слагаемых: удельной массовой диссипации энергии, обусловленной скоростным напором  $\varepsilon_u = \frac{1}{2} \frac{\alpha\nu}{R} u_r$ ; удельной массовой диссипацией энергии, обусловленной касательным напряжением

силы вязкого трения  $\varepsilon_{\tau} = \frac{1}{2} \frac{\tau_*}{\rho} (2\beta - 1) \frac{r^2}{r_0^2}$ , и удельной массовой диссипацией энергии,

отбираемой от потока элементарными турбулентными вихрями  $\varepsilon_{v_*} = \frac{1}{2} v_*^2 (1 - \beta)$ .

$$\varepsilon_R = \varepsilon_u + \varepsilon_{\tau} + \varepsilon_{v_*} \quad \text{м}^2/\text{с}^2. \quad (22)$$

3. Величина удельной массовой диссипации энергии турбулентного потока жидкости, связанная со скоростным напором, имеет максимальное значение на оси потока

$$\varepsilon_{u \max} = \frac{1}{2} \frac{\alpha v}{R} 2v\beta \quad \text{м}^2/\text{с}^2. \quad (23)$$

4. Величина удельной массовой диссипации энергии, обусловленная касательным напряжением силы вязкого трения, имеет максимальное значение в пристеночном подслое турбулентного потока жидкости

$$\varepsilon_{\tau \max} = \frac{1}{2} \frac{\tau_*}{\rho} (2\beta - 1) \quad \text{м}^2/\text{с}^2. \quad (24)$$

5. Элементарные турбулентные вихри зарождаются в переходном подслое и отбирают от потока жидкости удельную массовую энергию

$$\varepsilon_{v_*} = \frac{1}{2} v_*^2 (1 - \beta) \quad \text{м}^2/\text{с}^2. \quad (25)$$

Элементарные турбулентные вихри отрываются из переходного подслоя и уносятся течением в его центральную часть – турбулентное ядро, где происходит формирование турбулентных молей, имеющих планетарное строение, что обеспечивает поддержание устойчивого турбулентного режима. Рассеивание энергии элементарных турбулентных вихрей и турбулентных молей под действием прямого каскада энергии происходит в приосевой области потока в результате уменьшения размеров элементарных турбулентных вихрей до критической величины  $\lambda_0$ .

Поскольку в вязком пристеночном подслое элементарные турбулентные вихри не образуются и не отбирают от потока жидкости часть энергии, то формулу (24) более корректно записать в виде

$$\varepsilon_{\tau \max} = \frac{1}{2} \frac{\tau_*}{\rho} (2\beta - 1) + \frac{1}{2} v_*^2 (1 - \beta) \quad \text{м}^2/\text{с}^2. \quad (26)$$

В соответствии с формулой (20) величина касательного напряжения сил вязкого трения в переходном подслое имеет значение

$$\tau_{**} = \tau_* (2\beta - 1) \quad \text{Н/м}^2. \quad (27)$$

Снижение величины касательного напряжения сил вязкого трения в переходном слое с учетом  $\tau_* = v_*^2 \rho$  может быть определено по формуле

$$\Delta \tau_{**} = \tau_* - \tau_{**} = \tau_* - \tau_* (2\beta - 1) = 2\tau_* (1 - \beta) = 2\rho v_*^2 (1 - \beta) \quad \text{Н/м}^2. \quad (28)$$

Энергия снижения величины касательного напряжения силы вязкого трения  $\Delta \tau_{**}$  в переходном подслое обуславливает возникновение элементарных турбулентных вихрей и увеличение значения средней величины градиента скорости в переходном подслое до  $G_{**}$ ,  $\text{с}^{-1}$ .

Увеличение среднего значения градиента скорости в переходном подслое до величины  $G_{**}$  сопровождается снижением величины коэффициента кинематической вязкости с  $\nu_* = \alpha \nu$  до  $\nu_{**} = \nu$  (рис. 2).



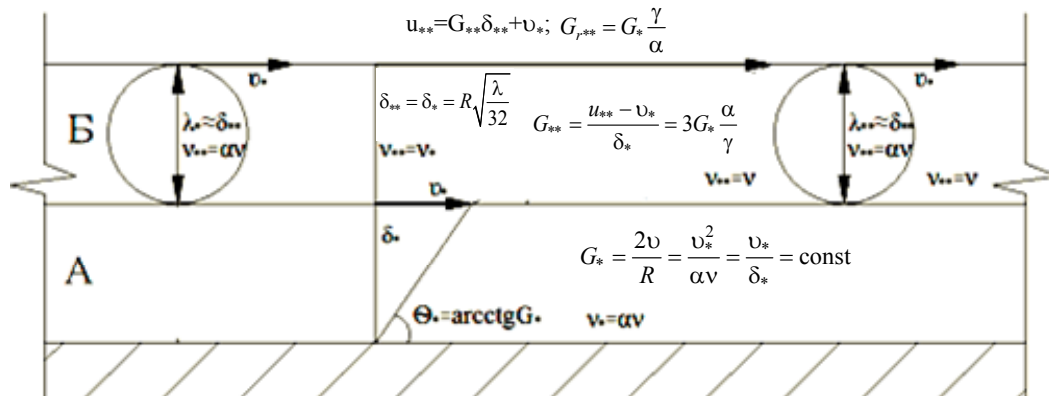


Рис. 2. Схема вязкого подслоя (А) и переходного подслоя (Б)

В процессе снижения касательного напряжения величина коэффициента кинематической вязкости уменьшается до значения  $v_{**} = v$  не во всем объеме переходного подслоя. В части объема переходного подслоя сохраняются области, имеющие значение величины коэффициента кинематической вязкости  $v_{**} = \alpha v$ , в результате чего и формируются элементарные турбулентные вихри, имеющие размер (масштаб)  $\lambda_{**} \approx \delta_{**}$ . Среднее значение по переходному подслою коэффициента кинематической вязкости будет иметь величину  $v_{**} = \gamma v$ .

Величина касательного напряжения силы вязкого трения в переходном подслое может быть определена как

$$\tau_{**} = \rho G_* v_{**} = \rho G_* \gamma v \text{ Н/м}^2. \quad (29)$$

Снижение величины касательного напряжения в переходном подслое с учетом

$G_* = \frac{v_*^2}{\alpha v}$  может быть вычислено по формуле

$$\Delta \tau_{**} = \tau_* - \tau_{**} = \rho G_* \alpha v - \rho G_* \gamma v = \rho G_* v (\alpha - \gamma) = \rho \frac{v_*^2}{\alpha v} v (\alpha - \gamma) = \rho v_*^2 \left( 1 - \frac{\gamma}{\alpha} \right) \text{ Н/м}^2. \quad (30)$$

Из (28) и (30) имеем

$$2 \rho v_*^2 (1 - \beta) = \rho v_*^2 \left( 1 - \frac{\gamma}{\alpha} \right).$$

Тогда 
$$2(1 - \beta) = 1 - \frac{\gamma}{\alpha},$$

откуда 
$$\alpha = \frac{\gamma}{2\beta - 1}, \quad (31)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\gamma}{\alpha} \right), \quad (32)$$

$$\gamma = \alpha (2\beta - 1). \quad (33)$$

Имеющиеся экспериментальные данные показывают, что средняя величина градиента скорости в переходном подслое может быть определена по формуле

$$G_{**} = \frac{3v_*^2}{\gamma v} \text{ с}^{-1}. \quad (34)$$

С учетом (6) имеем

$$G_{**} = \frac{3v_*^2}{\gamma v} \frac{\alpha}{\alpha} = 3G_* \frac{\alpha}{\gamma} \text{ с}^{-1}. \quad (35)$$

С учетом (33) и (35) имеем

$$G_{**} = 3G_* \frac{\alpha}{\gamma} = 3G_* \frac{\alpha}{\alpha(2\beta-1)} = \frac{3G_*}{2\beta-1} \text{ с}^{-1}. \quad (36)$$

Средняя величина градиента скорости в переходном слое с учетом  $\delta_{**} = \delta_* = R\sqrt{\frac{\lambda}{32}}$  может быть найдена по формуле

$$G_{**} = \frac{\bar{u}_{**} - v_*}{\delta_{**}} = \frac{\bar{u}_{**} - v_*}{\delta_*} \text{ с}^{-1}. \quad (37)$$

Из (37) с учетом (35) может быть получено теоретическое значение величины осредненной скорости турбулентного потока жидкости на границе вязкого подслоя (вязкого слоя) при  $y=2\delta_*$ :

$$\bar{u}_{**}^{T_1} = G_{**}\delta_* + v_* = 3G_* \frac{\alpha}{\gamma} \delta_* + v_* \text{ с}^{-1}. \quad (38)$$

Средняя величина градиента скорости в ядре турбулентного потока может быть определена по формуле

$$G_{\text{ядр}} = \frac{G_{r_0} + G_{r^{**}}}{2} = \frac{1}{2} G_{r^{**}} = \frac{2v\beta - \bar{u}_{**}^{T_2}}{r_0 - 2\delta_*} \text{ с}^{-1}, \quad (39)$$

где  $G_{r_0}=0$  – величина градиента скорости на оси потока при  $y=r_0$ ;  $G_{r^{**}}$  – величина градиента скорости турбулентного потока жидкости на границе переходного подслоя при  $y=2\delta_*$ .

Имеющиеся экспериментальные данные показывают, что величина градиента скорости турбулентного потока жидкости на границе переходного подслоя может быть вычислена по формуле

$$G_{r^{**}} = G_* \frac{\gamma}{\alpha} \text{ с}^{-1}. \quad (40)$$

В переходном подслое протекают процессы освобождения накопленной в вязком подслое упругой потенциальной энергии, обуславливающие снижение величин касательного напряжения сил вязкого трения:

$$\Delta\tau_{**} = \tau_* - \tau_{**} = 2\tau_*(1-\beta) \text{ Н/м}^2.$$

Снижение значения градиента скорости с величины  $G_* = \frac{2v}{R}$  на одной из границ переходного подслоя до величины  $G_{r^{**}} = G_* \frac{\gamma}{\alpha}$  на другой из его границ вычисляется по формуле

$$\Delta G_{r^{**}} = G_* - G_{r^{**}} = G_* - G_* \frac{\gamma}{\alpha} = G_* \left(1 - \frac{\gamma}{\alpha}\right) \text{ с}^{-1}.$$

Увеличение среднего значения градиента скорости в переходном подслое на величину определяется по формуле

$$\Delta G_{**} = G_{**} - G_* = G_* \frac{3\alpha}{\gamma} - G_* = G_* \left(\frac{3\alpha}{\gamma} - 1\right) \text{ с}^{-1}.$$

Здесь следует отметить, что принятое среднее значение градиента скорости в переходном подслое  $G_{**}$  носит виртуальный характер и не означает по аналогии с градиентом скорости в вязком подслое  $G_*$  линейность закона распределения величин осредненных местных скоростей в пределах подслоя. В реальности в переходном подслое имеет место скачкообразное увеличение значения осредненной местной скорости с величины  $\bar{u}_* = v_*$  на одной из границ переходного подслоя до величины  $\bar{u}_{**} = G_{**}\delta_* + v_*$  на другой из его границ.

В результате того, что в процессе снижения величины касательного напряжения в переходном подслое величина коэффициента кинематической вязкости уменьшается не во всем объеме переходного подслоя до величины  $\nu$ , а в части его объема сохраняются области, имеющие значение величины коэффициента кинематической вязкости  $\nu^{**} = \alpha \nu$  зарождаются элементарные турбулентные вихри, отбирающие от потока жидкости удельную массовую энергию

$$\varepsilon_{\nu_*} = \frac{1}{2} \nu_*^2 (1 - \beta) \text{ м}^2/\text{с}^2,$$

что приводит к уменьшению величины местной осредненной скорости на оси потока до величины

$$\bar{u}_{\max T} = 2\nu\beta \text{ м/с.}$$

Из (39) и (40) может быть получено теоретическое значение величины осредненной местной скорости турбулентного потока жидкости на границе вязкого подслоя

$$\bar{u}_{**}^{T_2} = 2\nu\beta - \frac{1}{2} G_{r^{**}} (r_0 - 2\delta_*) = 2\nu\beta - \frac{1}{2} G_* \frac{\gamma}{\alpha} (r_0 - 2\delta_*) \text{ с}^{-1}. \quad (41)$$

Из (38) и (41) имеем

$$3G_* \frac{\alpha}{\gamma} \delta_* + \nu_* = 2\nu\beta - \frac{1}{2} G_* \frac{\gamma}{\alpha} (r_0 - 2\delta_*) \text{ с}^{-1}. \quad (42)$$

Из (42) с учетом (32) имеем

$$\begin{aligned} 2\nu \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\gamma}{\alpha} \right) - \frac{1}{2} G_* \frac{\gamma}{\alpha} (r_0 - 2\delta_*) &= \nu + \nu \frac{\gamma}{\alpha} - \frac{1}{2} G_* \frac{\gamma}{\alpha} (r_0 - 2\delta_*) = \\ &= \nu + \frac{\gamma}{\alpha} \left[ \nu - \frac{G_*}{2} (r_0 - 2\delta_*) \right] = 3G_* \frac{\alpha}{\gamma} \delta_* + \nu_*, \end{aligned} \quad (43)$$

откуда

$$\begin{aligned} \left( \frac{\gamma}{\alpha} \right)^2 + \frac{\nu - \nu_*}{\nu - \frac{G_*}{2} (r_0 - 2\delta_*)} \frac{\gamma}{\alpha} - \frac{3G_* \delta_*}{\nu - \frac{G_*}{2} (r_0 - 2\delta_*)} &= 0, \\ \left( \frac{\gamma}{\alpha} \right)^2 - \frac{\nu - \nu_*}{\frac{G_*}{2} (r_0 - 2\delta_*) - \nu} \frac{\gamma}{\alpha} + \frac{3G_* \delta_*}{\frac{G_*}{2} (r_0 - 2\delta_*) - \nu} &= 0. \end{aligned} \quad (44)$$

Обозначив  $\frac{\gamma}{\alpha} = X$ ;  $\frac{\nu - \nu_*}{\frac{G_*}{2} (r_0 - 2\delta_*) - \nu} = A$ ;  $\frac{3G_* \delta_*}{\frac{G_*}{2} (r_0 - 2\delta_*) - \nu} = B$ , имеем

$$X^2 - AX + B = 0. \quad (45)$$

Решением квадратичного уравнения (45) будет

$$X = \frac{\gamma}{\alpha} = \frac{A - \sqrt{A^2 - 4B}}{2}. \quad (46)$$

Из (46) по формулам (32), (35) и (40) могут быть определены значения  $\beta^T$ ;  $G_{**}$ ;  $G_{r^{**}}$ .

По найденному значению  $\beta^T$  по формуле (18) может быть вычислено теоретическое значение величины осредненной скорости турбулентного потока жидкости на границе вязкого подслоя  $\bar{u}_{**}^{T_3}$ .

Экспериментальные исследования Л. Прандтля и Т. Кармана показали, что дефицит средней скорости турбулентного потока является постоянной величиной [2]

$$D = \frac{\bar{u}_{\max T} - \nu}{\nu_*} = \frac{1,5}{\chi} = 3,75, \quad (47)$$

где  $\chi = 0,4$  – постоянная Прандтля – Кармана.

С учетом (5) из (47) может быть получена формула для определения величины осредненной скорости на оси турбулентного потока жидкости

$$\bar{u}_{\max r} = \nu + 3,75\nu_* = \nu(1 + 1,326\sqrt{\lambda}) \text{ м/с}, \quad (48)$$

откуда может быть определено экспериментальное значение коэффициента  $\beta^3$

$$\beta^3 = \frac{\bar{u}_{\max r}}{\bar{u}_{\max л}} = \frac{\nu(1 + 1,326\sqrt{\lambda})}{2\nu} = \frac{1 + 1,326\sqrt{\lambda}}{2}. \quad (49)$$

Альтшулем А.Д. и Калицуном В.И. на основании данных экспериментальных исследований была предложена степенная формула распределения величин местных осредненных скоростей турбулентного потока по радиусу трубы круглого сечения [2]

$$\bar{u}_r = \bar{u}_{\max r} \left(1 - \frac{r}{r_0}\right)^{0,9\sqrt{\lambda}}. \quad (50)$$

Из (50) с учетом (48) и (7) может быть получена формула для определения экспериментального значения величины осредненной скорости турбулентного потока жидкости на границе вязкого подслоя

$$\begin{aligned} \bar{u}_{**}^3 &= \nu(1 + 1,326\sqrt{\lambda}) \left(1 - \frac{r_0 - 2\delta_*}{r_0}\right)^{0,9\sqrt{\lambda}} = \nu(1 + 1,326\sqrt{\lambda}) \left(1 - \frac{2R - 2R\sqrt{\frac{\lambda}{32}}}{2R}\right)^{0,9\sqrt{\lambda}} = \\ &= \nu(1 + 1,326\sqrt{\lambda}) \left(\sqrt{\frac{\lambda}{32}}\right)^{0,9\sqrt{\lambda}}. \end{aligned} \quad (51)$$

Величина градиента скорости в вязком подслое может быть определена по формуле (6)

$$G_* = \frac{2\nu}{R}, \text{ с}^{-1}.$$

Величина коэффициента  $\alpha$  может быть вычислена по формуле

$$\alpha = \text{Re} \frac{\lambda}{64}, \quad (52)$$

величина коэффициента  $\gamma$  – по формуле [33]

$$\gamma = \alpha(2\beta^T - 1).$$

В таблице представлены значения: коэффициентов  $\beta^3$ , вычисленные по формуле (49), значения коэффициентов  $\beta^T$ , вычисленные по формуле (32), значения коэффициентов  $\alpha$ , вычисленные по формуле (52),  $\gamma$  – вычисленные по формуле (33) и их отношения  $\frac{\gamma}{\alpha}$ , вычисленные по формуле (46); градиента скорости  $G_*$ , вычисленные по формуле (6),  $G_{**}$ , вычисленные по формуле (35),  $G_{r**}$ , вычисленные по формуле (40); величин осредненных местных скоростей турбулентного потока на границе вязкого подслоя  $u_{**}^3$ , вычисленные по формуле (51);  $u_{**}^{T_1}$ , вычисленные по формуле (38);  $u_{**}^{T_2}$ , вычисленные по формуле (41);  $u_{**}^{T_3}$ , вычисленные по формуле (18) для трубы диаметром  $d=0,05$  м с величиной, эквивалентной шероховатости  $\Delta=0,1 \cdot 10^{-3}$  м при различных значениях критерия Рейнольдса Re.

Величины коэффициентов гидравлического трения в переходной зоне определяли по формуле А.Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (53)$$

в области квадратичного закона сопротивления шероховатых русел – по формуле Л. Прандтля

$$\lambda_{\text{KB}} = \frac{0,25}{\left(\lg 3,7 \frac{d}{\Delta}\right)^2}. \quad (54)$$

Значение числа Рейнольдса в критической точке перехода турбулентного режима течения жидкости в область квадратичного закона сопротивления определяли по формуле

$$\text{Re}_{\text{кр}} = \frac{64}{\sqrt{\lambda_{\text{KB}}}} \frac{d}{\Delta}. \quad (55)$$

Величина средней скорости потока жидкости $v$ , м/с	1,0	2,0	3,0	4,2238	5,0	6,0	7,0
Значение числа Re	49505	99010	148515	209099	247525	297030	346535
Величина коэффициента $\lambda$	0,0265	0,0250	0,0245	0,0234	0,0234	0,0234	0,0234
Величина динамической скорости $v_*$ , м/с	0,05757	0,1119	0,1660	0,2285	0,2705	0,3246	0,3787
Толщина вязкого подслоя $\delta_*$	0,0003598	0,0003497	0,0003459	0,0003382	0,0003382	0,0003382	0,0003382
Величина градиента скорости $G_*$ , $\text{с}^{-1}$	160	320	480	675,8	800	960	1120
Величина отношения коэффициентов $\gamma / \alpha$	0,2416	0,2313	0,2275	0,2200	0,2200	0,2200	0,2200
Величина коэффициента $\alpha$	20,5062	38,7429	56,8360	76,5188	90,5806	108,6967	126,8129
Величина коэффициента $\beta^3$	0,6080	0,6048	0,6038	0,6015	0,6015	0,6015	0,6015
Величина коэффициента $\beta^7$	0,6208	0,6157	0,6137	0,6100	0,6100	0,6100	0,6100
Величина коэффициента $\gamma$	4,9543	8,8891	12,9252	16,8364	19,9304	23,9163	27,9020
Величина градиента скорости $G_{**}$ , $\text{с}^{-1}$	1986	4150	6332	9214	10908	13089	15271
Величина градиента скорости $G_{r**}$ , $\text{с}^{-1}$	38,6635	74,0202	109,1578	148,6958	176,0232	211,2282	246,4329
Величина осредненной скорости $u_{**}^3$ , м/с	0,7229	1,4539	2,1856	3,0904	3,6583	4,3899	5,1216
Величина осредненной скорости $u_{**}^{T_1}$ , м/с	0,7721	1,5632	2,3562	3,3447	3,9596	4,7513	5,5434
Величина осредненной скорости $u_{**}^{T_2}$ , м/с	0,7722	1,5634	2,3556	3,3446	3,9592	4,7511	5,5429
Величина осредненной скорости $u_{**}^{T_3}$ , м/с	0,7858	1,5883	2,3923	3,3938	4,0174	4,8209	5,6244

Приведенные в таблице данные показывают, что величины относительных погрешностей коэффициентов  $\beta$ , вычисленные по формулам (49) и (32), не превышают значения 1,4–2,14%, а величины относительных погрешностей осредненных местных скоростей турбулентного потока на границе вязкого подслоя, вычисленные по формулам (38), (41) и (51), не превышают значения 1,5–1,7%.

Таким образом, предлагаемая нами методика расчета гидравлических закономерностей распределения величин местных осредненных скоростей в поперечном сечении в турбулентном потоке жидкости обладает точными прогнозирующими свойствами и может быть использована в процессе проектирования трубчатых гидродинамических смесительных устройств.

#### Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Оценка гидравлических характеристик трубчатого смесительного устройства, работающего в ламинарном режиме / С.Ю. Андреев, М.И. Яхкинд, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №1.
2. Константинов, Н.М. Гидравлика, гидрология, гидрометрия / Н.М. Константинов, Н.А. Петров, Л.И. Высоцкий. – М.: Высшая школа, 1987. – 304 с.

#### References

1. Andreev, S.Yu. Assessment of hydraulic characteristics of the tubular hydrodynamic device working in the laminar mode / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2018. – No.1.
2. Konstantinov, N.M. Hydraulics, hydrology, hydrometry / N.M. Konstantinov, N.A. Petrov, L.I. Vysotskiy. – M.: Vysshaya shkola, 1987. – 304 p.

# АРХИТЕКТУРА

# ARCHITECTURE

УДК 728.1

*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

**Петрянина Любовь Николаевна,**  
доцент кафедры «Городское строительство и архитектура»  
E-mail: gsia@pguas.ru

**Гречишкин Александр Викторович,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Городское строительство и архитектура»  
E-mail: gsia@pguas.ru

*Penza State University of Architecture and Construction*

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

**Petryanina Lyubov Nikolaevna,**  
Associate Professor of the department «Urban construction and architecture»  
E-mail: gsia@pguas.ru

**Grechishkin Alexander Viktorovich,**  
Candidate of Sciences,  
Associate Professor of the Department «Urban development and architecture»  
E-mail: gsia@pguas.ru

## МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЖИЛЫХ РАЙОНОВ

Л.Н. Петрянина, А.В. Гречишкин

Дана методика повышения эффективности использования городских территорий при реконструкции застройки жилых районов. Определены условия выбора варианта планировочного решения селитебной части города и эффективности реконструкции жилья. Приведены данные для определения возможного масштаба реконструкции. Разработан вариант расчёта остаточного срока службы и состав технико-экономического обоснования реконструкции жилого фонда. Показана целесообразность поэтапного определения экономической эффективности реконструкции жилой застройки и технико-экономических показателей при выборе оптимального варианта очередности реконструкции при проектировании.

*Ключевые слова: жилой район, реконструкция, технико-экономическое обоснование, физический и экономический износ, экономическая эффективность, показатели*

## METHODS OF IMPROVING EFFICIENCY OF URBAN AREAS USE DURING RECONSTRUCTION OF RESIDENTIAL AREAS

L.N. Petryanina, A.V. Grechishkin

The technique of improving efficiency of use of urban territories during reconstruction of residential areas is given. The choice of variants of planning decision of residential areas and efficiency of reconstruction of housing are defined. The data are given to determine the possible scale of reconstruction. The calculation of the residual life and the composition of the feasibility study of the reconstruction of the housing are worked out. The expediency of gradual determination of economic efficiency of reconstruction of residential development and techno-economic indicators in the selection of the optimal variant of the sequence of reconstruction in the design is shown.

*Keywords: residential area, reconstruction, feasibility study, physical and economic deterioration, economic efficiency, indicators*

При непрерывно возрастающих объёмах городского строительства и недостатке свободных территорий, благоприятных для освоения, определение экономической целесообразности реконструкции жилого фонда размещением участков для строительства в условиях сложившейся застройки приобрело особое значение.

Хотя целью реконструкции городских территорий, занятых жилыми домами, является упорядочение их планировочной структуры и улучшение системы обслуживания, организация транспортной сети и повышение уровня благоустройства, экономическая целесообразность всегда остаётся решающим условием выбора вариантов планировочного решения селитебной части города. Однако при расчётах целесообразности предполагаемой реконструкции нет систематизированных показателей для её определения.

Поэтому для расчёта эффективности реконструкции сложившейся жилой застройки предлагается методика расчёта, использованная при выполнении проектов реконструкции и основанная на её комплексной оценке, позволившей избежать преждевременного сноса зданий, пригодных для проживания. Срок пригодности устанавливался с учётом характера сложившейся застройки, реальной возможности освоения свободных территорий, планируемого увеличения жилой площади и повышения уровня обеспечения на одного жителя. Общим условием эффективности реконструкции сложившейся застройки было получение таких её экономических показателей, которые позволили, несмотря на снос существующего жилья, обеспечить увеличение жилой площади не меньше, чем при освоении свободных территорий.

Экономическую эффективность реконструкции жилой застройки определяли общие социально-экономические условия региона, положение района сложившейся застройки и предполагаемых для использования свободных территорий относительно мест приложения труда и общегородского центра, степень преобразования транспортной сети, технико-экономические показатели сложившейся застройки и нового строительства.

В ходе выполнения проектных работ по реконструкции жилых районов проектными организациями г. Пензы было установлено, что эффективность реконструкции возрастала при следующих условиях:

- выносе промышленных предприятий с территории района реконструкции по санитарным и другим условиям;
- повышении уровня обеспеченности жилой площадью в городе;
- концентрации учреждений обслуживания и росте инженерного благоустройства в центральных и периферийных селитебных районах;
- отсутствии свободных территорий, благоприятных для инженерного освоения;
- улучшении инженерно-транспортного обслуживания районов сложившейся застройки;
- росте технического и морального износа сложившейся застройки;
- снижении стоимости нового жилого строительства;
- рациональной очерёдности работ по реконструкции селитебных территорий города.

Экономическое обоснование реконструкции составлялось по данным изысканий с проведением, при необходимости, дополнительных обследований. Целью экономического обоснования было установление масштабов и очерёдности сноса и модернизации сложившейся жилой застройки, определение ориентировочной стоимости и эффективности связанных с этим затрат. Экономическое обоснование реконструкции жилой застройки разрабатывалось в составе общего технико-экономического обоснования варианта проекта.

Содержание экономического обоснования реконструкции жилого фонда в составе ТЭО плана организации участка включало: описание современного состояния жилой застройки, характеристику районов сложившейся застройки, сравнение экономической эффективности вариантов реконструкции и освоения свободных от застройки территорий, выбор экономически эффективной последовательности реконструкции, характеристику технико-экономических показателей реконструкции, общие рекоменда-



дации по дальнейшей дифференциации нормативных и расчётных показателей реконструкции.

Результаты выполненных проектов по реконструкции жилых территорий позволили сделать вывод о поэтапном определении экономической эффективности реконструкции сложившейся жилой застройки.

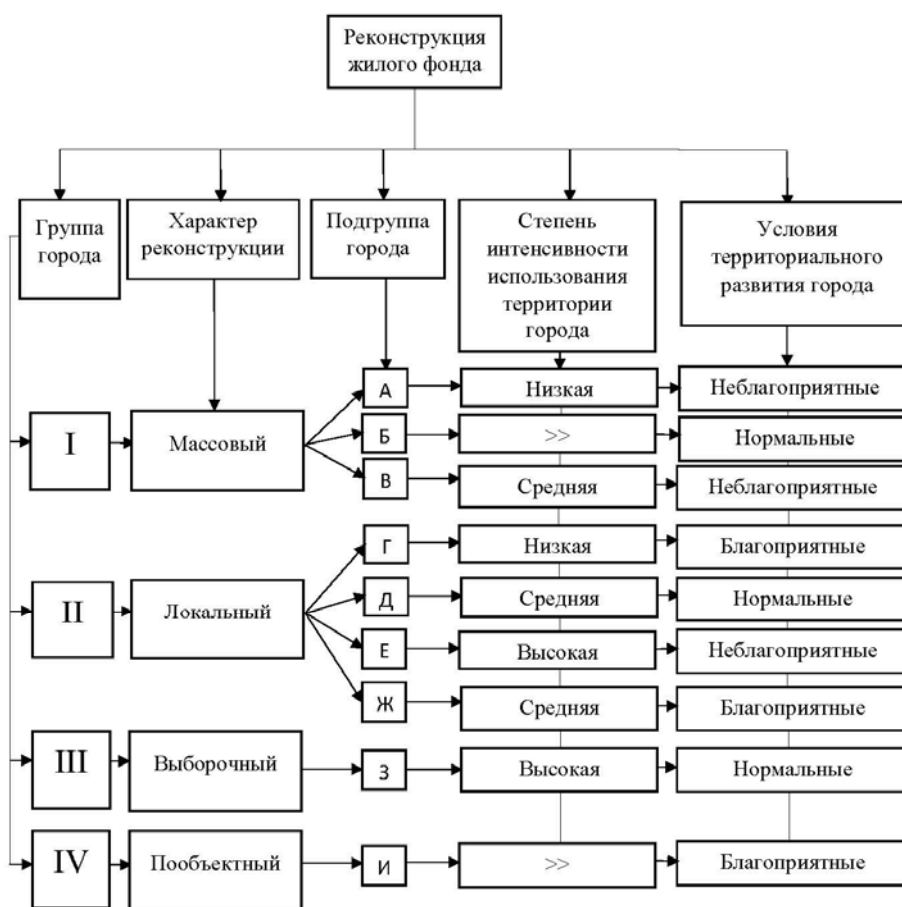
Первый этап – выделение и группировка застроенных территорий города по зонам с относительно одинаковыми показателями капитальности, износа и благоустройства жилого фонда.

Второй этап – дифференцирование существующего жилого фонда с выделением застройки, подлежащей сносу из-за ветхости, по санитарно-гигиеническим условиям и в связи с общегородскими планировочными мероприятиями; оценка жилого фонда по технико-экономическим показателям; расчёт остаточного срока службы, остаточной стоимости, затрат на капитальный ремонт и благоустройство сложившегося фонда, получившего стоимостную оценку.

Третий этап – определение полных затрат (капитальные вложения и эксплуатационные расходы) по новостройкам на реконструируемых и свободных от застройки территориях, освоение которых необходимо в случае сохранения существующего жилого фонда.

Четвёртый этап – расчёт экономической эффективности сноса существующего фонда и нового строительства на реконструируемых и свободных территориях.

Поскольку реконструкция селитебных территорий характерна для многих городов, то по условиям обновления жилого фонда они были объединены в группы, что позволяет для определения конкретных закономерностей обновления жилого фонда сопоставлять объёмы и последовательность сноса существующей застройки по фактическим масштабам реконструкции и условиям расчётной экономической эффективности (см. рисунок).



Иерархическая структура определения закономерностей обновления жилого фонда

При определении возможного масштаба реконструкции первой очереди жилой фонд по данным БТИ или проведённых обследований о техническом состоянии жилых домов был разделен на ветхий и непригодный в зависимости от физического износа (см. таблицу).

Оценка состояния здания	Физический износ в %
Хорошее	0-10
Вполне удовлетворительное	11-20
Удовлетворительное	21-30
Не вполне удовлетворительное	31-40
Неудовлетворительное	41-60
Ветхое	61-75
Непригодное (аварийное)	75

Остаточный срок службы жилого фонда определялся на основе предварительного перевода физического износа в экономический. Так как фонд с 70–75 % физического износа считается полностью изношенным (потребительская стоимость отсутствует), то для перевода физического износа в экономический и наоборот использовался коэффициент, равный:

$$100: 72, 5 = 1, 4, \text{ т.е. } I_э = 1,4 I_ф,$$

где  $I_э$  – экономический износ;  $I_ф$  – физический износ по данным БТИ.

На основе рассчитанной величины физического износа и нормы амортизации определялся остаточный срок службы жилого фонда  $T_{ост}$  по формуле

$$T_{ост} = \frac{100 - 1,4 I_ф}{a},$$

где  $I_ф$  – физический износ по данным БТИ;  $a$  – ежегодная норма амортизации.

На основе расчёта остаточного срока службы жилого фонда определялся объём непригодности и его естественная убыль на первую очередь и на проектируемый срок. При трудности определения точного года сноса, особенно за пределами первой очереди, для ориентировочных расчётов принимался средний год расчётного периода.

Таким образом, можно сделать вывод, что для определения экономической эффективности реконструкции жилых районов предлагается использовать технико-экономические показатели существующей и новой застройки как частные, так и общие. Частные ТЭПы следует подразделять на:

- натуральные (размеры городской территории, занятой сложившейся застройкой; размеры свободных от застройки территорий; этажность и плотность существующего и нового жилого фонда; капитальность существующих жилых и общественных зданий; степень физического и морального износа существующих фондов; остаточный срок службы; степень обеспеченности населения жильём, учреждениями обслуживания; уровень благоустройства;

- стоимостные (восстановительная стоимость жилых и общественных зданий, благоустройства; остаточная стоимость жилой площади; затраты на ремонт, модернизацию, благоустройство существующего жилого фонда; затраты на вывод нежилых построек за пределы района; среднегодовые жилищно-коммунальные затраты; стоимость капитального ремонта и модернизации жилых и общественных зданий; стоимость строительства новой жилой застройки.

Проектное решение предлагается оценивать по общему показателю экономической эффективности, выраженному в приведённых затратах:

$$P = Э + EK,$$

где  $P$  – приведённые затраты;  $Э$  – эксплуатационные издержки по варианту реконструкции или освоению свободных от застройки территорий;  $K$  – капитальные вложения по варианту реконструкции или освоению свободных от застройки территорий;  $E$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, принимаемый для конкретного этапа.

Этот показатель эффективности реконструкции сложившейся застройки жилых районов позволит определить целесообразность реконструкции в сравнении со строительством на свободных участках, а также может быть использован для определения оптимального варианта очередности реконструкции при проектировании.

#### Список литературы

1. Петрянина, Л.Н. Реконструкция жилых зданий опорного городского фонда как направление современного городского строительства / Л.Н. Петрянина // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3. – С.172–176.
2. Бочаров, Ю.П. О необоснованности решения тотального сноса пятиэтажной застройки в Москве (заметки к 90-летию попыток решить жилищную проблему в России) / Ю.П. Бочаров, М.Г. Меерович // Градостроительство. – 2017. – №2(48). – С.46–51.
3. Касьянов, В.Ф. Экологическая проблема реконструкции городской застройки / В.Ф. Касьянов, А.В. Ляпин, О.И. Чернышова // Вестник МГСУ. – 2013. – №8. – С.50–57.

#### References

1. Petryanina L.N. Reconstruction of residential buildings of main urban fund, as a direction of modern urban construction / L.N. Petryanina // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 3. – P. 172–176.
2. Bocharov, Yu.P. About unreasonableness of total demolition of five-storeyed buildings in Moscow (notes to the 90 anniversary of attempts to solve a housing problem in Russia) / Yu.P., Bocharov M.G. Meerovich // Urban planning. – 2017. – №2 (48). – P. 46–51.
3. Kas'yanov, V.F. Environmental problem of reconstruction of urban areas / V.F. Kas'yanov, A.V. Lyapin, O.I. Chernyshov // Vestnik MGSU. – 2013. – №8. – P. 50–57.

# ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

## ECONOMICS AND MANAGEMENT

УДК 332.83

*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

**Мебадури Зураб Анзорович,**  
кандидат экономических наук,  
доцент кафедры «Экономика, организация  
и управление производством»  
E-mail: meba67@mail.ru

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

**Сигунова Екатерина Ивановна,**  
студентка  
E-mail: katerina.sigunova@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

**Mebaduri Zurab Anzorovich,**  
Candidate of Economics, Associate Professor  
of the department «Economics, Organization  
and Management»  
E-mail: meba67@mail.ru

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

**Sigunova Ekaterina Ivanovna,**  
Student  
E-mail: katerina.sigunova@yandex.ru

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОЗВЕДЕНИЯ ЖИЛЫХ ДОМОВ НА ПРИМЕРЕ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

З.А. Мебадури, Т.В. Учаева, Е.И. Сигунова

Рассмотрены основные современные технологии возведения жилых домов. Показаны их преимущества и недостатки. Отображена статистика строительства жилых домов в зависимости от технологии возведения. Показана эффективность применения указанных технологий.

*Ключевые слова: кирпичное, панельное, монолитное строительство, достоинства и недостатки, эффективность применения технологий возведения жилых домов, Пензенская область*

### EFFICIENCY OF APPLICATION OF VARIOUS TECHNOLOGIES OF CONSTRUCTION OF RESIDENTIAL BUILDINGS ON THE EXAMPLE OF THE PENZA REGION

Z.A. Mebaduri, T.V. Uchaeva, E.I. Sigunova

The basic modern technologies of erection of houses are considered. Their advantages and disadvantages are shown. The statistics of construction of houses depending on the technology of construction are presented. The efficiency of the use of these technologies is shown.

*Keywords: brick, panel, monolithic construction, advantages and disadvantages, effectiveness of housing construction technologies, Penza region*

В строительстве многоэтажных домов выбор материалов ограничен тремя основными: панель, кирпич, монолит. И если говорить о конкурентоспособности строительных объектов в зависимости от технологии возведения зданий, на первый план выходят критерии долговечности, комфортности, эстетичности, затратности, которые влияют на конечную стоимость для потребителя.

В табл. 1–3 приведены достоинства и недостатки основных применяемых технологий возведения зданий в строительстве.

Т а б л и ц а 1

## Достоинства и недостатки панельного домостроения

Достоинства	Недостатки
1. Доступная цена, которая обусловлена, в первую очередь, низкой себестоимостью панельного строительства	1. Низкая теплоемкость. Необходимо признать, что в морозные дни даже идеально выполняющие свою функцию батареи не в состоянии обогреть квартиру в панельном доме до комфортной температуры
2. Равномерная усадка здания. Как и все сооружения, панельные дома дают усадку. Однако в отличие от тех же кирпичных, панельные здания усаживаются равномерно, без перекосов	2. Высокий уровень звукопроницаемости
3. Небольшой метраж. Достоинство, конечно, спорное. Однако высокие цены на коммунальные услуги заставляют людей подыскивать именно малогабаритное жилье	3. Негерметичные панельные швы. При панельном строительстве практически невозможно добиться идеальной герметичности панельных стыков. В межпанельные зазоры проникает холодный воздух и влага, вследствие чего страдает микроклимат, а порой и интерьер квартиры
4. Высокая скорость возведения	4. Сложности при перепланировке. Особенностью квартир в панельных домах является то, что почти все их стены являются несущими, то есть обеспечивают устойчивость здания в целом

Т а б л и ц а 2

## Достоинства и недостатки кирпичного домостроения

Достоинства	Недостатки
1	2
1. Высокая устойчивость к атмосферным воздействиям и температуре	1. Малый размер кирпича. Более длительная и трудозатратная работа по кладке стен
2. Пожаробезопасность. Кирпич не горит и выдерживает высокую температуру	2. «Мокрая» работа с цементом и кладкой. Отсюда ограниченные возможности по кладке стен в зимний период, необходимость подачи воды на строительную площадку и т.п.
3. Биологически устойчивый материал. Не подвержен грибку, плесени, насекомым, грызунам	3. Высокий коэффициент теплопроводности кирпича
4. Хорошая шумоизоляция	4. Из-за большого веса неудобно укладывать, транспортировать, подносить. Высокие затраты на погрузочно-разгрузочные работы с использованием крана, автопогрузчика. К тому же фундамент кирпичного дома должен быть очень внушительный и хорошо армированный по той же причине

1	2
5. Долговечность, надежность (дом может простоять 100–150 лет без особых проблем)	5. Дом из кирпича долго протапливается и имеет высокую температурную инерционность. Как следствие – высокие затраты на отопление
6. Высокая прочность. Средняя прочность кирпича на сжатие – М100-М125	7. Длительный период усадки кирпичных сооружений. Усадка небольшая, но она есть
7. Красота и эстетика. Дом из кирпича выглядит красиво и внушительно	8. Высокая стоимость. Кирпич по-прежнему остается одним из самых дорогих материалов в строительстве
9. Дом из кирпича «дышит» и поддерживает комфортную влажность	9. Относительно небольшая радиоактивность, но не столь высокая, как у тяжелых бетонов
10. Кирпич экологичен, то есть безвреден химически	
11. При аккуратной кладке нет необходимости в дополнительной отделке наружных стен. Дом из кирпича и без отделки смотрится весьма презентабельно	

Т а б л и ц а 3

Достоинства и недостатки монолитного домостроения

Достоинства	Недостатки
1. Долговечность	1. Строительство зависит от погодных условий
2. Невысокая себестоимость по сравнению с кирпичным зданием	2. Процесс требует соблюдения технологий
3. Небольшие сроки строительства – от года до двух лет	3. Плохая шумоизоляция
4. Хорошая тепло- и гидроизоляция	
5. Равномерная усадка, можно сразу приступать к ремонту	
6. Уникальность проекта	
7. Свободная планировка	

Технология панельного дома – это строительство из готовых блоков. Его главное преимущество – относительная дешевизна, основанная на производстве панелей в домостроительных комбинатах, и сборка дома, как конструктора, поэтому панельные дома строятся быстро. Однако в панельных домах имеется серьезный недостаток – это так называемые «дорожки холода», образующиеся из-за стыковочных швов и выступающих частей перекрытия.

Кирпич – материал, испытанный веками. Жилье в домах из кирпича качественное и комфортное. Они теплоемкие, обладают высокой степенью защищенности от возгорания. Дома из кирпича принято относить к классу жилья повышенной комфортности, и цена квадратного метра в них достаточно высока.

Основной принцип монолитного строительства заключается в том, что несущий скелет здания сделан из бетона, он создает прочный жесткий каркас с различными видами ограждающих конструкций. Одно из главных достоинств – долговечность.

К недостаткам монолитного домостроения можно отнести его высокую стоимость, а также длительные сроки строительства.

По данным Росстата, в России в 2017 году было возведено 28592,1 тыс м<sup>2</sup> кирпичных зданий, панельных – 9846,5 тыс м<sup>2</sup>, монолитных – 13824,1 тыс м<sup>2</sup>. 55 % построенных зданий приходится на кирпичное строительство, 26 % – на монолитное, 19 % – на панельное. Если смотреть динамику по России, то панельные дома постепенно уходят на третий план. В России набирает темпы монолитное строительство, но все еще не в таких масштабах, как кирпичное. Конечно, это связано с приобретением дорогостоящей качественной современной опалубки из силикатного кирпича, которая используется во всем мире.

В структуре предложений квартир в новостройках города Пензы в зависимости от класса жилья лидирует недвижимость экономкласса, ее доля составляет 67 %, бизнес-класса – 26 %, доля жилья элиткласса самая низкая – 7 %. На рис. 1 отражена схема города Пензы и строящиеся жилищные комплексы по классу жилой недвижимости.

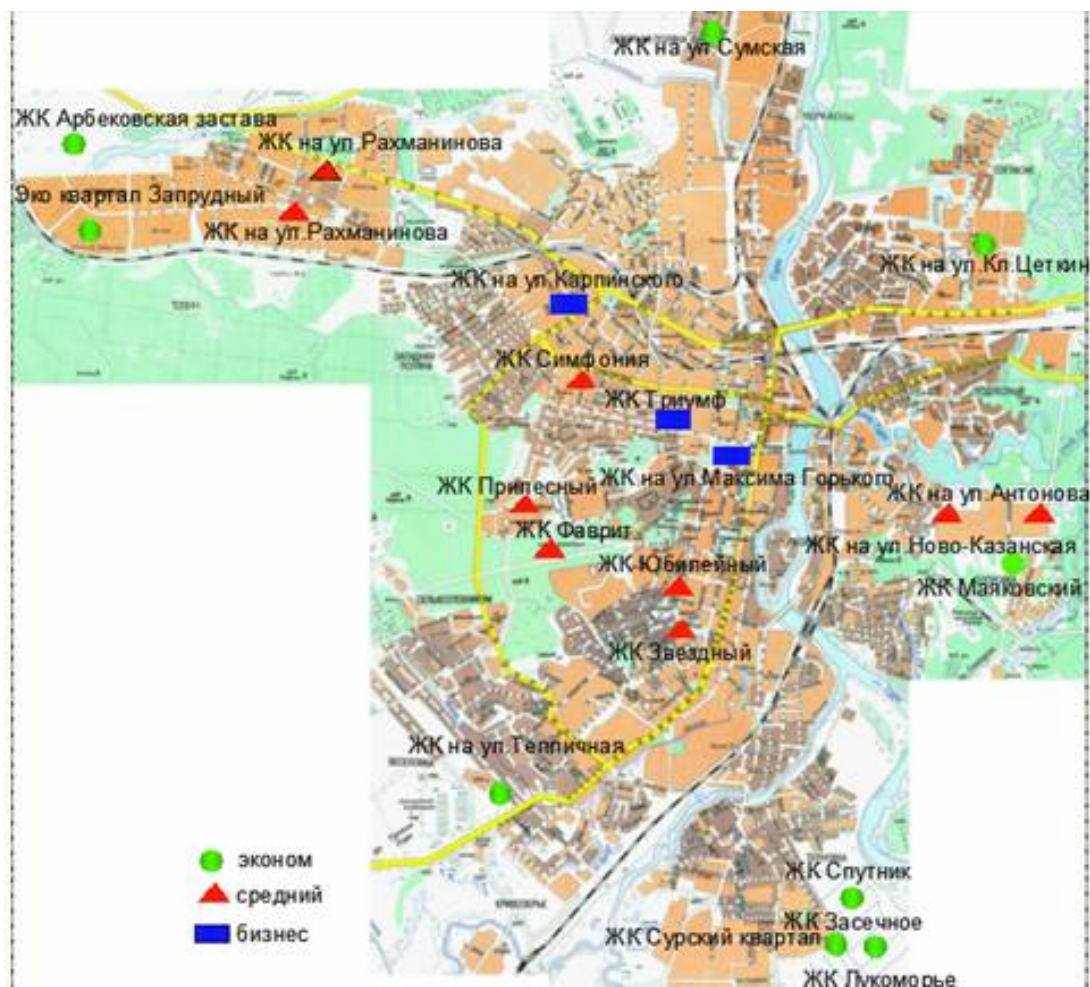


Рис. 1. Схема основных строящихся объектов жилой недвижимости г. Пензы по классу жилья

В зависимости от района наибольшее количество продаваемых квартир в новостройках зафиксировано в Арбеково – 25 %. В данном районе реализуются такие крупные проекты, как эко-квартал «Запрудный» и «Арбековская застава».

В последние годы все большее число застройщиков возводят жилищные комплексы экономкласса на пригородных территориях. В городе Пензе пригородное строительство в основном развивается в двух территориальных направлениях – в районах Терновка и Арбеково. Это такие жилые комплексы, как «Арбековская застава», «Сурский квартал», ЖК в с. Засечное и др. Низкая стоимость земельных участков обуславливает наиболее выгодные условия для застройщиков, а экологичность и доступные цены на жилье обеспечивают устойчивый спрос населения на данный сегмент недвижимости.

На данный момент самая высокая по городу цена за квадратный метр жилья элиткласса составляет 60 т.р.; данная недвижимость располагается в ЖК по ул. М. Горького. Самая низкая стоимость квадратного метра жилья экономкласса равна 30 т.р. за кв.м (микрорайон Лукоморье). Средняя стоимость предложения по городу составляет 40 т.р. за кв.м. Рассматривая цены на квартиры в целом можно увидеть, что самый бюджетный вариант – это квартира-студия площадью 28 кв.м в городе «Спутник», ее цена – 994 т.р.

По данным Пензастата, предложение жилой недвижимости по типу квартир на настоящий момент сложилось следующим образом: доля однокомнатных квартир – 54 %, двухкомнатных – 26 %, трехкомнатных – 15 %.

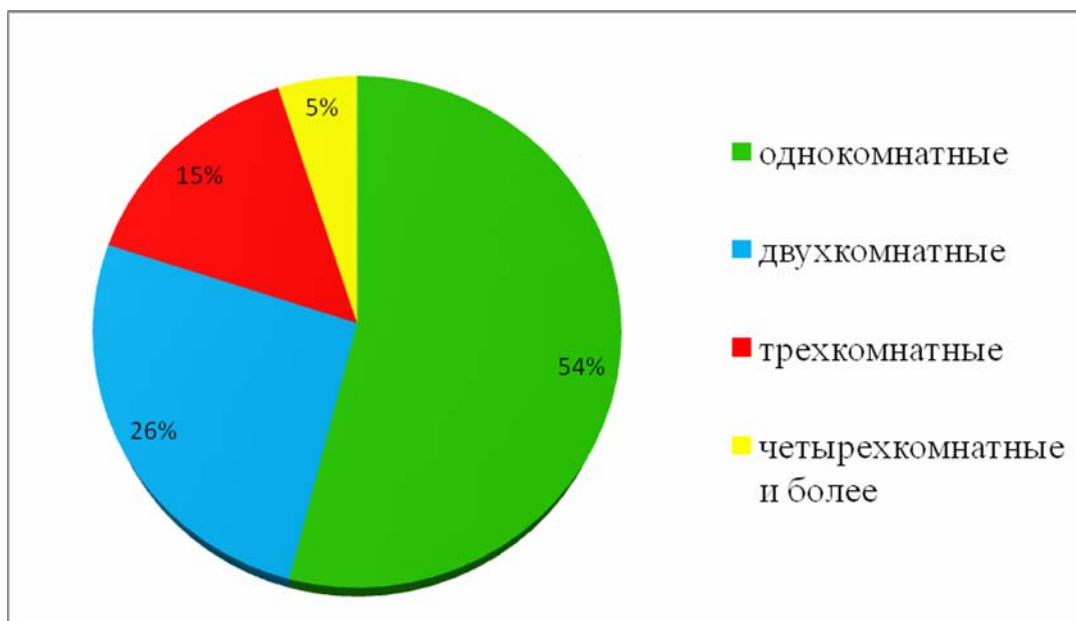


Рис. 2. Структура новостроек по типу квартир в г. Пензе

В настоящее время на территории города Пензы совокупная жилая площадь строящихся объектов многоэтажного строительства составляет порядка 330 000 кв.м. Компании-застройщики ведут как точечное строительство, так и массовую (поквартальную) застройку в городе и области. Большая часть застройщиков возводят не одиночно стоящие «свечки», а крупные жилищные комплексы с собственной инфраструктурой. Масштабные проекты представляются инвесторам и застройщикам более прибыльными и перспективными, поэтому можно предположить, что сложившаяся тенденция со временем будет только укрепляться.

Если говорить непосредственно о технологии строительства, в г. Пензе преимущественно строятся кирпичные дома. В 2017 году было построено 424,908 тыс. м<sup>2</sup> кирпичных зданий, что составляет 72 % от всех построек. Панельных же зданий было возведено 144,497 тыс. м<sup>2</sup> (24,6 %). Монолитное строительство, к сожалению, применяется не так активно; прежде всего, это связано с устаревшими технологиями и низким уровнем инноваций в строительстве монолитных конструкций, а также дорогостоящей опалубкой, которую многие строительные организации не могут себе позволить, в отличие от крупных городов, таких, как Москва, Санкт-Петербург и т.д. В г. Пензе монолитных зданий в 2017 году было построено 16,491 тыс. м<sup>2</sup> (2,8 %).

В то же время согласно опросу потенциальных покупателей и специалистов по недвижимости в данный момент кирпич по-прежнему является самым востребованным материалом стен. Люди предпочитают жить в кирпичных зданиях. Панель – это более экономичная, но не лучшая альтернатива кирпичу и монолит-кирпичу. Так, согласно опросу порядка 60 % населения отдает предпочтение кирпичным домам.



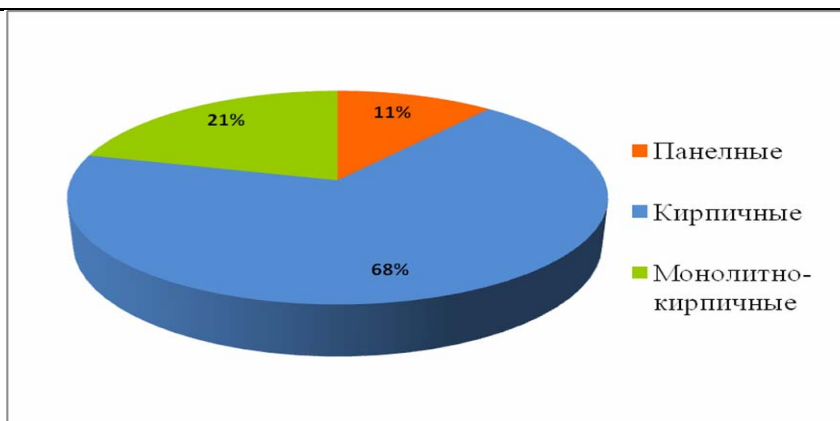


Рис. 3. Структура новостроек г.Пензы по типу строительства

Эффективность применения монолитных бетонных и железобетонных конструкций подтверждается следующими данными: единовременные затраты на создание производственной базы по изготовлению монолитных строительных конструкций на 35–45 % меньше по сравнению со сборным строительством; энергетические затраты на возведение монолитных конструкций на 25–35 % меньше, чем в сборных, что является несомненным плюсом для компании, занимающихся строительством монолитных зданий.

Важным фактором в современных условиях становится темп строительства, позволяющий существенно повысить эффективность вложения в него денег как для участников долевого строительства, так и для инвесторов. Поэтому в каркасах из монолитного и сборно-монолитного железобетона предусмотрено использование быстротвердеющих бетонов и бетонов, твердеющих при низких и отрицательных температурах воздуха (до минус 10°C) без дополнительного обогрева.

Основа технологии монолитного литья – арматура и опалубка. Применяя их, сложно ошибиться и допустить брак. Сейсмически устойчивая конструкция прочно держит форму дома, стены получаются ровнее, потолок и пол, отлитые из бетона, лишены швов и пустот и обеспечивают хорошую звукоизоляцию, что позволит потребителям избежать дополнительных затрат.

Главным фактором в условиях кризиса остается экономический. Строительные компании столкнулись с пределом платежеспособного спроса, и тут на помощь приходит панельное многоэтажное строительство.

Эффективность панельных зданий определяется: меньшей себестоимостью строительства, экономией расхода бетона за счет использования самонесущих панелей наружных несущих стен. Скорость монтажа панельных зданий в 2,5 раза быстрее скорости возведения монолитных.

Средняя скорость строительства таких объектов составляет 9–12 месяцев. Собрав здание, как конструктор, за несколько месяцев, застройщик имеет возможность быстро вернуть свои приумноженные инвестиции. В результате получают квартиры эконом-класса с неплохими характеристиками, что также является немаловажным фактором для дольщиков. Кроме того, сам принцип конструкции зданий позволяет удешевить отделочные работы – к моменту возведения здания межкомнатные перегородки уже готовы, и застройщику или самому владельцу квартиры нет необходимости начинать ремонт с самого начала.

Кирпичные дома пользуются заслуженной популярностью не только в нашей стране, но и во всем мире. Жилье в таких домах качественное и комфортное. Кирпич лучше «дышит» и гораздо экологичнее других материалов; кирпичные дома теплее, обладают высокой степенью защищенности от возгорания. Кирпич не подвержен появлению грибков и микроорганизмов.

В заключение хотелось бы сказать, что сейчас любая технология возведения жилья обеспечивает отменные эксплуатационные характеристики здания. Но у каждой технологии возведения зданий есть свои преимущества и недостатки.

Кирпичные дома отличаются высокой надежностью, долговечностью и отличным микроклиматом внутри помещений. Летом там не так жарко, а зимой теплее, чем в панельных домах.

Кирпич считается экологически чистым материалом для возведения жилых домов, а потому именно кирпичным домам большинство потребителей отдают предпочтение. Но далеко не все могут позволить себе жилье в кирпичном доме из-за его высокой стоимости и длительных сроков постройки.

Технология панельного домостроения позволяет за короткий срок возводить здания, собирая их из готовых железобетонных панелей. По этой причине это самое доступное по цене жилье.

Раньше дома из панелей проектировались как дешевое жилье для рабочего класса, а потому строились с маленькими однотипными квартирами, неудобной планировкой и слабой звукоизоляцией. Однако в современных панельных домах соблюдены все современные требования жилищного обустройства. Квартиры в них просторнее, планировка – продуманнее и уютнее. Остается нерешенной только проблема слабой шумоизоляции.

Монолит считают самым современным материалом для постройки зданий. Эта технология завоевала огромную популярность в строительстве многоэтажек. Армированная бетонная конструкция по надежности превосходит кирпичные и панельные здания.

Благодаря технологии строительства планировка квартир может быть самой разнообразной. Причем кроме различных криволинейных форм стен возможно создание объемных пространств без поддерживающих перегородок.

Оптимальным вариантом является жилье в кирпичном или монолитном доме. В таких домах комфортно жить, а сами здания отличаются надежностью и долговечностью. Но тем не менее, в современной экономической обстановке самым доступным жильем является квартира в панельном доме.

#### Список литературы

1. Официальный сайт Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Пензенской области. – URL: <http://pnz.gks.ru/>.
2. Мебадури, З.А. Экономическая эффективность применения в монолитном строительстве унифицированных арматурных сеток и каркасов / З.А. Мебадури, Т.В. Учаева // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2016. – № 2(3). – С.24–27.
3. Мебадури, З.А. Повышение эффективности деятельности строительных предприятий на основе применения современных методов организационно-технологических процессов строительства / З.А. Мебадури, Т.В. Учаева // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №4. – С.178–183
4. Полякова, А.В. Анализ тенденций развития первичного рынка жилой недвижимости города Пензы / А.В. Полякова, Т.В. Учинина. – Пенза: ПГУАС, 2016.

#### References

1. The official site of the Territorial body of Federal service of state statistics in the Penza region. – URL: <http://pnz.gks.ru/>
2. Mebaduri, Z.A. Economic efficiency of application of monolithic construction uniform mesh and frames / Z.A. Mebaduri, T.V. Uchaeva // Bulletin of PGUAS: construction, science and education. – 2016. – No. 2(3). – P. 24–27.
3. Mebaduri, Z.A. Increase of efficiency of activity of construction companies on the basis of application of modern methods of organizational and technological processes of construction / Z.A. Mebaduri, T.V. Uchaeva // Regional architecture and engineering. – 2016. – No. 4. – P. 178–183
4. Polyakova, A.V. Analysis of the development trends in the primary real estate market of the city of Penza / A.V. Polyakova, T.V. Usynina. – Penza: PGUAS, 2016.

УДК 656.13.072:338

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

**Домке Эдуард Райнгольдович,**  
кандидат технических наук, профессор  
кафедры «Организация и безопасность  
движения»  
E-mail: obd@pguas.ru

**Жесткова Светлана Анатольевна,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Организация  
и безопасность движения»  
E-mail: obd@pguas.ru

**Акимова Валентина Юрьевна,**  
доцент кафедры «Организация  
и безопасность движения»  
E-mail: obd@pguas.ru

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

**Domke Edward Reingoldovich,**  
Candidate of Sciences,  
Professor of the department «Organization  
and traffic safety»  
E-mail: obd@pguas.ru

**Zhestkova Svetlana Anatolievna,**  
Candidate of Sciences,  
Associate Professor of the department  
«Organization and safety of traffic»  
E-mail: obd@pguas.ru

**Akimova Valentina Yuryevna,**  
associate Professor of the department  
«Organization and safety of traffic»  
E-mail: obd@pguas.ru

## ЛОГИСТИКА В ДОСТАВКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Э.Р. Домке, С.А. Жесткова, В.Ю. Акимова

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса доставки эксплуатационных материалов на автозаправочные станции строительных организаций на примере компании «РОСНЕФТЬ-Пенза».

*Ключевые слова:* дорожно-строительная техника, доставка эксплуатационных материалов, автомобильный транспорт, логистика

## LOGISTICS IN THE DELIVERY OF OPERATIONAL MATERIALS FOR ROAD CONSTRUCTION MACHINERY

E.R. Domke, S.A. Zhestkova, V.Yu. Akimova

The results of experimental studies of the process of delivery of fuels and lubricants to petrol stations of road construction companies on the example of the company «ROSNEFT-Penza» are given.

*Keywords:* construction, delivery of fuel and lubricants, road transport, logistics

### Введение

В последние годы в хозяйственную практику предприятий стали активно внедряться новые методы и технологии доставки грузов. Сложность и динамичность современной сбытовой деятельности предполагает решение многих проблем, связанных с взаимодействием ее элементов и внешней среды, а также режимов функционирования элементов материального и функционального содержания соответствующей деятельности. Все это относится к организации доставки массовых грузов [1–4].

Одним из распространенных массовых грузов является доставка эксплуатационного материала (ЭМ) для дорожно-строительной техники на строительные объекты.

Потребность дорожно-строительной техники в эксплуатационном материале должна удовлетворяться полностью, своевременно, для чего необходима синхронизация всех элементов перевозочного процесса.

При организации перевозочного процесса большое значение имеет время доставки эксплуатационного материала. Продолжительность перевозочного процесса и его этапов настолько велика, что ориентация на экономию времени становится приоритетным направлением всего транспортного процесса [1].

### Постановка задачи

Проведены экспериментальные исследования и анализ функционирования процесса доставки эксплуатационных материалов на автозаправочные станции (АЗС) дорожно-строительных объектов с нефтебаз на примере компании «РОСНЕФТЬ-Пенза».

Установлено, что АЗС дорожно-строительных организаций обслуживаются компанией «РОСНЕФТЬ-Пенза» в пределах Пензенской области. Пензенская нефтебаза работает автономно.

При временной нехватке эксплуатационных материалов на Пензенской нефтебазе их перевозят арендуемыми автомобилями – бензовозами – из г. Сызрани (Самарская область), причем эксплуатационные материалы доставляются непосредственно на Пензенскую нефтебазу, находящуюся от Сызрани на расстоянии 260 км, а не развозятся по АЗС.

Для доставки эксплуатационных материалов на АЗС дорожно-строительных объектов используются бензовозы грузоподъемностью 24, 26 и 30 т.

Нефтебаза работает круглосуточно в 2 смены (по 12 часов в смену), имеет свою диспетчерскую службу, осуществляющую планирование доставки эксплуатационных материалов на АЗС по комбинированной схеме – помашинно и партионно. Диспетчерская служба при планировании перевозок работает по опыту «от достигнутого».

В ходе исследований изучены виды технологических операций процесса развозки эксплуатационных материалов (рис. 1).

С целью определения статистических характеристик перевозочного процесса и принадлежности генеральной совокупности данных определенному закону распределения, были проведены натурные исследования 13 реальных маршрутов доставки эксплуатационных материалов на АЗС. Статистические характеристики рассмотренных величин представлены в табл.1. Приведенные гистограммы распределения рассматриваемых характеристик описываются законом нормального распределения.

Применение логистических принципов при доставке груза позволяет сократить общую продолжительность процесса доставки и обеспечивает полное удовлетворение потребностей как по количеству, так и по качеству.

Для расчета транспортной работы, выполняемой автомобилями при перевозке эксплуатационного материала, устанавливались:

$Q_{ij}$  – масса эксплуатационных материалов, перевезенных  $i$ -м автомобилем по  $j$ -му маршруту;

$t_{ij}$  – время нахождения  $i$ -го автомобиля на  $j$ -м маршруте;

$\sum l_j^{ГЕ}$  – суммарная длина грузовых звеньев на  $j$ -м маршруте;

$\sum l_j^X$  – суммарная длина холостых пробегов на  $j$ -м маршруте;

$l_j$  – длина  $j$ -го маршрута;

$q$  – масса эксплуатационного материала, доставляемого в  $j$ -м маршруте на каждый строительный объект;

$t_{ij}^{ПРО}$  – время простоя автомобиля.

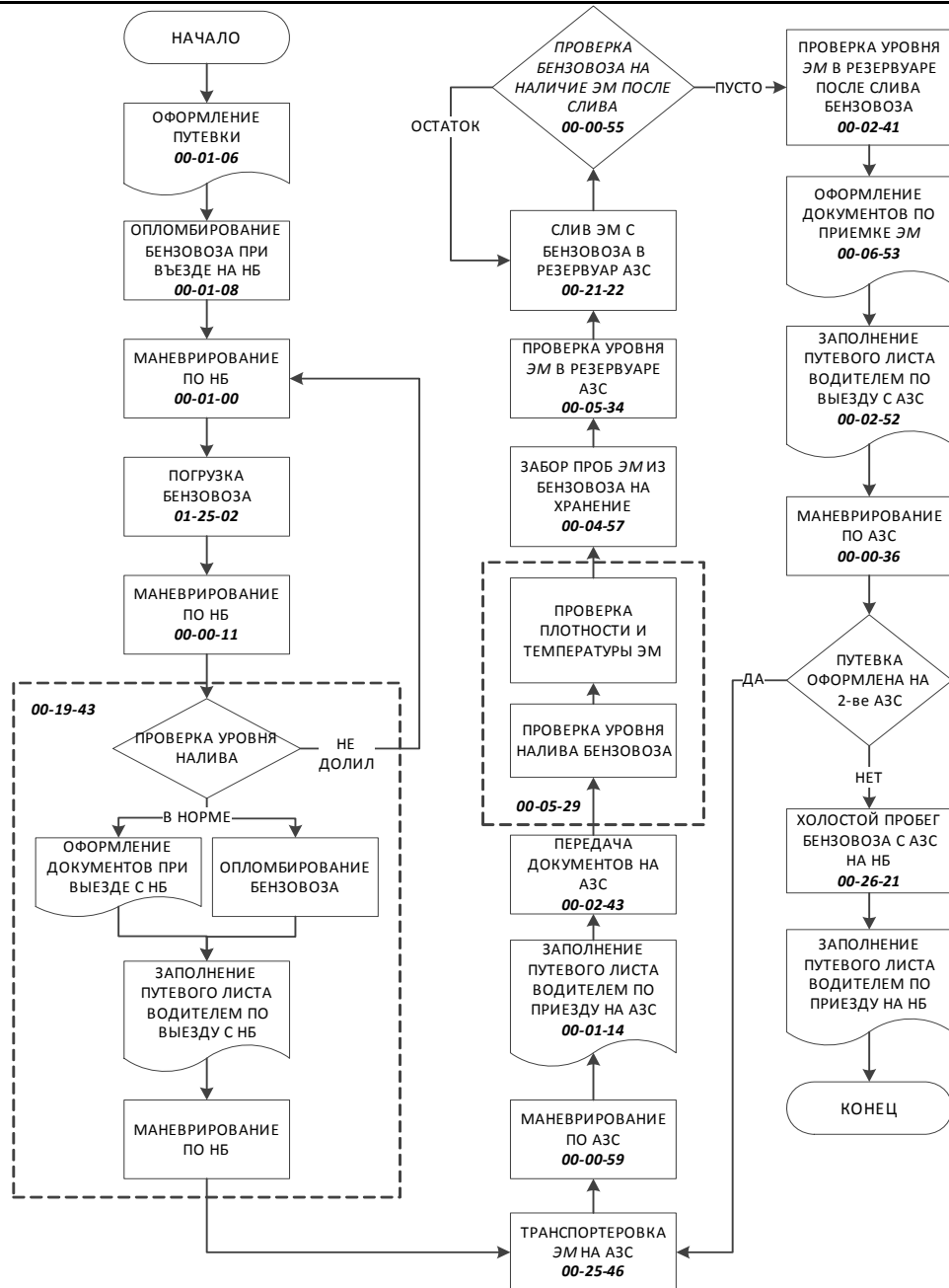


Рис. 1. Функциональная схема операций при доставке эксплуатационных материалов

Т а б л и ц а 1

Статистические характеристики  $t^{3П}$ ,  $t^П$ ,  $t^{3Р}$ ,  $t^Р$ ,  $V_1$ ,  $V_2$

Время погрузки $t^П$ , мин/т	$M(t^П) = 2,034$	$\sigma(t^П) = 10,46$	$X^2(t^П) = 5,15$
Время разгрузки $t^Р$ , мин/т	$M(t^Р) = 1,83$	$\sigma(t^Р) = 9,58$	$X^2(t^Р) = 4,18$
Время заезда в пункт погрузки $t^{3П}$ , мин	$M(t^{3П}) = 18$	$\sigma(t^{3П}) = 12,06$	$X^2(t^{3П}) = 4,78$
Время заезда в пункт разгрузки $t^{3Р}$ , мин	$M(t^{3Р}) = 24,01$	$\sigma(t^{3Р}) = 11,92$	$X^2(t^{3Р}) = 3,84$
Техническая скорость вне населенного пункта $V_1$ , км/ч	$M(V_1) = 59,5$	$\sigma(V_1) = 8,83$	$X^2(V_1) = 3,48$
Техническая скорость в населенном пункте $V_2$ , км/ч	$M(V_2) = 39,5$	$\sigma(V_2) = 7,86$	$X^2(V_2) = 9,16$

По этим исходным данным были определены:

1. Транспортная работа, выполненная на  $j$ -м маршруте:

$$P_{ij} = \sum_1^n M_{\zeta_{ij}} \times l_{\zeta_{ij}}^{\Gamma E}, \text{ Т} \cdot \text{км}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество грузовых звеньев на  $j$ -м маршруте;  $l_{\zeta_{ij}}^{\Gamma E}$  – длина грузового звена за езду;  $M_{\zeta_{ij}}$  – масса эксплуатационного материала в автомобиле на  $i$ -м грузовом звене  $j$ -го маршрута.

2. Выработка  $i$ -го автомобиля на  $j$ -м маршруте:

а)  $U_{ij} = Q_{ij} / t_{ij}, \text{ Т/ч}, \quad (2)$

б)  $W_{ij} = P_{ij} / t_{ij}, \text{ Т} \cdot \text{км/ч}. \quad (3)$

3. Коэффициент грузового пробега на  $j$ -м маршруте:

$$\beta = \sum l_j^{\Gamma E} \div l_j. \quad (4)$$

Были исследованы маршруты доставки груза до АЗС, применяемые нефтебазой. За основу взята работа одной смены грузового транспорта. В основу планирования задания положен принцип, чтобы статистический коэффициент грузоподъёмности автомобиля был близок к единице. Выявлено, что перевозка осуществляется по 13 маршрутам на 19 АЗС (рис. 2).

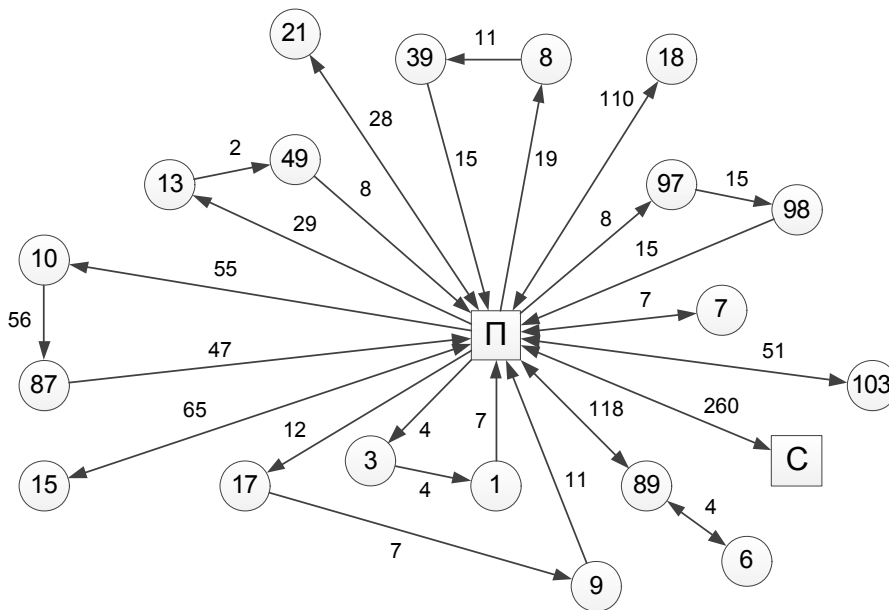


Рис. 2. Существующая схема дислокации АЗС и нефтебаз

В табл. 2 представлены существующие показатели транспортного процесса.

Т а б л и ц а 2

Существующие показатели транспортного процесса за одну смену

$Q, \text{Т}$	$l, \text{км}$	$t, \text{ч}$	$t^{\text{ИПО}}, \text{ч}$	$l^X, \text{км}$	$l^{\Gamma E}, \text{км}$	$\beta$	$P, \text{Т} \cdot \text{км}$	$U, \text{Т/ч}$	$W, \text{Т} \cdot \text{км/ч}$
432,3	2326	84,52	42,74	1201	1121	0,48	22488	5,11	293

В результате проведенных исследований установлено:

- планирование перевозок эксплуатационных материалов на АЗС дорожно-строительных объектов с нефтебаз осуществляется в основном интуитивно;

- нефтебаза работает автономно, обслуживая АЗС дорожно-строительных объектов своей зоны.

### Усовершенствованный метод доставки эксплуатационных материалов

Для повышения эффективности доставки эксплуатационных материалов была разработана интегрированная схема развозки эксплуатационных материалов (ИСРЭМ) из двух нефтебаз (рис. 3). Для сравнения взята та же смена, для которой в табл. 2 приведены показатели, полученные в результате натурных исследований по существующей схеме развозки эксплуатационных материалов. Для решения задачи маршрутизации транспорта (ЗМТ) при ИСРЭМ использовался усовершенствованный метод ветвей и границ [1-3, 10-11].

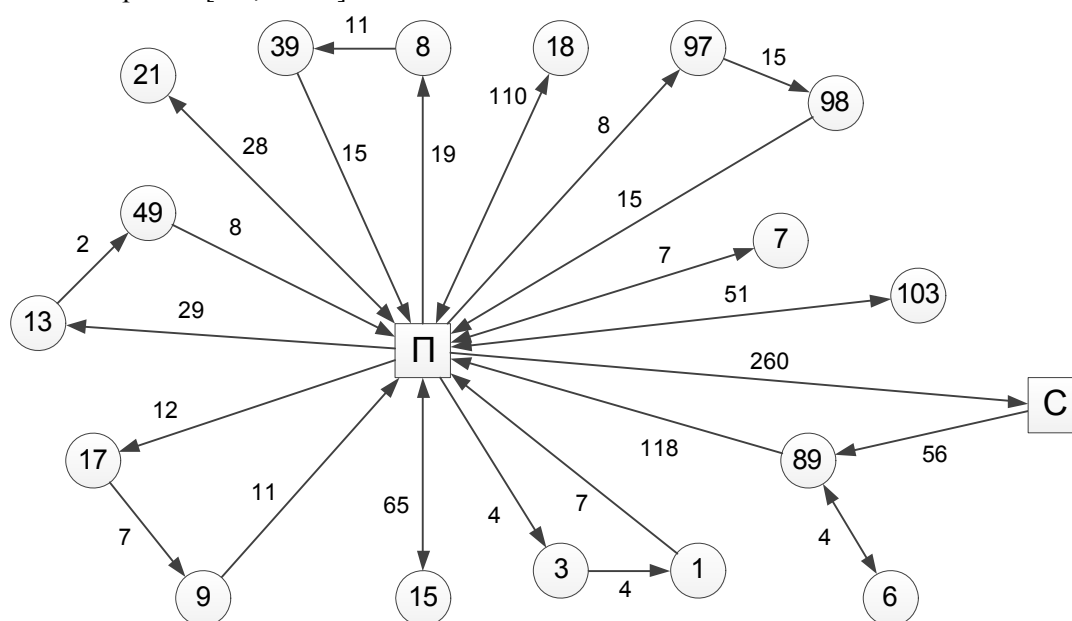


Рис. 3. Схема маршрутов при ИСРЭМ с Пензенской и Сызранской нефтебаз

Авторами разработана компьютерная программа, позволяющая находить оптимальные маршруты движения на заданной сети (рис. 4).

В качестве целевой функции использовали длину или время пути. Программа позволяет осуществить перебор всех возможных вариантов маршрутов в соответствии с разработанным алгоритмом. Если в процессе расчета получается несколько маршрутов, имеющих одинаковое минимальное значение целевой функции, то она выбирает оптимальный маршрут с наименьшей транспортной работой.

Укрупненная схема модели расчета имеет восемь этапов:

1. Создание массива потребителей продукции помашинной отправки строительных грузов. По указанию диспетчера определяются и обозначаются пункты транспортной сети, в которых производится полная выгрузка строительных грузов.

2. Формирование массива кластеров из одного или двух потребителей продукции. Находятся все возможные сочетания пар пунктов, образующие кластер со статическим коэффициентом грузоподъемности, близким к единице.

3. Создание массива сочетаний кластерных пар. Формируются все возможные сочетания кластеров для создания заданного количества маршрутов.

4. Формирование массива кластерных графов. Устанавливаются наименьшие расстояния между выбранной парой потребителей на каждом маршруте и от них до завода.

5. Создание массива из кластерных фиктивных графов. Вводится фиктивный внешний узел между смежными пунктами потребителей на маршруте. Действительная дуга между ними удаляется. Расстояние между фиктивным и действительным узлами принимается равным половине длины удаленной хорды.

6. Составление массива матриц весов. Для каждого фиктивного кластерного графа разрабатывается матрица весов.

7. Определение рациональных маршрутов. Производится расчет матрицы весов каждого кластерного фиктивного графа, и находится рациональный маршрут передвижения в нем.

8. Нахождение оптимального маршрута. Путем сравнения всех рациональных маршрутов по длине определяется оптимальный. При равенстве длин критерием оптимальности служит наименьшая транспортная работа [7, 8].

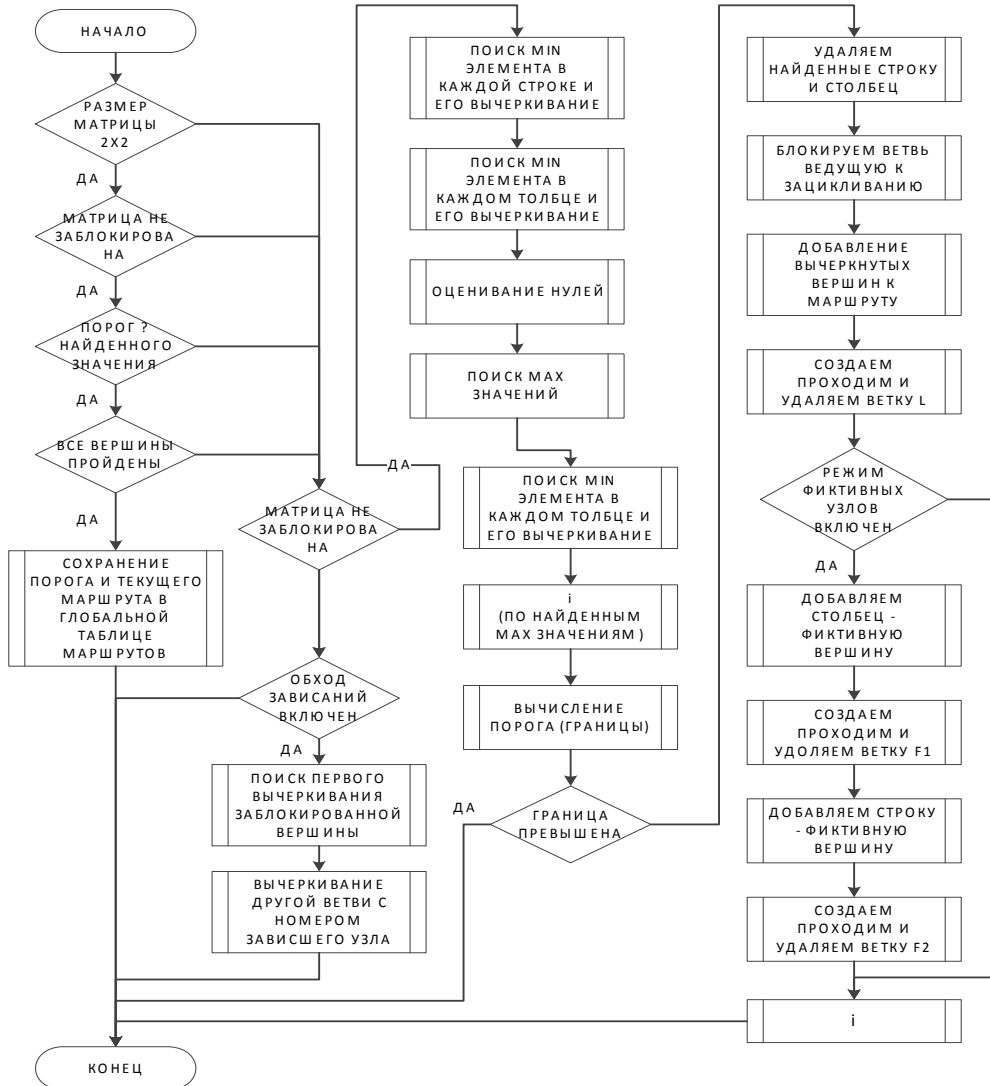


Рис. 4. Функциональная схема программы

Произведя расчеты, находят рациональный порядок объезда всех пунктов маршрута и характеристику технико-эксплуатационных показателей, полученных в результате совершенствования маршрутов (табл. 3).

Сравнение показателей, приведенных в табл.2 и 3, позволяет сделать следующие выводы:

- общая длина маршрутов и время нахождения на них бензовозов сокращается соответственно на 34,1 и 24,84 %;
- уменьшается транспортная работа на 28,3 %;
- увеличивается выработка (т-км/ч) на 31 %;
- сокращается необходимое количество бензовозов;
- сокращается время простоя бензовозов на 30,7 %.



Показатели транспортного процесса при ИСРЭМ на АЗС

$Q$ , т	$l$ , км	$t$ , ч	$t^{\text{ПРО}}$ , ч	$l^X$ , км	$l^{\text{ГЕ}}$ , км	$\beta$	$P$ , т·км	$U$ , т/ч	$W$ , т·км/ч
362,2	1533	63,52	29,63	868	665	0,43	16409	9,1	385,57

### Выводы

- Изложен сравнительный анализ существующих методов управления и организации перевозок эксплуатационных материалов с нефтебаз на АЗС дорожно-строительных объектов.
- Разработаны алгоритм и программное обеспечение, позволяющее получить точное решение задачи маршрутизации транспорта.
- Разработана модель функционирования интегрированной схемы развозки эксплуатационных материалов, позволяющая формировать рациональные маршруты их доставки.
- Применение предложенных решений позволяет сократить общий пробег автомобилей на 34,1 %; уменьшаются количество бензовозов, а также время их простоев на 30,7 %.

### Список литературы

1. Агуреев, И.Е. Нелинейная динамика в теории автомобильных транспортных систем / И.Е. Агуреев // Автомобильный транспорт. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – №9. – С. 3–13.
2. Вельможин, А.В. Теория организации и управления автомобильными перевозками: логистический аспект формирования перевозочных процессов: моногр. / А.В. Вельможин, В.А. Гудков, Л.Б. Миротин. – Волгоград: Волгоград. гос. техн. ун-т, 2001. – 172 с.
3. Данилов, О.Ф. Исследование операций на автомобильном транспорте / О.Ф. Данилов, Е.О. Галимова. – Тюмень: Вектор Бук, 2007. – 145 с.
4. Домке, Э.Р. Особенности решения задачи маршрутизации транспорта методом ветвей и границ / Э.Р. Домке, С.А. Жесткова, В.Ю. Акимова // Вестник МАДИ (ГТУ). – 2012. – №2(29). – С. 76–79.
5. Домке, Э.Р. Повышение эффективности перевозки нефтепродуктов автомобильным транспортом / Э.Р. Домке, С.А. Жесткова, К.С. Подшивалова // Вестник МАДИ. – 2012. – №3(30). – С. 70–74.
6. Домке, Э.Р. Особенности модели функционирования интегрированной системы развозки грузов / Э.Р. Домке, С.А. Жесткова // Мир транспорта и технологических машин. – 2012. – №3(38). – С. 94–100.
7. Домке, Э.Р. Совершенствование организации перевозочного процесса грузов автомобилями: моногр. / Э.Р. Домке, С.А. Жесткова. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 120 с.
8. Домке, Э.Р. Методы оптимизации маршрутных схем развозки грузов автомобильным транспортом / Э.Р. Домке, С.А. Жесткова. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 164 с.
9. Жесткова, С.А. Использование метода ветвей и границ при решении задачи маршрутизации транспорта / С.А. Жесткова // Мир транспорта и технологических машин. – 2012. – №1(36). – С. 94–101.
10. Жесткова, С.А. Эвристический метод как способ решения транспортной задачи / С.А. Жесткова, В.Ю. Акимова // Отраслевые аспекты технических наук: науч.-практ. журн. – М., 2011. – №12. – С. 2–3.

### References

1. Agureev, I.E. Nonlinear dynamics in the theory of automobile transport systems / I.E. Agureev // Road transport. – Tula: Izd-vo Tulgu, 2006. – No. 9. – P.3–13.

2. Velmozhin, A.V. Theory of organization and management of road transport: logistics aspect of the formation of transportation processes: monograph. / A.V. Velmozhin, V. A. Gudkov, L. B. Mirotin. – Volgograd: Volgograd. state tech. UN-t, 2001. – 172 p.
3. Danilov, O.F. Research of operations on motor transport / O.F. Danilov, E.O. Galimov. – Tyumen: Vector Buk, 2007. – 145 p.
4. Domke, E.R. Features of the solution of the vehicle routing problem by the method of branches and borders / E.R. Domke, S.A. Zhestkova, V.Y. Akimova // Vestnik MADI (GTU). – 2012. – № 2 (29). – P.76–79.
5. Domke, E.R. Improving the efficiency of transportation of petroleum products by road / E.R. Domke, S.A. Zhestkova, K.S. Podshivalova // Vestnik MADI. – 2012. – № 3(30). – P.70–74.
6. Domke, E.R. Features of the model of functioning of the integrated system of delivery of goods/ E.R. Domke, S.A. Zhestkova // World of transport and technological machines. – 2012. – No. 3 (38). –P. 94–100.
7. Domke, E.R. Improving the organization of the transportation process of goods by cars: monograph. / E.R. Domke, S.A. Zhestkova. – Penza: PGAS, 2013. – 120 p.
8. Domke, E.R. Optimization methods for routing schemes of delivery of cargoes by motor transport / E.R. Domke, S.A. Zhestkova. – Penza: PGAS, 2014 – 164 p.
9. Zhestkova, S.A. The use of the method of branches and boundaries in solving the problem of transport routing / S.A. Zhestkova// World of transport and technological machines. – 2012. – № 1 (36). – P.94–101.
10. Zhestkova, S.A. Heuristic method as a method for solving the transport problem / C.A. Zhestkova, V.Yu. Akimova // Branch aspects of technical Sciences: scientific.-prakt. zhurn. – M., 2011. – №12. – P.2–3.

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

**Кошев Александр Николаевич**,  
доктор химических наук, профессор,  
советник РААСН, действительный член  
Нью-Йоркской академии наук и Академии  
информатизации образования, профессор  
кафедры «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: koshev@pguas.ru

**Кузина Валентина Владимировна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: kuzina@pguas.ru

**Васин Леонид Анатольевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
зав. кафедрой «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: leo@pguas.ru

**Глебова Татьяна Александровна**,  
доцент кафедры «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: tan.1952@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

**Koshev Alexander Nikolaevich**,  
Doctor of Chemistry Science, Professor,  
Adviser of the Russian Academy of Architectural  
and Building Sciences full member of the New  
York Akademy of Sciences and Akademy of  
information of education, Professor of the  
department «Information and computing systems»  
E-mail: koshev@pguas.ru

**Kuzina Valentina Vladimirovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Information and  
computing systems»  
E-mail: kuzina@pguas.ru

**Vasin Leonid Anatolievich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Head of the department «Information-  
computing systems»  
E-mail: leo@pguas.ru

**Glebova Tatyana Aleksandrovna**,  
Associate Professor of the department  
«Information and computing systems»  
E-mail: tan.1952@mail.ru

## ЭЛЕКТРОННАЯ СРЕДА КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

А.Н. Кошев, В.В. Кузина, Л.А. Васин, Т.А. Глебова

Рассмотрены вопросы повышения эффективности образовательного процесса высшего образовательного учреждения на примере Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Выделены основные факторы информатизационной структуры образовательного процесса в вузе. Обозначены образовательные проблемы, приводящие к необходимости создания информационной среды в вузе. Приведены некоторые способы и средства их решения путем внедрения новых информационных технологий во все сферы деятельности университета.

*Ключевые слова: учебный процесс в вузе, информатизация, Интернет-технологии, мультимедиа, компьютерное и программное обеспечение, инновации, электронно-информационная образовательная среда (ЭИОС)*

## ELECTRONIC ENVIRONMENT AS A MEANS OF IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF THE EDUCATIONAL PROCESS

A.N. Koshev, V.V. Kuzina, L.A. Vasin, T.A. Glebova

The problems of increasing the efficiency of the educational process of a higher educational institution are considered, using the example of Penza State University of Architecture and Construction. The main factors of informatization structure of the educational process in the university are highlighted. Educational problems, leading to the need to develop an information environment in the university are identified. Some ways and means of their solution are given by introducing new information technologies in all spheres of activity of the University.

*Keywords: educational process in the university, informatization, Internet technologies, multimedia, computer and software, innovations, electronic information educational environment (EIOS)*

Основные положения документов, отражающих государственную политику в сфере образования (федеральных законов, постановлений Правительства РФ, образовательных стандартов), а также современный уровень развития информационно-телекоммуникационных технологий способствуют реализации процессов информатизации в вузе. В основе инновационного совершенствования образовательного процесса лежат современные технологии обучения и компьютерные технологии (информационные, телекоммуникационные и иные технологии, а также сервисные услуги, на основе которых происходит деятельность в сети Интернет или с её помощью). Федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС) обязывают образовательные учреждения создавать собственную электронно-информационную образовательную среду (ЭИОС), которая способствовала бы освоению образовательных программ.

Информационные ресурсы вуза включают в себя следующие средства и системы информатизации: средства вычислительной техники, информационно-вычислительные комплексы, сети, программные средства (операционные системы, обучающие и контролирующие комплексы, системы управления базами данных, прикладное программное обеспечение), автоматизированные системы управления, системы связи и передачи данных и ЭИОС, предназначенную для обеспечения информационной открытости вуза и повышения эффективности образовательного процесса при реализации образовательных программ.

К функциональным возможностям ЭИОС относятся:

- формирование образовательного информационного пространства вуза, в котором находится электронный образовательный контент;
- организация доступа к информационным ресурсам студентов и преподавателей;
- обеспечение современными средствами коммуникаций;
- хранение результатов образовательного процесса.

Совершенствование информатизационной структуры образовательного процесса вуза является актуальной задачей, для решения которой можно выделить следующие основные компоненты:

– компьютерное и программное обеспечение учебного процесса, куда входит как материально-техническое обеспечение (компьютеры и необходимая периферия), так и лицензионные программные средства (операционные системы, среды и интегрированные системы программирования);

– компьютерные учебники, курсы лекций, лабораторных и практических работ; программные средства для курсового проектирования и выполнения расчетно-графических и выпускных квалификационных работ. Элементы из этого списка разрабатываются сотрудниками вуза или приобретаются у сторонних организаций;

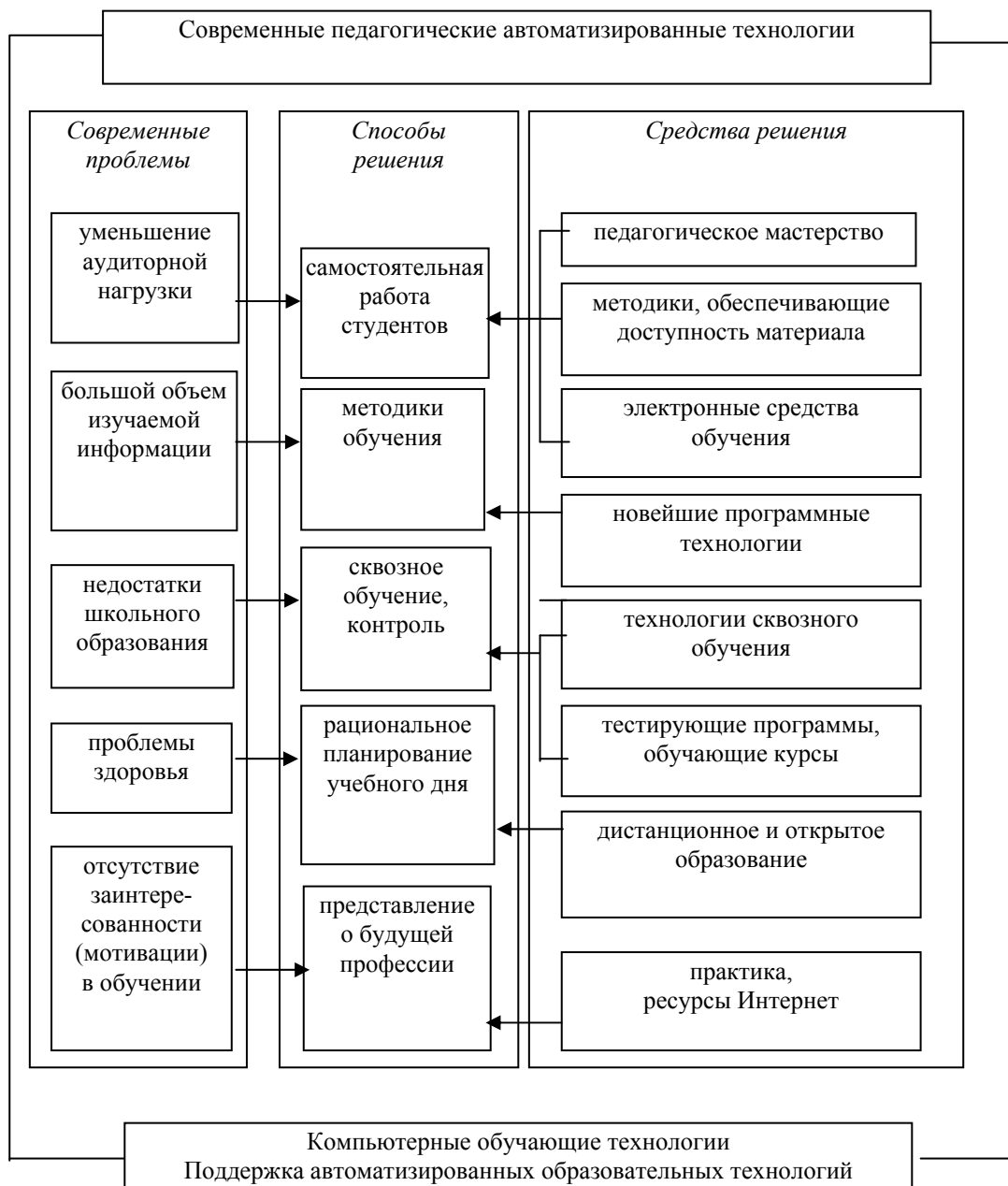
– квалифицированный педагогический, научный и инженерный состав, профессионально подготовленные программисты. Нужно отметить, что кадровую проблему современный вуз не может решить без собственной базы подготовки и переподготовки научных, педагогических и инженерно-технических кадров, ему необходимо вести подготовку студентов по специальностям информационно-компьютерного или физико-математического профиля, иметь аспирантуру и докторантуру по научным специальностям, связанным с применением и развитием компьютерных технологий, осуществлять подготовку и переподготовку преподавателей по дисциплинам информатизационного профиля.

Укажем основные проблемы обучения в современном вузе. Рассмотрим основные негативные факторы, влияющие на образовательный процесс, и возможные направления их снижения (см. рисунок).

*Уменьшение аудиторной нагрузки.*

Эта проблема стоит практически перед каждым вузом. Она обусловлена, во-первых, постоянно возрастающим объемом изучаемой информации как следствием научно-технического прогресса в мире. Во-вторых, в современном высшем образовании существенно возросла доля социально-экономических дисциплин – как итог мировых социальных преобразований. Третья причина – это революционные изменения в

средствах и способах передачи информации. В настоящее время на человека буквально «обрушивается» информационный поток, справиться с которым неопытному молодому человеку не так-то просто.



Образовательные проблемы и пути их решения

Проблему снижения в учебном процессе удельного веса всех видов аудиторных занятий необходимо решать посредством переноса доли нагрузки на самостоятельную работу студентов. Это приводит к задаче эффективной и разумной организации процесса обучения. Основными средствами для решения данной проблемы являются:

- Применение авторских педагогических технологий, форм и способов обучения, которые позволяли бы студентам усваивать в отведенное на изучение дисциплины время необходимый объем знаний и навыков; владение навыками за непродолжительное время изложить основные моменты, объяснить главное и заинтересовать студентов предметом изучения.

Для реализации такого подхода необходимы система повышения качества подготовки и переподготовки педагогических кадров, обучение преподавателей работе

с новыми педагогическими технологиями, предоставление преподавателям доступа к информационным ресурсам посредством вычислительных сетей различных уровней. Факультетом дополнительного образования ПГУАС ежегодно проводятся курсы переподготовки для преподавателей по педагогике и психологии, информационным системам и технологиям и другим направлениям.

– Наличие методических средств, обеспечивающих доступность учебного материала. Сюда входит совершенствование библиотечной и издательской деятельности вуза, то есть предоставление обучающимся необходимой информации в кратчайшее время и удобной форме за счет расширения библиотечного фонда, развития библиотечного обслуживания студентов с использованием новейших библиотечных технологий, таких, как электронные каталоги и электронная выдача книг. Сюда же входит разработка необходимой учебно-методической литературы – учебников, учебных пособий, задачник и лабораторных практикумов с примерами решения, методических указаний и рекомендаций по выполнению курсовых, практических и лабораторных работ и т.п.

– Наличие электронных средств обучения и свободный доступ к ним. Это – электронные учебники и учебные пособия с мультимедиа, обучающе-тестирующие комплексы в привлекательном (с точки зрения обучающегося) формате с гиперссылками, подсказками, с применением элементов деловой игры, имитационных лабораторных работ и т.д. Все перечисленные средства обучения позволяют активизировать у студентов стремление к самообразованию. Отметим, что самообразование значительно повышает социальную адаптацию студентов и возможность их самореализации.

Вопрос свободного доступа ко всем имеющимся электронным средствам обучения решается путем внедрения электронно-информационной образовательной среды вуза, а также обеспечения возможности перехода с официального сайта университета на электронные библиотечные и справочные системы (например IPRbooks, E-library и др.).

*Освоение все возрастающего объема изучаемой информации.*

Научно-технический прогресс диктует молодым людям свои условия. Если хочешь быть по-настоящему грамотным, востребованным в своей отрасли специалистом, следует научиться владеть на практике последними достижениями современной науки и технологии. Кроме того, необходимыми стали знания и по практическому менеджменту, и по основам экономических взаимоотношений и т.д. В современном вузе увеличилось количество часов, выделенных на самостоятельную работу студента, что также требует определенных усилий при усвоении учебного материала.

Проблему большого объема изучаемой информации можно решить применением щадящих форм и методов обучения. К ним следует отнести новейшие программные технологии обучения, позволяющие интенсифицировать скорость процесса усваивания материала, авторские обучающие разработки на основе компьютерных технологий, такие, как электронные лекции, презентации, учебные кино- и видеоролики и т.д.

*Устранение недостатков школьного образования.*

К проблемам такого характера относятся в первую очередь различный уровень подготовленности по основным школьным дисциплинам и недостаточное качество знаний. Такие явления были и во времена развитого социализма, однако происшедшая «демократизация» школьного образования усугубила различия в подготовке абитуриентов в зависимости от уровня образовательной школы. Здесь играют роль и педагогический состав школы, и уровень способностей, контингент учащихся, и даже средства обучения, использующиеся в той или иной школе.

В решении проблемы преемственности образования при переходе от школы к вузу и недостаточной подготовленности абитуриентов очень важным, на наш взгляд, является обучение последних на специальных курсах подготовки к поступлению в выбранный вуз. В этом случае ученик не просто овладевает знаниями средней школы в необходимом объеме, но и имеет возможность подготовиться к учебе в вузе с учетом специфики того или иного выбранного им направления подготовки.

С точки зрения технологии обучения очень полезным для решения означенной проблемы представляется компьютерная форма обучения. В этом случае легко реализуется принцип непрерывности изучения материала. Для этого удобно использовать постоянный, мобильный контроль над усвоением материала, гиперссылки на разделы курсов, по которым обнаруживается низкий уровень знаний, справочники, всплывающие подсказки, примечания и т.п.

*Проблемы здоровья обучающихся.*

Недостаточное количество бесплатных спортивных и оздоровительных учреждений для детей и молодежи, слабая пропаганда здорового образа жизни, недостаточно качественное питание, гиподинамия и пр. не способствуют укреплению и поддержанию здоровья молодых людей – школьников и студентов. В то же время очевидно, что плохое физическое состояние обучающегося – залог его неудач в образовании на любом уровне.

Проблем со здоровьем можно избежать путем рационального планирования учебного дня, внедрения новых форм обучения – дистанционного и открытого образования (учиться тогда, когда удобно, изучать определенную дисциплину во время наибольшей готовности к обучению и т.п.), а также индивидуализации обучения. Многие современные вузы имеют для реализации перечисленных форм достаточные условия. Наличие ЭОИС способствует решению данной проблемы.

*Мотивация в обучении.*

Неоспоримым является тот факт, что научно-технические, педагогические и инженерные специальности не являются престижными для молодежи. Зачастую поступление в вуз на эти направления подготовки продиктовано не стремлением стать специалистом в выбранной области, а скорее вызвано наблюдающейся в обществе тенденцией к получению высшего образования любого профиля, с надеждой переквалифицироваться в дальнейшем на более выгодные виды работы. Причины такого общественного мнения общеизвестны и не требуют дополнительного анализа.

Во многом от профессионализма преподавателей зависит, насколько студент будет подготовлен к решению задач в профессиональной сфере.

Использование мировых образовательных ресурсов через сеть Интернет позволяет заинтересовать студента в обучении, способствует формированию правильного представления студентов о будущей профессии, дает возможность показать ее в выгодном свете.

*Доступность электронной информационной среды.*

Важным направлением информатизационного развития образовательного процесса в высшей школе является создание полной системы автоматизированного управления вузом. Опыт многих вузов, как и опыт нашего университета, показывает, что для организации эффективной, гармоничной работы учебного заведения необходимым является создание автоматизированной системы АСУ «ВУЗ» со следующими основными подсистемами: «Контроль» – система компьютеризированного контроля за исполнением решений Ученого совета, ректората, ректора, проректоров, директоров институтов и деканов факультетов; «Деканат» – АСУ управления работой институтов и деканатов; «Кафедра» – АСУ управления кафедрой; «Учебный отдел»; «Библиотека», «Научный отдел»; «Приемная комиссия», «Методический кабинет», «Выпускники», «Трудоустройство», «Расписание», «АХЧ», «Склад» и др.

Для обеспечения продвижения во всех направлениях информатизации вуза важно правильно организовать работу коллектива, создать соответствующую структуру информатизационной службы, разъяснить задачи и увлечь профессорско-преподавательский и инженерный состав высшего учебного заведения.

В нашем университете в этом направлении достигнуты определенные успехи: эффективно работает информационно-вычислительный центр, функционирует ряд компьютерных центров институтов и факультетов. Регулярно проводятся конференции, выставки и конкурсы по информатизационному профилю, имеются постоянно действующие курсы по повышению квалификации программистов и пользователей

информационных систем, осуществляется аттестация преподавателей по компьютерной грамотности.

Внимание к проблемам информатизации со стороны Ученого совета и ректората привели к созданию информациологической среды вуза, которая постоянно совершенствуется и пополняется новыми задачами и их решениями, что способствует повышению образовательного, научного и административного уровня высшего учебного заведения.

Для обеспечения эффективного управления образовательной деятельностью в университете создается электронная информационно-образовательная среда. Функциональный состав современной ЭИОС ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» подразделяется на следующие системные компоненты:

- 1) электронные информационные образовательные ресурсы:
  - информационный контент сайта pguas.ru;
  - база данных библиотечной платформы library.pguas.ru;
  - база данных системы электронных курсов do.pguas.ru платформы Moodle;
  - личный кабинет студента и преподавателя lk.pguas.ru;
- 2) средства доступа к информационным образовательным ресурсам:
  - официальный сайт pguas.ru, выполненный на платформе Joomla;
  - система электронных курсов, реализуемая платформой Moodle;
- 3) телекоммуникационные системы:
  - проводной и беспроводной сегменты компьютерной сети университета, реализованный с применением технологии VLAN стандарта IEEE 802.1Q;
- 4) системы телекоммуникационного общения:
  - платформа видеоконференций Openmeeting;
  - система электронной почты mail.pguas.ru.

В целом все перечисленные выше проблемы и способы их решения замыкаются на задаче поиска эффективных форм передачи информации, в решении которой участвуют все преподаватели, ведущие учебные курсы. Как показывает опыт, включение компьютерных технологий в учебный процесс повышает его эффективность, но в то же время предъявляет особые требования и к подготовке учебных материалов, используемых преподавателями при чтении лекций, и к средствам самостоятельного обучения студентов, таким, как электронные учебники и контролирующие тесты по разным дисциплинам. Внедрению новых информационных технологий в учебно-воспитательный процесс предшествует большая подготовительная работа, требующая от преподавателя не только знания материала по базовой дисциплине, но и владения информацией о современных компьютерных технологиях, а также умения эффективно их использовать, а следовательно, больших затрат времени и сил. Это приводит к изменению функций педагога, который вместе со студентами становится программистом, компьютерным дизайнером, а также организатором и режиссером мультимедиа. Качество видеоматериала, как правило, зависит от выбора инструмента для создания электронных систем обучения и определяется степенью мастерства дизайнера и его компьютерной грамотностью.

Компьютер позволяет существенно расширить диапазон применяемых видов познавательной деятельности и получаемых студентом умений и навыков. Становится возможным включать активные формы обучения в самостоятельную работу студентов, осуществлять автоматизированный контроль и самоконтроль уровня знаний студентов. Сегодняшние студенты в своем большинстве готовы участвовать в совместных с преподавателями научно-технических и педагогических проектах. Использование информационных технологий в обучении способствует воспитанию у студентов серьезного отношения к самостоятельной работе, что в конечном счете направлено на подготовку молодых людей – будущих профессионалов – к активной творческой жизни.



Поиск путей и средств решения обозначенных проблем приводит к необходимости расширения форм обучения и внедрения новых информационных технологий во все сферы деятельности образовательной организации. Формы обучения в современном вузе можно разделить на три вида: 1) пассивные, когда основным действующим лицом является преподаватель, а студенты выступают в роли пассивных слушателей; 2) активные, когда студенты являются равноправными участниками; 3) интерактивные, когда активность студентов в процессе обучения доминирует. Наряду с классическими формами обучения все большую актуальность приобретают инновационные формы обучения. Широкое внедрение компьютерных технологий во все виды аудиторных занятий и информатизация вуза в целом способствуют применению интерактивных форм обучения и, как следствие, активному вовлечению студентов в учебный процесс.

Методическое сопровождение основных образовательных программ в электронной информационно-образовательной среде реализуется путем доступа в сети Интернет к учебно-методическим комплексам дисциплин, обеспечения взаимодействия преподавателей и обучающихся, проведения консультаций и тестирования.

Цель образования состоит в том, чтобы помочь человеку раскрыть его потенциал не только для того, чтобы он стал полезным членом общества, в котором живет, но и для его собственного удовлетворения от реализации своих индивидуальных способностей и талантов. Наличие электронной информационно-образовательной среды позволит увеличить время контактной работы преподавателя со студентами, что, несомненно, скажется на повышении качества обучения.

#### Список литературы

1. Кошев, А.Н. Управление системой информатизации университета / А.Н. Кошев, В.В. Кузина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Общественные науки. – 2012. – № 2. – С. 146–151.
2. Васин, Л.А. Электронная информационная образовательная среда на основе открытого программного обеспечения для подготовки специалистов в области строительства / Л.А. Васин // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4 (33). – С. 193–200.

#### References

1. Koshev, A.N. University management of information system / A.N. Koshev, V.V. Kuzina // News of higher educational institutions. Volga region. Social science. – 2012. – No. 2. – P. 146–151.
2. Vasin, L.A. Electronic information educational environment based on open source software for training specialists in the field of construction / L.A. Vasin // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 4 (33). – P. 193–200.

УДК 004.725

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

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

**Васин Леонид Анатольевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
зав. кафедрой «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: leo@pguas.ru

*Penza State University of Architecture and Construction*

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

**Vasin Leonid Anatolievich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department «Information-  
computing systems»  
E-mail: leo@pguas.ru

## ОРГАНИЗАЦИЯ ВИДЕОКОНФЕРЕНЦИЙ В ЭЛЕКТРОННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ УНИВЕРСИТЕТА

Л.А. Васин

Повышение требований к современному образовательному процессу диктует необходимость электронного взаимодействия между его участниками. Такая возможность позволяет расширить доступность образовательного процесса за счет дистанционного участия в нем обучающихся. Развитие персональных платформ широкополосного доступа и высокоскоростной мобильной сети общего пользования четвертого поколения позволяет обучающемуся интегрироваться в образовательную среду в любом удобном месте.

Наиболее удобным для общения и результативным в образовательном процессе является формат видеоконференции. Он позволяет организовать двусторонний визуальный контакт между преподавателем и обучающимися, находящимися на значительном удалении друг от друга. Это очень важный аспект организации учебного процесса по заочной, очно-заочной и дистанционной формам.

Развитие программных платформ электронных курсов обеспечивает студентам доступ к учебным материалам, а преподавателям – возможность контролировать их знания через системы тестовых заданий. Интегрирование системы видеоконференции непосредственно в электронные курсы позволяет создавать тематические видеолекции по изучаемой дисциплине.

Рассмотрен один из вариантов создания видеоконференции путем использования открытого программного обеспечения на платформе электронных курсов Moodle.

*Ключевые слова: информационная система, электронное образование, открытая платформа, электронные курсы, видеотрансляция, видеопоток, видеокамера*

## ORGANIZATION OF VIDEO CONFERENCES IN THE ELECTRONIC INFORMATIONAL EDUCATIONAL SYSTEM OF THE UNIVERSITY

L.A. Vasin

Increasing the requirements for the modern educational process requires the presence of electronic interaction between participants in the educational process. Such an opportunity makes it possible to expand the accessibility of the educational process through the distance participation of the students in it. The development of personal broadband access platforms and high-speed mobile public network of the fourth generation allows the student to integrate into the educational environment in any convenient place.

The most convenient for communication and effective in the educational process is the video conference format. It allows you to organize two-way visual contact between the teacher and students at a considerable distance. This is a very important aspect of the organization of the educational process in correspondence, part-time and distance forms of education.

The development of software platforms for electronic courses provides students with the opportunity to access educational materials, and gives teachers the ability to monitor their knowledge through test task systems. Integration of the video conference system directly into e-learning courses allows creating thematic video lectures on the discipline under study.

One of the options for creating a video conference by using open source software on the Moodle e-learning platform is considered.

*Keywords: information system, e-education, open platform, e-courses, video transmission, video stream, video camera*

### Введение

При организации электронной информационной образовательной среды (ЭИОС) необходимо реализовать все требования, предъявляемые к ней. В частности, необходимо обеспечить синхронное и асинхронное информационное взаимодействие. Наиболее удобной и логически организационно завершенной является интеграция электронных курсов и системы видеоконференции в единое информационное пространство. Это позволяет разделять видеоконференции на предметно ориентированные части в рамках направлений подготовки, что дает возможность преподавателю создавать видеолекции как элемент курса с возможностью синхронного взаимодействия. Такая система видеоконференций должна быть встроена в систему электронного образования.

Отличительной чертой современной реализации видеоконференции как базового элемента видеокурсов является наличие системы электронной доски, которая позволяет преподавателю иметь виртуальный аналог традиционной схемы проведения лекции, когда используются пояснения преподавателя на лекционной доске. Преимуществом электронной доски является возможность создавать пометки и зарисовки, отображать заранее заготовленные картинки, видеозаписи и различные тексты для всех подключившихся участников, а также демонстрировать слайды и презентации.

Организация видеоконференции обычно подразумевает настройку двух системных компонент: сервера видеоконференций и системы электронных курсов – и интеграцию их в существующую систему. Кроме этого, необходим Интернет-канал с хорошей пропускной способностью, а также механизм управления сетевым трафиком QoS с возможностью его приоритизирования.

В настоящее время успешно внедрены несколько систем организации видеоконференций открытой программной реализации OpenMeetings, BigBlueButton и коммерческой реализации Adobe Connect, Skype. Коммерческие версии отлично подходят для создания самостоятельной видеоконференции как групповой, так и индивидуальной направленности, но не обладают возможностями встраивания в системы электронных курсов, и в них отсутствуют функции, необходимые для организации видеолекций.

OpenMeetings и BigBlueButton являются свободным программным обеспечением, с возможностью модернизации исходного кода, встраиванием в существующие информационные системы. Они обладают возможностью создания и ведения видеоконференций, видеосеминаров, обеспечивают пространство для коллективной работы – виртуальная доска, демонстрация видео и презентаций с аудиоподготовкой, увеличение объектов (лупа), показ рабочего стола, запись трансляции в видеофайл, проведение опросов.

OpenMeetings позволяет встраиваться в систему электронных курсов Moodle как дополнительный элемент курса, что дает возможность представлять семинар, лекцию в более естественной, свободной форме по сравнению с электронной тестовой формой. В этом случае играет роль интонация, поведение преподавателя, его внешний вид, речь. Визуализация процесса общения позволяет идентифицировать обучающегося, что гарантирует контроль его знаний со стороны преподавателя.

### Основная часть

Использование видеоконференций в рамках системы электронного образования как элемента курса позволяет значительно расширить возможности университетской ЭИОС. Наличие лицензии на открытое использование программного продукта дает возможность значительно снизить затраты на его внедрение и техническую поддержку.

В ЭОИС университета применяется открытое программное обеспечение OpenMeetings, позволяющее организовывать видеоконференции различных типов («точка-точка», «многоточка»), а также использовать их как элемент курса. Осуществляется online-поддержка до двух десятков участников, каждый из которых может осуществлять работу по передаче мультимедийного контента. Видеоконференции могут организовываться как открытые (публичные), так и закрытые (личного характера). Организация видеолекций возможна для нескольких сотен участников, для каждого из которых осуществляется трансляция видеопотока. Один сервер может обработать произвольное количество конференций в изолированных виртуальных конференц-залах и иметь собственный набор участников. Сервер имеет развитые возможности по управлению конференциями.

OpenMeetings позволяет осуществлять поддержку текстовых и графических файлов в самых распространенных форматах. Такие файлы могут быть доступны всем участникам конференции после проведения конвертации. Участники видеоконференции могут проводить редакцию загруженного материала, кроме этого, имеется возможность проведения опросов.

Сервер OpenMeetings использует в качестве базового компонента сервер Red5, который является открытой реализацией Adobe Flash Media Server для поддержки работы в реальном времени.

Таким образом, технические возможности OpenMeetings позволяют реализовать систему видеоконференции в университете со следующими выполняемыми характеристиками:

- обеспечение «точка-точка»- и «многоточка»-видеосвязи;
- интеграция с системой электронных курсов Moodle;
- наличие режима виртуальной доски;
- низкие затраты на внедрение;
- совместная работа на «белой доске» и с офисными документами;
- возможность осуществления записи сеанса видеоконференции;
- использование адресной книги по протоколу LDAP.

Архитектура системы показана на рис. 1.

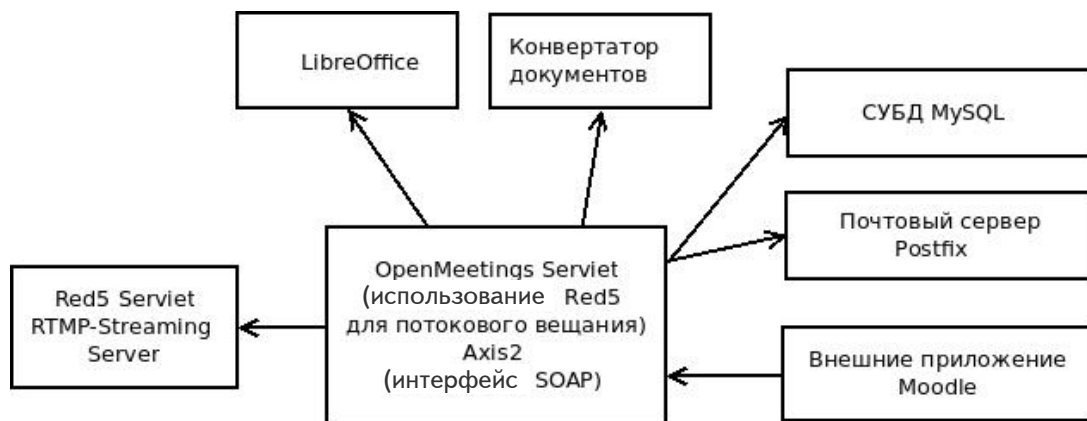


Рис. 1. Структурная организация системы OpenMeetings

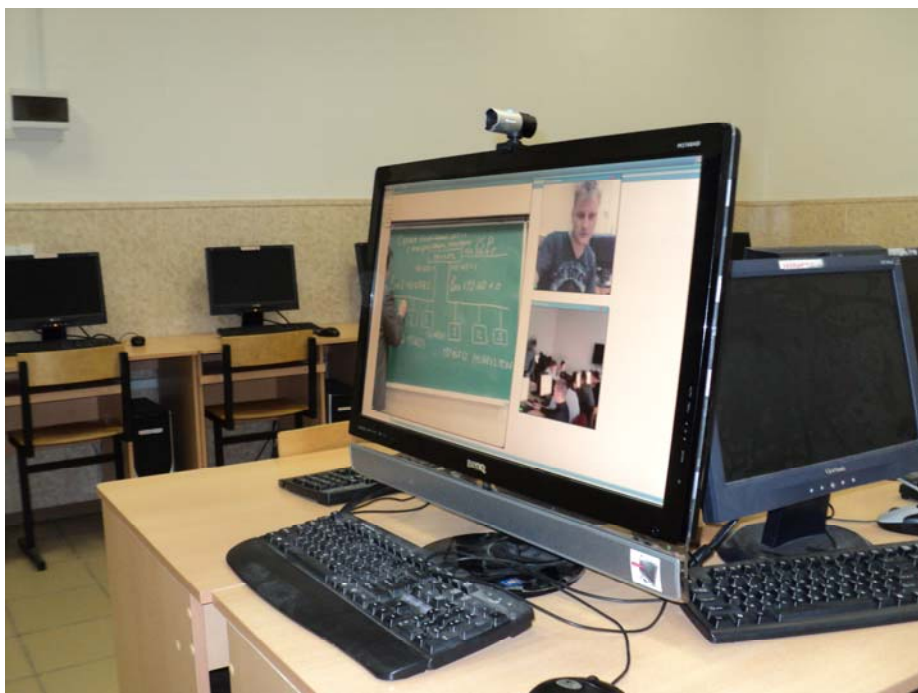
OpenMeetings устанавливается на физический сервер для обеспечения необходимой производительности. При невысокой нагрузке допускается проводить установку на одном сервере с электронными курсами Moodle. Авторизация пользователей производится с использованием существующего сервера каталога университета OpenLDAP.

В университете сервер OpenMeetings развернут на основе системы виртуализации KVM под управлением ОС Linux. Он полностью изолирован от сервера электронных курсов. Это позволяет быстро и безопасно проводить репликации системы видеокон-

ференций при нехватке ресурсов, делать резервные копии и восстанавливать его состояние при аппаратно-программных сбоях.

Организация рабочего места преподавателя осуществляется с использованием видеокамер различного класса: от профессиональных, установленных на штативе, и до Web-камер. Последние удобно применять на рабочих местах студентов и преподавателей при индивидуальном использовании. В качестве клиентского программного обеспечения применяется стандартный Web-браузер. Пользовательская операционная система может быть любой, как Windows, так и Linux или MacOS. На рис. 2–3 показаны варианты использования различных вариантов организации рабочих мест участников видеоконференции.

а



б



Рис. 2. Рабочее место преподавателя

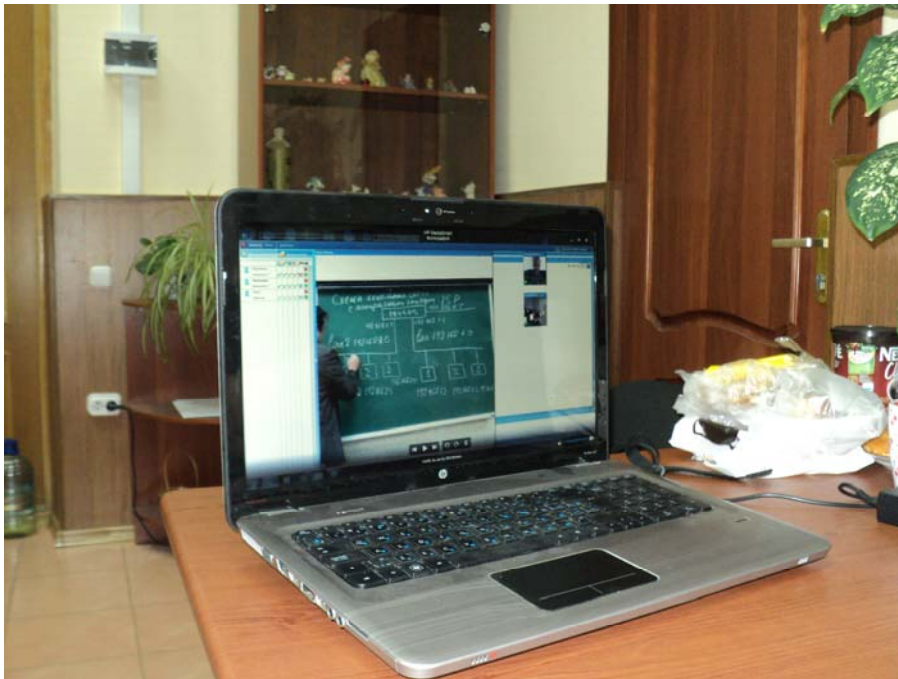


Рис. 3. Мобильное рабочее место студента

**Выводы:**

1. Показана возможность создания системы видеоконференции на основе открытого программного обеспечения OpenMeetings.
2. Отмечено, что систему видеоконференции можно встраивать в контент электронных курсов в качестве его элемента.
3. Определена технология использования системы видеоконференции в составе ЭИОС университета.

**Список литературы**

1. Unix и Linux. Руководство системного администратора / Э. Немет, Г. Снайдер, Тренд Р. Хейн, Б.н Уэйли. – М.: Изд-во «Вильямс», 2014. – 1312 с.
2. Парди, Г. LINUX руководство администратора сети / Г. Парди, Т. Доусон, Т. Боттс. – СПб.: Изд-во «КУДИЦ-Пресс». – 470 с.
3. Андреев, А.В. Практика электронного обучения с использованием Moodle / А.В. Андреев, С.В. Андреева, И.Б. Доценко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – 146 с.

**References**

1. Unix and Linux. System Administrator's Guide / E. Nemet, G. Snyder, Trend R. Hein, B.N. Wayley. – M.: Williams Publishing House, 2014. – 1312 p.
2. Pardee, G. LINUX network administrator's guide / G. Pardee, T. Dawson, T. Botts. – SPb.: Publishing house «KUDITS-Press». – 470 p.
3. Andreev, A.V. The practice of e-learning with the use of Moodle / A.V. Andreev, S.V. Andreeva, I.B. Dotsenko. – Taganrog: Publishing house of TIT SFedU, 2008. – 146 p.