

**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 15.06.2019.  
Формат 60x84 1/8.  
Уч.-изд.л. 27,875. Тираж 500 экз. Первый завод 100.  
Заказ № 316.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

**РЕГИОНАЛЬНАЯ  
АРХИТЕКТУРА  
И СТРОИТЕЛЬСТВО**  
2(39)/2019

**Содержание**

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ.....	5
<b>Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.</b> КОМПОЗИТЫ С СИСТЕМНЫХ ПОЗИЦИЙ .....	5
<b>Селяев В.П., Селяев П.В., Кечуткина Е.Л., Киселёв Н.Н.</b> АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕРНИСТЫХ СИСТЕМ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕНОСА И ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ВАКУУМНЫХ ПАНЕЛЕЙ .....	11
<b>Белякова Е.А., Москвин Р.Н., Тараканов О.В., Куимова Е.И., Утюгова Е.С.</b> ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ ЗАТВЕРДЕВШИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ ОТ СООТНОШЕНИЯ ЦЕМЕНТА И ЗОЛЫ.....	20
<b>Жегера К.В., Пышкина И.С.</b> ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОСИЛИКАТОВ КАЛЬЦИЯ В ОТДЕЛОЧНОМ СОСТАВЕ .....	27
<b>Романенко И.И.</b> СТОЙКОСТЬ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ В ЦЕМЕНТНОМ КАМНЕ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СООРУЖЕНИЙ.....	32
<b>Петровнина И.Н.</b> ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ПУТЕМ ИНГИБИРОВАНИЯ КОРРОЗИИ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИЦЕЛИАЛЬНЫХ МАСС .....	39
<b>Логанина В.И.</b> О СВЯЗИ СТОИМОСТИ ОТДЕЛОЧНЫХ РАБОТ С КАЧЕСТВОМ ИХ ВНЕШНЕГО ВИДА.....	44
<b>Акимова В.Ю., Домке Э.Р., Жесткова С.А., Капунова М.К.</b> ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДОСТАВКИ СТРОИТЕЛЬНОГО ГРУЗА АВТОТРАНСПОРТОМ В КОМПАНИИ «ООО ПКФ ТЕРМОДОМ» .....	51
<b>Селяев В.П., Алимов М.Ф., Селяев П. В., Шабаетов И. Н.</b> ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА ПРИ СЖАТИИ .....	63

© Авторы публикаций, 2019  
© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2019  
© ПГУАС, 2019

<b>Орынбеков Е.С., Селяев В.П., Нурлыбаев Р.Е., Кульдеев Е.И.</b> СУХИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ СМЕСИ ДЛЯ ШТУКАТУРНЫХ РАБОТ С ТОНКО- ДИСПЕРСНЫМИ МИНЕРАЛЬНЫМИ АКТИВНЫМИ ДОБАВКАМИ.....	72	ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ.....	155
<b>Гарькина И.А., Данилов А.М.</b> ОСНОВЫ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ.....	80	<b>Осипова Н.Н., Гришин Б.М., Родионов Ю.В., Тараканов О.В.</b> ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КРИСТАЛЛОГИДРАТОВ В РЕГУЛЯТОРАХ ДАВЛЕНИЯ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ РЕЗЕРВУАРНЫХ УСТАНОВОК.....	155
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ .....	86	<b>Вилкова Н.Г., Мишина С.И.</b> ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ВЕЩЕСТВ РАЗЛИЧНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ МЕТОДОМ АДСОРБЦИОННОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ.....	163
<b>Бакушев С.В.</b> ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ДЕКАРТОВЫХ КООРДИНАТАХ ПРИ БИЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ЗАМЫКАЮЩИХ УРАВНЕНИЙ (геометрически нелинейная модель).....	86	<b>Андреев С.Ю., Яхкин Д.И., Князев А.А.</b> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ.....	174
<b>Шени А.И.</b> ОПТИМИЗАЦИЯ РАМ С РАВНОУСТОЙЧИВЫМИ ЧАСТЯМИ.....	100	<b>Боровков Д.П., Чичиров К.О., Грейсух Г.И., Ежов Е.Г.</b> МОБИЛЬНАЯ АСПИРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОГРУЗОЧНЫХ РАБОТ ПРИ ДЕМОНТАЖЕ ЗДАНИЙ.....	183
<b>Вдовин В.М., Карпов В.Н.</b> ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ РЕБРИСТЫХ ПАНЕЛЕЙ ПЕРЕКРЫТИЯ ПОЛНОСБОРНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ДОМОВ.....	108	<b>Еремкин А.И., Баканова С.В.</b> РАСЧЁТ ОБЩЕОБМЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ НА РАЗБАВЛЕНИЕ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ В ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПОМЕЩЕНИЯХ.....	194
<b>Вдовин В.М.</b> ЖЕСТКИЙ ОПОРНЫЙ УЗЕЛ КЛЕЕНОЙ ДЕРЕВЯННОЙ СТОЙКИ .....	116	<b>Монаркин Н.Н., Лукин С.В., Кочкин А.А.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАЦИОНАРНОГО ПЕРЕКЛЮЧАЮЩЕГОСЯ РЕГЕНЕРАТИВ- НОГО ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА НА ЕГО ТЕПЛОВУЮ И АЭРОДИНАМИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ.....	199
<b>Гучкин И.С., Ласьков Н.Н., Резаева Т.А.</b> УСТРОЙСТВО ДЛЯ СТРОПОВКИ И КРЕПЛЕНИЯ ПУСТОТНЫХ ПЛИТ БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ ..	120	<b>Васин Л.А.</b> ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ ЖИЛОГО ИНДИВИДУАЛЬНОГО ДОМА.....	205
<b>Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Безрукова М.С.</b> ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РЕАЛИЗАЦИИ КОРРЕКТИРУЮЩИХ И ПРЕДУПРЕЖДАЮЩИХ ДЕЙСТВИЙ ПРИ МОНТАЖЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕТАЛЛОПЛАСТИКОВЫХ ОКОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	127	АРХИТЕКТУРА.....	211
<b>Гречишкин А.В., Артюшин Д.В., Коновалов П.В., Праслов М.А.</b> ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СООРУЖЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ .....	135	<b>Нугманова Г.Г.</b> ИМПЕРСКИЕ ОБРАЗЫ В ОБЛИКЕ ПАРАДНОГО ЦЕНТРА КАЗАНИ В XIX – НАЧАЛЕ XX ВЕКА.....	211
<b>Нежданов К.К., Гарькин И.Н.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НЕРАЗРЕЗНОЙ ПОДКРАНОВОЙ БАЛКИ.....	142	<b>Лола А.М., Лола У.А., Меньшикова Е.П.</b> НЕОБХОДИМОСТЬ ЗНАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ АРХИТЕКТОРАМИ.....	217
<b>Нежданов К.К., Гарькин И.Н.</b> ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОЛОНН КАК ТРУББЕТОННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОВАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ.....	149		

# Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS .....	86
<b>Budylnina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.</b> COMPOSITES FROM SYSTEM POSITIONS.....	5	<b>Bakushev S.V.</b> DIFFERENTIAL EQUATIONS OF EQUILIBRIUM SOLID ENVIRONMENT FOR FLAT DEFORMATION IN CARTESIAN COORDINATES WITH BILINEAR APPROXIMATION OF CLOSING EQUATIONS (geometrically nonlinear model).....	86
<b>Selyaev V.P., Selyaev P.V., Kechytkina E.L., Kiselyov N.N.</b> ANALYSIS AND DEFINITION OF THE MAIN PARAMETERS OF GRANULAR SYSTEMS AFFECTING THE TRANSFER PROCESS AND HEAT-SHIELDING PROPERTIES OF VACUUM PANELS .....	11	<b>Shein A.I.</b> OPTIMIZATION OF FRAMES WITH EQUALLY STABLE PARTS .....	100
<b>Belyakova E.A., Moskvina R.N., Tarakanov O.V., Kuimova E.I., Utugova E.S.</b> THE DEPENDENCE OF THE PROPERTIES OF HARDENED COMPOSITE BINDERS ON THE RATIO OF CEMENT AND ASH.....	20	<b>Vdovin V.M., Karpov V.N.</b> THE CHOICE OF A RATIONAL DESIGN OF RIBBED SLABS IN PREFABRICATED WOODEN HOUSES .....	108
<b>Zhegera K.V., Pyshkina I.S.</b> ASSESSMENT OF ECONOMIC EFFICIENCY OF CALCIUM HYDRO SILICATES APPLICATION IN THE FINISHING COMPOSITION .....	27	<b>Vdovin V.M.</b> RIGID SUPPORT UNIT OF GLUED WOODEN RACK .....	116
<b>Romanenko I.I.</b> DURABILITY OF FILLERS IN CEMENT STONE FOR ENSURING THE DURABILITY OF STRUCTURES .....	32	<b>Guchkin I.S., Laskov N.N., Rezaeva T.E.</b> DEVICE FOR SLINGING AND FASTENING OF HOLLOW PLATES OF FORMWORK-FREE MOLDING.....	120
<b>Petrovnina I.N.</b> IMPROVEMENT OF CONCRETE DURABILITY INHIBITING STEEL CORROSION USING MICELIAL MASSES.	39	<b>Makarova L.V., Tarasov R.V., Bezrukova M.S.</b> EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE IMPLEMENTATION PROCESS OF CORRECTIVE AND PREVENTIVE ACTIONS WHEN MOUNTING AND OPERATION OF METALPLASTIC WINDOW STRUCTURES .....	127
<b>Loganina V.I.</b> ON THE RELATIONSHIP OF THE FINISHING WORKS COST ON THE QUALITY OF THEIR APPEARANCE.....	44	<b>Grechishkin A.V., Artyushin D.V., Kononov P.V., Praslov M.A.</b> DIAGNOSTICS OF TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL SUBSTATIONS CONSTRUCTIONS .....	135
<b>Akimova V.Yu., Domke E.R., Zhestkova S.A., Kapunova M. K.</b> OPTIMIZATION OF THE SYSTEM OF DELIVERY CONSTRUCTION CARGO BY ROAD TRANSPORT COMPANY "PKF TERMODOM» .....	51	<b>Nezdanov K.K., Garkin I.N.</b> STUDY OF STRESS STATE OF CONTINUOUS CRANE GIRDER.....	142
<b>Selyaev V.P., Alimov M.F., Selyaev V.P., Shabayev I.N.</b> A DIFFERENTIATED ANALYSIS OF DIAGRAMS OF CONCRETE DEFORMATION UNDER COMPRESSION .....	63	<b>Nezdanov K.K., Garkin I.N.</b> INCREASING THE BEARING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS.....	149
<b>Orynbekov E.S., Selyaev V.P., Nurlybaev R.E., Kuldeyev E.I.</b> DRY CONCRETE MIXES FOR PLASTERING WITH FINE MINERAL ADDITIVES .....	72	ENGINEERING SYSTEMS.....	155
<b>Garkina I.A., Danilov A.M.</b> BASES OF SYSTEM RESEARCH IN SCIENCE OF MATERIALS .....	80	<b>Osipova N.N., Grishin B.M., Rodionov Yu.V., Tarakanov O.V.</b> ENSURING THE CONDITIONS FOR THE PREVENTION OF CRYSTAL HYDRATES FORMATION IN PRESSURE REGULATORS OF GAS SUPPLY SYSTEMS ON THE BASIS OF TANK INSTALLATIONS.....	155

<p><b>Vilkova N.G., Mishina S.I.</b> CLEANING OF WASTE WATER FROM SUBSTANCES OF VARIOUS CHEMICAL NATURE BY ADSORPTION CONCENTRATION..... 163</p> <p><b>Andreev S.Yu., Yakhkind M.I., Knyazev A.A.</b> COMPARATIVE ANALYSIS OF THE METHODS FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE TURBULENT FLOW IN THE PRESSURE PIPE..... 174</p> <p><b>Borovkov D.P., Chichirov K.O., Greisukh G.I., Ezhov E.G.</b> MOBILE ASPIRATION INSTALLATION FOR LOADING WORKS DURING DISMANTLING OF BUILDINGS..... 183</p> <p><b>Yeremkin A.I., Bakanova S.V.</b> CALCULATION OF GENERAL VARIABLE VENTILATION FOR EQUIPMENT OF HARMFUL GASES IN FARMS..... 194</p>	<p><b>Monarkin N.N., Lukin S.V., Kochkin A.A.</b> INFLUENCE OF STRUCTURAL AND REGIME PARAMETERS OF STATIONARY SWITCHABLE REGENERATIVE HEAT EXCHANGER ON THERMAL AND AERODYNAMIC EFFICIENCY ..... 199</p> <p><b>Vasin L.A.</b> APPROACH TO THE CREATION OF THE INFORMATION MANAGEMENT SYSTEM FOR AUTOMATION OF ENGINEERING SYSTEMS OF A INDIVIDUAL RESIDENTIAL HOUSE .....205</p> <p>ARCHITECTURE ..... 211</p> <p><b>Nugmanova G.G.</b> IMPERIAL IMAGES IN THE PHYSIOGNOMY OF THE NINETEENTH – EARLY TWENTIETH CENTURY KAZAN CITY CENTER .....211</p> <p><b>Lola A.M., Lola J.A., Menshikova E.P.</b> NEED FOR KNOWLEDGE OF INFORMATION TECHNOLOGIES FOR ARCHITECTS .....217</p>
---	--

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 519.7:691

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

**Будылина Евгения Александровна**,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры «Инфокогнитивные  
технологии»

E-mail: bud-ea@yandex.ru

*Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства*

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

**Гарькина Ирина Александровна**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Математика и математическое  
моделирование»

E-mail: fmatem@pguas.ru

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

*Moscow Polytechnic University*

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

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

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Garkina Irina Aleksandrovna**,  
Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Mathematics  
and Mathematical Modeling»

E-mail: fmatem@pguas.ru

**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

## КОМПОЗИТЫ С СИСТЕМНЫХ ПОЗИЦИЙ

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

С учетом прагматической эффективности обсуждаются вопросы применения математического аппарата при проектировании композиционных материалов, в том числе при решении проблем, в которых он применялся несистемно или иррационально. Показывается необходимость соответствия управляющих воздействий (рецептурно-технологические параметры) общим системным закономерностям; если внешнее управленческое воздействие не совпадает с системными закономерностями и противоречит им, то достижение положительного результата невозможно. Отмечается, что в каждом временном срезе системные закономерности (определяются современной парадигмой) теоретически могут быть различными. Определяются методы структурирования композиционных материалов: сначала на интуитивно-содержательном уровне, затем – на основе формирования обобщенных математических моделей, формализованных на эффективной нормативной системной модели. Показаны результаты приложения методов системного анализа к проектированию композитов специального назначения.

*Ключевые слова: композиты, сложные системы, системный подход, структурирование, проектирование, моделирование, управляющее воздействие*

**COMPOSITES FROM SYSTEM POSITIONS**

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

Considering pragmatic efficiency, the use of mathematical apparatus in the design of composite materials are discussed, including solving problems in which it was used non-systemically or irrationally. The necessity of compliance of the control actions (prescription and technological parameters) with general system laws is shown; if the external managerial influence does not coincide with the system laws and contradicts them, the achievement of a positive result is impossible. It is noted that in each time period the system laws (determined by the modern paradigm) theoretically can be different. The methods of structuring composite materials are determined: first, at an intuitive-informative level, then – the formation of generalized mathematical models, formalized on an effective normative system model. The results of application the systems analysis methods to the design of special-purpose composites are indicated.

*Keywords: composites, complex systems, system approach, structuring, design, modeling, control action*

При системном подходе к проектированию объект рассматривается как система ([1...5]; системные объекты: вход, выход, процесс, цель, обратная связь и ограничения; свойства описываются количественно; предполагается наличие связей между элементами и их свойствами). Цель изучения – создание обобщенной модели системы с учетом ее взаимодействия с окружающей средой и с выявлением интегративных свойств. В основе проектирования лежит *набор требований* к системе (*цели* и связанные с ними *критерии качества* системы), по которому проводится выбор *средств достижения целей*. *Функционирование* сложной системы осуществляется на *многих уровнях*. Возможно расчленение (*декомпозиция*) системы на подсистемы (необходимые для существования и функционирования системы компоненты). На *макроскопическом уровне* оценивается общее поведение системы как единого целого без учета ее детальной структуры. На *микроскопическом уровне* исследуются свойства элементов и взаимосвязи между ними (*структура системы*). В сложных системах с высокой степенью неопределенности, в том числе в композитах (*цели* носят качественный характер; получение аналитического выражения затруднительно), следует отличать цели от критериев. Если между целью и средствами ее достижения существует однозначная связь, то критерий можно задать в виде аналитического выражения (понятия цель и критерий совпадают). Критерии должны отражать существенные стороны функционирования системы (быть *репрезентативными*). При единственном критерии оптимальности принятие решений возможно уже на основе аналитического решения задачи оптимизации.

Построение системы критериев производится с учетом принципов *иерархичности* и *целостности*; частные критерии, предназначенные для решения задач низшего звена управления (подсистемы), логически совпадают с критериями, применяемыми на более высоком иерархическом уровне.

Редко удается связать *глобальную цель* проектирования непосредственно со средствами ее достижения. Поэтому и производится ее декомпозиция на частные локальные цели (построение дерева целей; *корень дерева соответствует генеральной цели, а остальные вершины – подцелям*, причем по мере опускания по уровням дерева цели становятся более частными). *Декомпозиция глобальной цели на подцели продолжается до тех пор, пока не появится возможность связать цели нижних уровней со средствами, обеспечивающими выполнение этих целей*.

Главная задача построения дерева – формирование по возможности полного набора средств, обеспечивающих достижение глобальной цели. Фактически дерево целей формируется эвристически. Его первоначальный вариант строится на базе *когнитивного моделирования (построение ориентированного графа [6, 7])*. Относительная важность отдельных элементов дерева традиционно определяется *методами квалиметрии с присущими им элементами субъективизма*. Поэтому *определение весовых констант* в глобальной критерии целесообразно производить с использо-

ванием корреляционных зависимостей частных критериев с глобальным (*по коэффициентам регрессии* [8]).

Рациональный выбор иерархии систем проектирования и управления, создание контуров принятия решений, необходимого числа уровней, установление правильных взаимосвязей между уровнями, организация информационных потоков определяются материальной природой объектов, характером происходящих в них процессов и взаимодействиями между ними, ограничениями на их функционирование, а также алгоритмами управления (оказывают непосредственное влияние на выбор структуры сложной системы).

Проиллюстрируем указанный подход в приложении к *проектированию радиационно-защитного композита* [9]. Здесь в *глобальный* критерий качества материала входят (как локальные) следующие критерии *первого* уровня: *полезность, качество функционирования, организация системы, эволюционная эффективность, экономическая эффективность*. Полезность оценивается по критериям *второго* уровня: *эксплуатационные характеристики материала, актуальность, перспективность, область применения*; качество функционирования – соответственно по критериям: *качество управления, помехозащищенность, точность, чувствительность, надежность*. Совершенство структуры оценивается по критериям *третьего* уровня: *субмикроструктура, микро- и макроструктура*. Эволюционная эффективность предполагает *возможность модификаций, наличие ресурсов, осуществимость*. Наконец, экономическая эффективность определяется по *стоимости (себестоимость ресурсов и продукции – критерии третьего уровня)* и *затратам* (производственные и энергозатраты, обучение персонала, техническое перевооружение).

В числе *основных характеристик материала* рассматриваются *критерии третьего уровня*: защитные свойства (коэффициенты ослабления, выведения, накопления), физико-механические свойства (плотность, прочность, теплоемкость, теплопроводность, водопоглощение, непроницаемость), долговечность, технологичность (*в скобках – критерии 4 уровня*). *Пятым уровнем* определяются структурные (*физико-химические и топологические*) показатели. Так, смачиваемость, адгезионное и когезионное взаимодействия, растворимость компонентов определяют взаимодействия на границе раздела фаз; а химические свойства определяются скоростью химических реакций и термодинамическими показателями.

*Важно, что в любой иерархической структуре критериев качества должна прослеживаться четкая связь между глобальным и частными критериями и обратно. С увеличением числа используемых уровней иерархии возможно более точное описание причинно-следственных связей. Число уровней, равно как и оптимальная иерархическая структура критериев качества, определяется современной парадигмой* [10], принятой в материаловедении. Исследователь, как правило, имеет дело со следствиями, *фактически все больше отдаляясь от причины по мере роста числа используемых уровней*.

Как уже отмечалось, материалы являются слабоструктурированными, трудно формализуемыми, с противоречивыми целями и критериями. Их проектирование связано с решением задач с нечеткими знаниями, целями и данными. Оптимизация сводится к определению экстремума некоторого функционала, зависящего одновременно от множества управляемых величин в их взаимосвязи. Качественный анализ строительных материалов как систем может осуществляться на основе построения *когнитивной карты* (структурная схема причинно-следственных связей; в математике – знаковый взвешенный ориентированный граф (*орграф*)). Такой подход использовался при разработке радиационно-защитного бетона. При его структуризации основное внимание уделялось анализу:

– *дисперсной фазы* (химический состав, количество, удельная поверхность, загрязненность и шероховатость поверхности; прочность, твердость, деформативность, сжимаемость; коэффициенты температурного расширения, теплопроводности, теплоемкости);

– *вяжущего вещества* (химический состав, вязкость в жидком состоянии, прочность, деформативность, усадка; коэффициенты температурного расширения, теплопроводности, теплоемкости);

– *добавок* (химический состав, концентрация, процедура введения).

Определялись причинно-следственные связи между свойствами компонентов, толщиной слоя вяжущего, химической активностью дисперсной фазы, пористостью, смачиваемостью, толщиной сольватного слоя вяжущего на границе раздела фаз, внутренними напряжениями, соотношениями деформативных и теплофизических свойств; наконец, подвижностью смеси, эксплуатационными характеристиками материала и его стойкостью в агрессивной среде [11...13].

По уровню формализации и возможностям решения практических задач когнитивные карты часто существенно различаются. Нами модели интерпретировались как представление знаний экспертов в виде некоторой структуры причинно-следственных влияний (обязательное ядро всех моделей семейства – ориентированный граф, с вершинами которого связаны факторы (концепты), и дуги, интерпретируемые как прямые причинно-следственные влияния (связи) между факторами [14...16]). Защита от риска недостоверных решений, потенциальные возможности моделирования и решения на основе когнитивных карт задач управления в слабоструктурированных системах указаны в [17].

Выводы:

1. Предложен подход к структурированию процесса формирования эксплуатационных характеристик композиционного материала.

2. Исследованы и развиты до уровня общих системных закономерностей межэлементные взаимосвязи в композитах как в сложных системах; полученные результаты фактически составляют концептуальную основу управления свойствами композитов с использованием иерархических структур критериев качества и собственно материала.

3. На основе предложенного подхода приведен опыт проектирования композиционных материалов для защиты от воздействия ионизирующего излучения; указаны методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза идентификации и оптимизации характеристик материалов как сложных систем.

#### Список литературы

1. 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. 412–417.
2. Гарькина, И.А. Единая концепция системного проектирования сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №1(38). – С.119–123.
3. Garkina, I.A. Composite Materials: Identification, Control, Synthesis / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol.471. – P. 032005.
4. Budylna, E. Control of multiobjective complex systems / E. Budylna, A.Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, №. 10. – P. 441–445.
5. Данилов, А.М. Итеративный теоретико-экспериментальный метод построения критериев качества многоцелевых систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, Я.И. Сухов // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 2 (23). – С. 120–124.
6. Данилов, А.М. Концептуальные модели композитов как сложных систем: состояние и перспективы / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 3 (36). – С. 56–61.
7. Гарькина, И.А. Когнитивное моделирование при синтезе композиционных материалов как сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 3–4 (603–604). – С. 30–37.
8. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: МГСУ, 2012. – 432 с. (Библиотека научных разработок и проектов МГСУ).

9. Garkina, I.A. Property Modelling and Durability of Composite Materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2019. – 471 (032004).
10. Гарькина, И.А. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2018. – № 1–2. – С. 60–62.
11. 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.
12. Гарькина, И.А. Краткий обзор аналитических методов синтеза сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №4(37). – С.48–54.
13. Данилов, А.М. Приближенные методы аналитического конструирования композиционных материалов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №1(38). – С.24–29.
14. Garkina, I.A. Experience of Development of Epoxy Composites: Appendix of Methods of Rank Correlation / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Key Engineering Materials. – 2018. – Vol.777. – P. 8–12.
15. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V.191. – P. 012006.
16. Гарькина, И.А. Проектирование и оптимизация сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №4(37). – С.5–11.
17. Авдеева, З.К. Когнитивный подход в управлении / З.К. Авдеева, С.В. Коврига, Д.И. Макаренко, В.И. Максимов // Проблемы управления. – 2007. – № 3. – С. 2–8.

#### References

1. 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. 412–417.
2. Garkina, I.A. Unified system design concept for complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2019. – №1 (38). – P.119–123.
3. Garkina, I.A. Composite Materials: Identification, Control, Synthesis / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol.471. – P. 032005.
4. Budylyna, E. Control of multiobjective complex systems / E. Budylyna, A.Danilov, I. Garkina. // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, №. 10. – P. 441–445.
5. Danilov, A.M. Iterative experimental-theoretical method for constructing quality criteria for multi-purpose systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina, Ya.I. Sukhov // Regional architecture and engineering. – 2015. – № 2 (23). – P. 120–124.
6. Danilov, A.M. Conceptual models of composites as complex systems: state and prospects / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 3 (36). – P. 56–61.
7. Garkina, I.A. Cognitive modeling in the synthesis of composite materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Proceedings of higher educational institutions. Building. – 2009. – №. 3–4 (603–604). – P. 30–37.
8. Bazhenov, Yu.M. System analysis in construction materials / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – M.: MGSU, 2012. – 432 p. (Library of scientific developments and projects of MGSU).
9. Garkina, I.A. Property Modelling and Durability of Composite Materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol.471. – P.032004.
10. Garkina, I.A. The evolution of ideas about composite materials from the standpoint of changing paradigms / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Construction materials. – 2018. – № 1–2. – P. 60–62.
11. 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.

12. Garkina, I.A. A brief overview of the analytical methods for the synthesis of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering. – 2018. – №4 (37). – P.48–54.

13. Danilov, A.M. Approximate methods of analytical design of composite materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2019. – №1 (38). – P.24–29.

14. Garkina, I.A. Experience of Development of Epoxy Composites: Appendix of Methods of Rank Correlation / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Key Engineering Materials. – 2018. – Vol.777. – P. 8–12.

15. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V.191. – P. 012006.

16. Garkina, I.A. Design and optimization of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Regional architecture and construction. – 2018. – №4 (37). – С.5–11.

17. Avdeeva, Z.K. Cognitive approach to management / Z.K. Avdeeva, S.V. Kovriga, D.I. Makarenko, V.I. Maksimov // Control sciences. – 2007. – № 3. – P. 2–8.

УДК 666.972.7

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

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

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

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

**Кечуткина Евгения Львовна,**  
инженер кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: kechytkina85@mail.ru

**Киселёв Николай Николаевич,**  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: oliyaskin@mail.ru

*Ogarev Mordovia State University*

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

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

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

**Kechytkina Evgenya Lvovna,**  
Engineer of the department «Building  
structures»  
E-mail: kechytkina85@mail.ru

**Kiselyov Nikolay Nikolaevich**  
Postgraduate of the department «Building  
structures»  
E-mail: oliyaskin@mail.ru

## АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕРНИСТЫХ СИСТЕМ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕНОСА И ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ВАКУУМНЫХ ПАНЕЛЕЙ\*

В.П. Селяев, П.В. Селяев, Е.Л. Кечуткина, Н.Н. Киселёв

В результате анализа и определения структурных параметров зернистой системы, сформированной из синтезированных частиц диоксида кремния, установлено, что при производстве вакуумных изоляционных панелей их теплозащитные свойства можно регулировать путем изменения: давления, вязкости, молекулярного веса газа; пористости макроструктуры и кластеров; теплопроводности твердой и газовой фаз системы; коэффициента аккомодации; координационного числа; размера первичных частиц; фрактальной размерности, характеризующей топологические особенности строения частиц, агрегатов, глобул, кластеров и их склонность к диссипации энергии молекул газа.

*Ключевые слова: синтез, оксид кремния, теплопроводность, структура, вакуумные панели, микрокремнезем, фрактальная размерность, топология*

## ANALYSIS AND DEFINITION OF THE MAIN PARAMETERS OF GRANULAR SYSTEMS AFFECTING THE TRANSFER PROCESS AND HEAT-SHIELDING PROPERTIES OF VACUUM PANELS

V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, E.L. Kechytkina, N.N. Kiselyov

As a result of the analysis and determination of structural parameters of granular system formed from the synthesized particles of silicon dioxide, it was found that in the production of vacuum

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ N 18-48-130001/18 «Оптимизационное моделирование свойств теплоизоляционных функционально-градиентных изделий на основе минеральных порошков оксида кремния, синтезированного из природного диатомита».

insulation panels, their heat-shielding properties can be adjusted by changing: pressure, viscosity, molecular weight of the gas; porosity of the macrostructure and clusters; thermal conductivity of the solid and gas phase of the system; accommodation coefficient; coordination number; size of primary particles; fractal dimension characterizing the topological features of the structure of particles, aggregates, globules, clusters and their tendency to dissipate the energy of molecules.

*Keywords: synthesis, silicon oxide, thermal conductivity, structure, vacuum panels, microsilica, fractal dimension, topology*

Ожидаемый рост строительства жилья выдвигает на первый план проблему повышения энергоэффективности зданий. Строительство энергоэффективных энергосберегающих домов предполагает применение новых конструктивных решений, технологий, материалов для теплозащиты. В передовых странах мира в настоящее время активизированы работы по созданию и применению вакуумных изоляционных панелей (ВИП), которые имеют коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,002 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 / \text{К}$  [1–4]. Низкая теплопроводность достигается путем создания в объеме ВИП иерархически организованной поровой структуры из зернистого наполнителя.

Целью настоящей работы является анализ и определение основных параметров зернистой системы частиц, синтезированных из диатомита, влияющих на формирование оптимальной поровой структуры, обеспечивающей заданный уровень теплопроводности изделия ВИП.

Механизм переноса тепла в зернистых, пористых системах достаточно сложный, так как теплообмен происходит в материале, состоящем из двух фаз (твердой и газовой) и на границе фаз [1, 5].

Теплоперенос в зернистой системе может осуществляться от одной твердой частицы к другой (индуктивная составляющая –  $\lambda_1$ ). При этом теплопроводность будет зависеть от: химического и элементного состава материала; гранулометрии частиц; топологии поверхности – наличия неоднородностей, дефектов на поверхности; числа касаний и площади контакта между частицами.

Теплоперенос газа в порах (конвективная составляющая –  $\lambda_2$ ) осуществляется при столкновении молекул газа. Теплопроводность будет определяться отношением длины свободного пробега молекул ( $\ell$ ) к линейным размерам пор ( $d$ ), температурой и динамической вязкостью газовой фазы, характером взаимодействия молекул газа с твердой фазой.

Перенос тепла излучением (лучистая составляющая –  $\lambda_3$ ) зависит от природы частиц, диэлектрической, магнитной проницаемости и степени черноты поверхности частиц.

Исходя из анализа возможных механизмов переноса тепла в зернистых системах можно утверждать, что эффективная теплопроводность системы  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$  зависит при прочих равных условиях от структуры порового пространства зернистых материалов, топологии и числа касаний частиц.

Рассматривая идеализированные модели структуры зернистых материалов в виде упорядоченных кладок идеально гладких шаров, можем получить несколько вариантов структур: с тетраэдрической; гексагональной; кубической упаковкой шаров. Для каждого типа структуры будем иметь соответствующую пористость  $m$ : 0,26; 0,4; 0,47. Считается, что предельная пористость, при которой не нарушается связь между шарами, равна пределу перколяции  $m_{\Pi} = \pi / 6 \approx 0,52$  [1]. Пористость зернистых систем в условиях свободной засыпки может превышать 90 %.

В работе [5] предлагается для обоснования возможности существования зернистых систем с пористостью  $m > m_{\Pi}$ , при условии сохранения непрерывных контактов между зернами, рассматривать модели в виде цепочечных структур, для которых координационное число  $N_k = 2$ .

Действительно, если координационное число определять по формуле, предложенной Г.Н. Дульневым [5]:

$$N_k = \left( m + 3 + \sqrt{m^2 - 10m + 9} \right) / 2m, \quad (1)$$

то для значений пористости  $m = 90\%$  и  $m = 96\%$  получаем  $N_k(90) = 2.7$ ;  $N_k(96) = 2.5$ .

Значения координационных чисел близки к 2, что подтверждает правильность выдвинутой гипотезы. Однако вид структуры зернистой системы зависит от элементного и химического состава твердой фазы. В качестве наполнителей вакуумных изоляционных панелей применяется мелкодисперсный микрокремнезем [1, 6, 7], который соответствует требованиям экологичности, пожарной безопасности, стабильности свойств в вакууме, топологии поверхности частиц. Микрокремнезем представлен опалами, структура которых построена из полимеризованных нитей аморфного кремнезема, которые собраны в глобулы – шаровидные образования определенного размера. Глобулы, в свою очередь, регулярным образом уложены в упаковку кубическую или гексагональную. Координационное число при такой пространственной упаковке больше 2,  $N_k$  для частиц, образующих кольцо, равно 2.

Экспериментально установлено, что в процессе конденсации в коллоидном растворе из частиц оксида кремния, которые имеют размер  $1\div 3$  нм и являются зародышами, вырастают частицы размером  $5\div 7$  нм. После этого начинается агрегация частиц и формирование глобул размером 20-40 нм, из которых образуются кластеры глобулярного типа размером  $300\div 400$  нм. В зависимости от условий синтеза и процесса кластерообразования глобулы могут достигать размеров до 1200 нм [1]. Затем эти глобулы формируют макроструктуру с кубической или иным типом упаковки.

Изменение гранулометрического состава микрокремнезема в процессе синтеза фиксировалось посредством анализатора размеров частиц Shimadzu SALD 3101 и инвентированного микроскопа OLYMUSGX-71.

Полученные микрофотографии и гранулометрические гистограммы приведены на рис. 1 и 2.

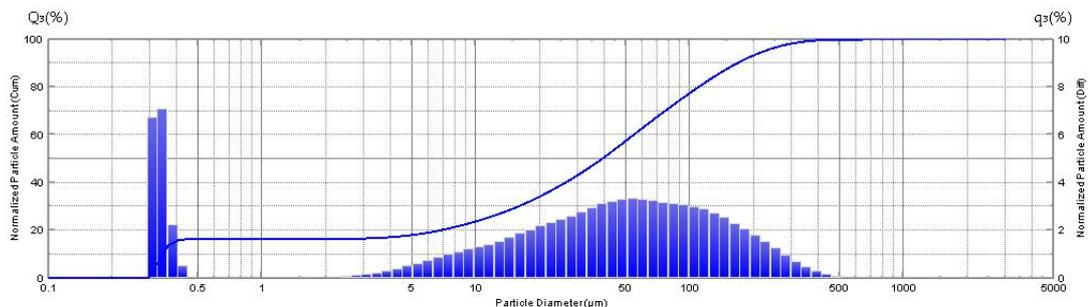


Рис. 1. Распределение размеров частиц синтезированного диоксида кремния, определенное экспериментально с применением анализатора Shimadzu SALD 3101

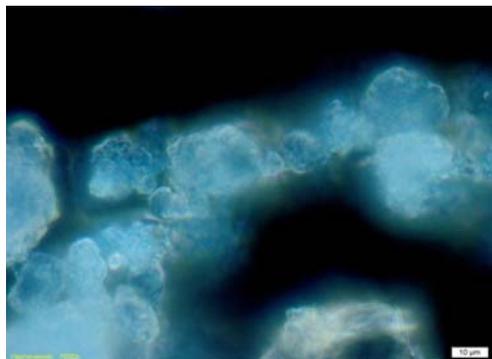


Рис. 2. Изображение частиц аморфного диоксида кремния, синтезированного из диатомита (получено с применением инвентированного микроскопа OLYMUSGX-71)

С учетом экспериментальных данных в процессе синтеза формируется структура микрокремнезема, которую можно представить в виде фрактальной модели (рис. 3) из ассоциированных кластеров (ССА-модель).

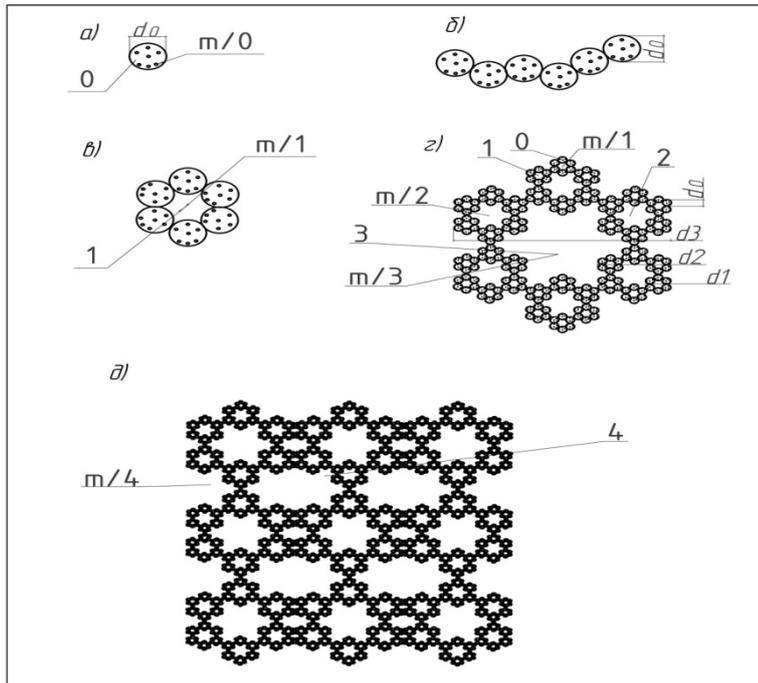


Рис. 3. Фрактальная модель структуры дисперсного микрокремнезема: а – первичная частица; б – фибриллярный (цепочный) кластер; в – глобулярный (шаровой) кластер; г – ассоциированный кластер (ССА); д – пространственный каркас макроструктуры из кластеров ССА

Фрактальный кластер образуется в результате прилипания к нему последовательно по одной частице, каждая из которых совершает диффузионное движение в пространстве.

Экспериментально установлено, что по мере роста кластера уменьшается нарушение его сферической симметрии. При этом среднее координационное число для частиц в сферическом кластере равно  $K=2.2$  при вероятности прилипания  $P=1$ , если же  $P=0,2$ , то  $K=2,514$  [8].

По мнению Б.М. Смирнова [8], формирование кластерной структуры идет в два этапа: на первом этапе кластер растет по мере прилипания к нему частиц (*DLA*-модель); на втором – происходит объединение кластеров в «кластер – кластерные» ассоциации (*ССА*-модель).

Радиус кластера  $R$  и число частиц в нем  $n$  связаны соотношением

$$n = (R / r_0)^D, \tag{2}$$

где  $r_0$  – радиус отдельной частицы;  $D$  – фрактальная размерность кластера.

Масса образуемого кластера  $m$  связана с радиусом  $R$  соотношением

$$m = m_0 (R / r_0)^D. \tag{3}$$

Исследования фрактальных свойств пористых дисперсных систем основаны на анализе рассеяния рентгеновского и нейтронного излучений, направленных на исследуемые объекты. При изучении структурных неоднородностей наноразмерного масштаба в зернистых системах широко применяется метод малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) [9, 10] с использованием дифрактометра Несус S3 – MICRO и специальных программных комплексов [11, 12].

С помощью дифрактометра получены экспериментальные данные зависимости интенсивности рассеяния  $J(S)$  от модуля вектора рассеяния  $S$  для аморфного кремнезема, синтезированного из диатомита (рис. 4).

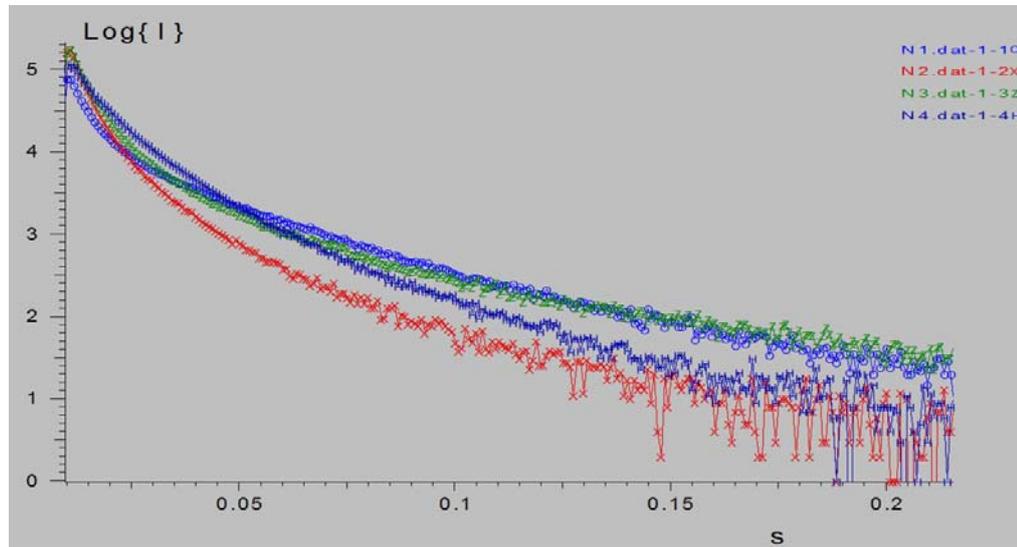


Рис. 4. Зависимость интенсивности рассеяния  $J(S)$  от модуля вектора рассеяния  $S$  для аморфного кремнезема, синтезированного из диатомита

Методика обработки и анализа экспериментальных данных представлена в [1, 9]. Характер полученных экспериментальных кривых малоуглового рассеяния  $J(S)$  свидетельствует о наличии в синтезированном микрокремнеземе двух систем относительно однородных рассеивающих кластеров. Первая представлена кластерами размером  $d=40,6$  нм; вторая –  $d=7,5\div 14,9$  нм  $\approx 10,1$  нм. На рис. 5 изображена кривая распределения по размерам рассеивающих частиц синтезированного кремнезема, из анализа которой следует, что основной вклад в рассеивание излучения вносят мелкокомасштабные фрактальные образования с размером  $d=4\div 8$  нм.

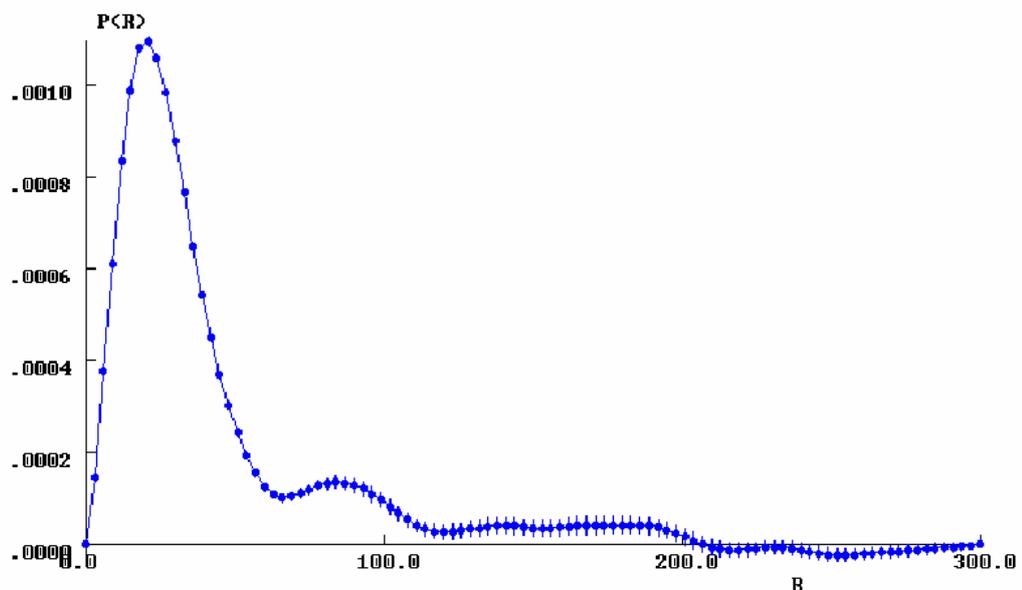


Рис. 5. Распределение по размерам  $R$  (в ангстремах  $\text{Å}$ ) рассеивающих частиц синтезированного кремнезема

Следовательно, дисперсный порошок аморфного кремнезема диоксида кремния имеет в своем составе три типа рассеивающих объектов наноразмерного уровня с разной фрактальной размерностью.

Фрактальные свойства пористых систем из аморфного кремнезема приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Фрактальные свойства аморфного кремнезема, синтезированного из диатомита

№ п/п	Образец	Параметр	$\Delta S, \text{\AA}^{-1}$	$\alpha$	$D$	$D_s$	$d, \text{нм}$
1	Аморфный диоксид кремния		0,0159 – 0,0251	2,32	2,32		40 – 25
			0,0251 – 0,0794	2,13	2,13		25 – 8
			0,0794 – 0,1585	3,36		2,64	8 – 4
2	Конденсированный микрокремнезем		0,0159 – 0,1585	3,60		2,40	40 – 4
3	Белая сажа		0,0159 – 0,0251	3,17		2,83	40 – 25
			0,0251 – 0,1585	2,66	2,66		25 – 4
4	FRONT – VIP		0,0159 – 0,0316	2,59	2,59		40 – 20
			0,0316 – 0,0562	3,30		2,70	20 – 12
			0,0562 – 0,1585	4,10			12 – 4

Полученные результаты дают возможность рассчитать максимальный размер пор  $R_{\max}$  по формуле, которая следует из формулы (3):

$$R_{\max} = r_0 (\rho_0 / \bar{\rho})^{1/(3-D)}, \quad (4)$$

где  $r_0$  – размер первичной частицы диоксида кремния;  $\rho_0$  – истинная плотность  $\text{SiO}_2$ ;  $\bar{\rho}$  – плотность вещества в кластере размером  $r$ ;  $D$  – фрактальная размерность.

$$\bar{\rho}(r) = \rho_0 (r_0 / r)^{3-D}. \quad (5)$$

Из формулы (4) можно получить соотношение между средней плотностью  $\bar{\rho}(r)$  и размером кластера  $r$ .

Результаты расчета средней плотности кластеров приведены в табл. 2. Рассмотрено два случая: 1 – размер первичной частицы  $r_0=1$ ; 2 –  $r_0=2$ . Плотность частицы  $\rho_0=2,2 \text{ г/см}^3$ , фрактальная размерность  $D=2,5$ .

Используя соотношение между плотностью  $\rho$  и пористостью  $\Pi$ , определяли пористость зернистой системы по формуле

$$\Pi = 1 - \rho_i / \rho_0. \quad (6)$$

Расчетные значения плотности и пористости приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Плотность и пористость кластеров кремнезема, синтезированного из диатомита

$i$	0	1	2	3	4	5	6
$r_i, \text{нм}$	1,0	5,0	10,0	40,0	100,0	300,0	1200,0
$r_0(1)/r_i$	1,0	0,2	0,1	0,025	0,01	0,003	0,00083
$\rho_1(r_i), \text{г/см}^3$	2,2	0,97	0,7	0,35	0,22	0,132	0,066
$\Pi_1(r_i), \%$	0	56	68	84	90	94	97
$r_0(2)/r_i$	1	0,4	0,2	0,05	0,02	0,006	0,00166
$\rho_2(r_i), \text{г/см}^3$	2,2	1,39	0,98	0,49	0,311	0,18	0,089
$\Pi_2(r_i), \%$	0	37	56	78	86	92	96
$R_{\max}, \text{нм}$	4	9,98	20,2	80,6	201	595	2440

В последней строке табл. 2 приведены значения максимальных размеров пор кластеров в процессе их роста, которые рассчитаны по формуле [8]

$$R_{\max} = r_0 (\rho_0 / \rho_i)^{1/(3-D)}. \quad (7)$$

По литературным данным, свободная длина пробега молекулы в воздухе  $\ell = 1,1 \cdot 10^{-6}$  см – 1 нм. Тогда критерий Кнудсена  $K_n = \ell / d$ , равный отношению средней длины свободного пробега молекул газа  $\ell$  к расстоянию  $d$  между стенками, ограничивающими объем, практически во всех случаях будет меньше 1 ( $K_n = \ell / 2R < 1$ ). Следовательно, в порах системы реализуется конвективный механизм переноса тепла.

При низких давлениях  $P$  и температурах  $T$  перенос тепла молекулами газа в порах будет происходить при их столкновении со стенками пор. Коэффициент теплопроводности газа в поре предложено определять по формулам [1] в зависимости от величины  $K_n$ :

$$\text{если } K_n < 1, \text{ то } \lambda_{21} = (2,25\gamma - 1,25)\eta C_v; \quad (8)$$

$$\text{если } K_n > 1, \text{ то } \lambda_{22} = \lambda_2 \left[ 1 + \frac{4\gamma}{\gamma+1} \cdot \frac{2-a}{a} K_{no} \frac{P}{P_0 P_r} \right]^{-1}, \quad (9)$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты;  $a$  – коэффициент аккомодации газа на стенках;  $K_{no}$  – критерий Кнудсена при атмосферном давлении  $P_0$ ;  $P_r$  – критерий Прандтля;  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности газа при  $P = P_0$ ;  $\eta$  – динамическая вязкость газа;  $C_v$  – удельная теплоемкость.

Теплопроводность зернистых наполнителей вакуумных панелей будет зависеть от коэффициента аккомодации, который характеризует степень полноты обмена энергией при столкновении молекулы газа с поверхностью. Он всегда меньше единицы.

Величина коэффициента  $a$  зависит от топографии поверхности. Чем больше неровностей, дефектов на поверхности, тем больше значение  $a$ . Этот вывод установлен экспериментально и следует из формулы, предложенной Б.Бауле:

$$a = 1 - \left[ \frac{m_1^2 + m_2^2}{(m_1 + m_2)^2} \right]^P, \quad (10)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – масса молекул газа и поверхности;  $P$  – число соударений молекулы газа с твердой поверхностью.

Оценкой топографии поверхности твердой фазы поровой структуры является фрактальная размерность  $D$  и размер частиц, агрегатов, формирующих поверхность кластера.

Если структура поверхности кластера формируется из мелких частиц, прочно соединенных между собой, то в этом случае возможно увеличение коэффициента аккомодации за счет роста числа соударений. Фрактальная размерность таких поверхностей около 2,2, и она характерна для начальных (первичных) кластеров. По мере роста кластера его поверхность становится более неоднородной, силы сцепления между частицами слабеют, и поэтому при столкновении молекулы газа с поверхностью кластера возможно проявление демпфирования. Энергия молекулы частично переходит в энергию разрушения. Фрактальная размерность поверхности, склонной к демпфированию, имеет значение, близкое к 2,5. Шероховатость, дефектность поверхности кластера можно регулировать изменением условий формирования структуры.

В результате анализа влияния структурных параметров зернистой системы, сформированной из синтезированных частиц диоксида кремния, установлено, что при

производстве вакуумных изоляционных панелей их теплозащитные свойства можно регулировать путем изменения: давления, вязкости молекулярного веса газа; пористости макроструктуры и кластеров; теплопроводности твердой и газовой фаз системы; коэффициента аккомодации; координационного числа; размера первичных частиц; фрактальной размерности, характеризующей топологические особенности строения частиц, агрегатов, глобул, кластеров и их склонность к диссипации энергии молекул газа.

### Список литературы

1. Теплоизоляционные материалы и изделия на основе вакуумированных дисперсных порошков микрокремнезема и диатомита: монография / В.П. Селяев, В.А. Неверов, А.К. Осипов [и др.]. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – 220 с.
2. Файств, В. Основные положения по проектированию пассивных домов / В. Файств. – М.: АСВ. – 144 с.
3. Schaefer D.W., Justice R.S. // *Macromolecules*. – 2007. – V.40, No.24. – P.8501–8517.
4. Данилевский, Л.Н. Вакуумная теплоизоляция и перспективы использования в строительстве / Л.Н. Данилевский // *Архитектура и строительство*. – 2006. – №5. – С. 114–117.
5. Дульнев, Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: справ. / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
6. Селяев, В.П. Полиструктурная модель теплоизоляционного материала на основе дисперсного микрокремнезема / В.П. Селяев, А.К. Осипов, В.А. Неверов, В.А. Неверов, О.Г. Маштаев, В.В. Сидоров // *Региональная архитектура и строительство*. – 2012. – № 2(13). – С. 5–11.
7. Селяев, В.П. Микроструктура теплоизоляционных материалов на основе тонкодисперсных минеральных порошков / В.П. Селяев, В.А. Неверов, О.Г. Маштаев, В.В. Сидоров // *Строительные материалы*. – 2013. – № 8. – С.79–80.
8. Смирнов, Б.М. Физика фрактальных кластеров / Б.М. Смирнов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 136 с.
9. Свергун, Д.И. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние / Д.И. Свергун, Л.А. Фейгин. – М.: Наука, 1986. – 280 с.
10. Китайгородский, А.И. Рентгеноструктурный анализ мелкокристаллических и аморфных тел / А.И. Китайгородский. – М.-Л.: Гос.изд-во тех.-теор. лит-ры, 1952. – 588 с.
11. Svergun D.I., Semenyuk A.V., Feigin L.A. *Acta Cryst.* 1988. A44. P.244–250.
12. Svergun D.I. *J.Appl. Cryst.* 1992. V.25. P.495–503.

### References

1. Thermal insulation materials and products based on evacuated dispersed powders of silica fume and diatomite: monograph / V.P. Selyaev, V.A. Neverov, A.K. Osipov [et al.]. – Saransk: Publishing House Mordov. un-that, 2013. – 220 p.
2. Faith, B. The main provisions for the design of passive houses / B. Faith. – M.: Publishing house. DIA. – 144 p.
3. Schaefer D.W., Justice R.S. // *Macromolecules*. – 2007. – V.40. No.24. – P.8501–8517.
4. Danilevsky, L.N. Vacuum insulation and prospects for use in construction / L.N. Danilevsky // *Architecture and construction*. – 2006. – №5. – P. 114–117.
5. Dulnev, G.N. Thermal conductivity of mixtures and composite materials: reference book / G.N. Dulnev, Yu.P. Zarichnyak. – L.: Energy, 1974. – 264 p.
6. Selyaev, V.P. Polystructural model of heat-insulating material based on dispersed microsilica / V.P. Selyaev, A.K. Osipov, V.A. Neverov, V.A. Neverov, O.G. Mashtaev, V.V. Sidorov // *Regional architecture and engineering*. – 2012. – № 2 (13). – P. 5–1.

7. Selyaev, V.P. The microstructure of thermal insulation materials based on fine mineral powders / V.P. Selyaev, V.A. Neverov, O.G. Mashtaev, V.V. Sidorov // Building materials. – 2013. – № 8. – P.79–80.
8. Smirnov, B.M. Physics of fractal clusters / B.M. Smirnov. – M.: Science. Ch. ed. physical-mat lit., 1991. – 136 p.
9. Svergun, D.I. X-ray and neutron small-angle scattering / D.I. Svergun, L.A. Feigin. – M.: Science, 1986. – 280 p.
10. Kitaygorodsky, A.I. X-ray structural analysis of crystalline and amorphous bodies / A.I. Kitaygorodsky.. – M.-L.: Gos.izd-in tech.- theory. lit-ry, 1952. – 588 p.
11. Svergun D.I., Semenyuk A.V., Feigin L.A. ActaCryst. 1988. A44. P.244–250.
12. Svergun D.I. J.Appl. Cryst. 1992. V.25. P.495–503.

УДК 691.3

*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

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

**Москвин Роман Николаевич**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Эксплуатация  
автомобильного транспорта»  
E-mail: moskva\_in@mail.ru

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

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

**Утюгова Елена Сергеевна**,  
магистрант  
E-mail: lena-ut1@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

**Belyakova Elena Aleksandrovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Real estate cadastre and right»  
E-mail: var\_lena@mail.ru

**Moskvin Roman Nikolaevich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Operation of Road  
Transport»  
E-mail: moskva\_in@mail.ru

**Tarakanov Oleg Vyacheslavovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Decan of  
faculty "Management of territories"  
E-mail: zigk@pguas.ru

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

**Utyugova Elena Sergeevna**,  
Undergraduate  
E-mail: lena-ut1@mail.ru

## ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ ЗАТВЕРДЕВШИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ ОТ СООТНОШЕНИЯ ЦЕМЕНТА И ЗОЛЫ

Е.А. Белякова, Р.Н. Москвин, О.В. Тараканов, Е.И. Куимова, Е.С. Утюгова

Методом планирования эксперимента определены зависимости прочности цементно-золяного камня от содержания цемента и золы. Выявлено, что прочностные характеристики затвердевшего золяного вяжущего существенно зависят от вида золы-уноса, в то время как реотехнологические показатели являются идентичными. В связи с этим дальнейшие испытания проводились на золе, имеющей более значимые показатели прочности. Оказалось, что прочностные показатели исследуемых затвердевших цементно-золяных вяжущих, имеющих в своем составе 50 и более процентов золы, практически не меняются с ростом ее количества. Определены удельные расходы цемента и золы в цементно-золяном вяжущем на единицу прочности при сжатии, которые варьируются в зависимости от соотношения цемента и золы. Так, для цемента этот показатель составляет от 5,0 до 10,3 кг/МПа, для золы – от 4,4 до 20,0 кг/МПа.

*Ключевые слова: математическое планирование, строительные материалы, композиционное вяжущее, цемент, зола-унос, прочность, реотехнологические показатели*

## THE DEPENDENCE OF THE PROPERTIES OF HARDENED COMPOSITE BINDERS ON THE RATIO OF CEMENT AND ASH

E.A. Belyakova, R.N. Moskvin, O.V. Tarakanov, E.I. Kuimova, E.S. Utyugova

The method of experiment planning is used to determine the dependence of the strength of a cement-ash stone on the content of cement and ash. It is revealed that strength characteristics of the hardened ash binder substantially depend on the type of fly ash, while the re-technological indicators

are identical. In this regard, the further tests were carried out on ash, which has more significant indicators of strength. It turned out that the strength characteristics of the investigated hardened cement-ash binders, having in their composition 50 and more percent of the ash practically do not change with the growth of its quantity. The specific consumption of cement and ash in the cement-ash binder per unit compressive strength, which vary depending on the ratio of cement and ash, is determined. So, for cement, this indicator ranges from 5,0 to 10,3 kg/MPa, for ash – from 4,4 to 20,0 kg/MPa.

*Keywords: mathematical planning, construction materials, composite binder, cement, fly ash, strength, re-technological indicators*

Реализация политики Правительства Российской Федерации в области энерго- и ресурсосбережения делает актуальным использование отходов промышленности в качестве сырья для производства товаров широкого потребления. Строительная отрасль является одной из самых емких отраслей народного хозяйства по потреблению ресурсов. Однако при рациональном подходе к использованию сырьевых ресурсов для своих нужд предприятия стройиндустрии могут стать не только экологичными [5], но и, что немаловажно, экономичными, т.к. именно при производстве широкой номенклатуры строительных изделий можно использовать огромное количество отходов других отраслей промышленности, в частности предприятий теплоэнергетики, – золы-унос ТЭЦ.

Введение в состав современных высокоэффективных композиционных бетонных смесей с заранее заданными физико-механическими свойствами реологических или реакционных добавок требует тщательного подбора соотношений между реагирующими и инертными компонентами.

Оптимизацию соотношения между цементом и золой-уносом в цементно-зольном вяжущем целесообразно определять методом математического планирования эксперимента [1].

Исследования проводились на цементно-зольном вяжущем (ЦЗВ). Как было определено ранее [2–4], зола-унос сочетает в себе три функции: реологическую (в суспензии с гиперпластификаторами (ГП)), реакционно-активную и гидратационно-твердеющую. Использовались золы-унос №1 и №2, полученные от сжигания бурых углей Канско-Ачинского месторождения (ГОСТ 25818-91 Золой-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия).

Аппроксимация функции отклика осуществлялась методом планирования полиномом вида

$$f(X_1, X_2) = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_{12} X_1 \cdot X_2 + b_1 \cdot X_1^2 + b_2 \cdot X_2^2. \quad (1)$$

Матрица планирования эксперимента приводится в табл. 1. В качестве варьируемых факторов были взяты содержание цемента  $X_1$  и водотвердое отношение  $X_2$ . В качестве оценочного критерия использовали предел прочности при сжатии в нормированные сроки (через 28 суток нормального твердения,  $R_{сж}$ , МПа).

Т а б л и ц а 1

Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Кодовая матрица		Матрица планирования		Отклик $R_{сж}$ , МПа	
	$X_1$	$X_2$	Содержание цемента ( $X_1$ ), %	В/Т ( $X_2$ ), %	Зола №1	Зола №2
1	-1	-1	20	18	73	78
2	1	-1	70	18	124	132
3	-1	1	20	22	69	74
4	1	1	70	22	116	124
5	-1,4142*	0	9,645	20	54	71
6	1,4142*	0	80,355	20	143	148
7	0	-1,4142*	45	17,172	125	132
8	0	1,4142*	45	22,828	117	125
9	0	0	45	20	139	142

П р и м е ч а н и е : \* – звездные точки

В качестве основных уровней были приняты: для фактора  $X_1$  содержание цемента принято 45 % от массы смеси, а фактор  $X_2$  (В/Т) принят на уровне 20 %. Интервалы варьирования составили для  $X_1$  – 25 %, а для  $X_2$  – 2 %.

Методом регрессионного анализа получены уравнения регрессии в натуральном и стандартизованном масштабе переменных, характеризующие прочность на сжатие в нормальном состоянии  $R_{сж}$ , и построены графические модели зависимостей прочности цементно-зольного камня от содержания цемента и воды (рис. 1).

Для золы-уноса №1:

$$R_{сж} = 139 + 28,0 \cdot X_1 - 2,9 \cdot X_2 - X_1 \cdot X_2 - 23,8 \cdot X_1^2 - 12,6 \cdot X_2^2.$$

Для золы-уноса №2:

$$R_{сж} = 145 + 29,9 \cdot X_1 - 3,7 \cdot X_2 - 0,9 \cdot X_1 \cdot X_2 - 28,1 \cdot X_1^2 - 11,3 \cdot X_2^2.$$

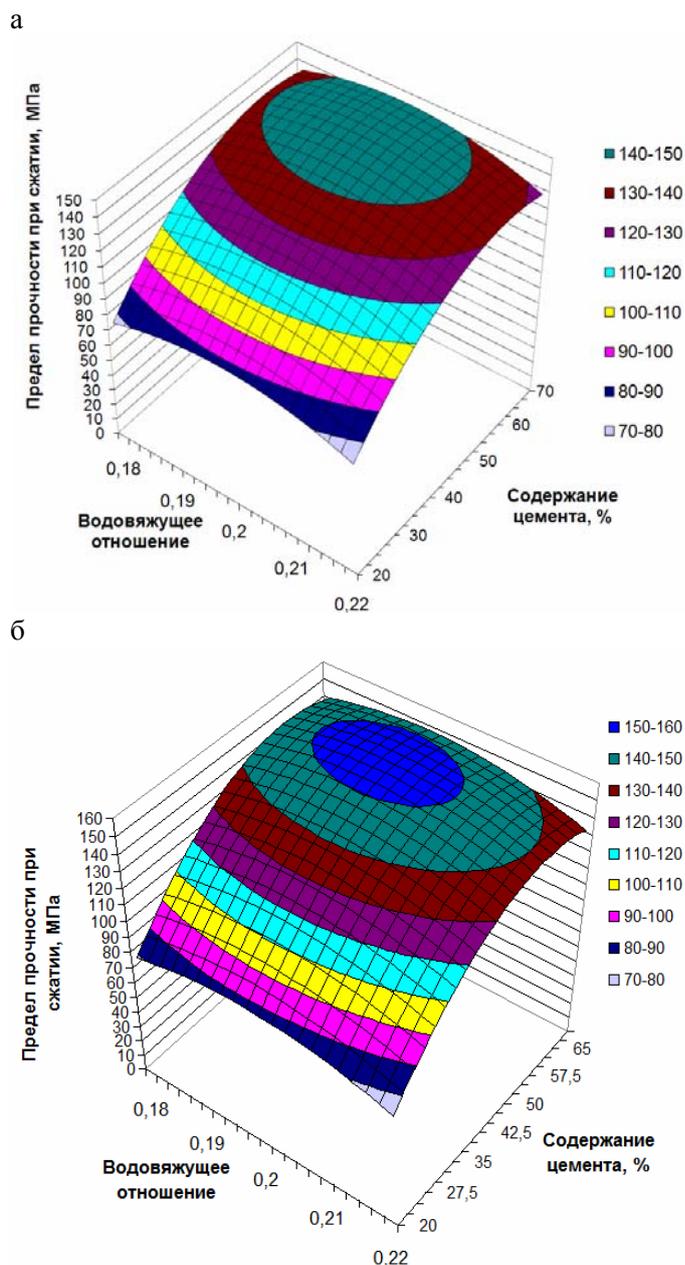


Рис. 1. Зависимость прочности цементно-зольного камня от содержания цемента и воды в ЦЗВ после 28 суток твердения:  
а – на золе №1; б – на золе №2 [6]

Наибольший интерес представляет интерпретация параметров стандартизированных уравнений множественной регрессии.

Для золы-уноса №1:

$$R_{сж} = 0,0263 \cdot X_1 - 0,0027 \cdot X_2 - 0,00047 X_1 \cdot X_2 - 0,0137 \cdot X_1^2 - 0,00721 \cdot X_2^2.$$

Для золы-уноса №2:

$$R_{сж} = 0,0282 \cdot X_1 - 0,0029 \cdot X_2 - 0,0005 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,0133 \cdot X_1^2 - 0,0071 \cdot X_2^2.$$

Стандартизированные коэффициенты регрессии, как известно, сравнимы между собой, что позволяет ранжировать воздействия на результат.

Очевидно, что:

- на порядок большее влияние на прочность оказывает содержание цемента;
- влияние фактора  $X_2$  имеет обратный характер по сравнению с фактором  $X_1$ ;
- эффект взаимодействия факторов существенно ниже показателей их прямого влияния;
- влияние отклика на объясняющую переменную является статистически независимым;
- квадратичные члены регрессии отрицательны, что можно интерпретировать как наличие точки максимума в траектории увеличения прочности.

Практическое использование составов, полученных в ходе математического планирования эксперимента, затруднительно, т.к. зола оказывает существенное влияние на начальные сроки загустевания цементно-золяного вяжущего, сокращая их. Поэтому, исходя из схожести химических составов цемента и зол-уноса ТЭЦ, в качестве замедлителя твердения был выбран тонкомолотый гипсовый камень.

На первом этапе исследований были изготовлены образцы из вяжущего на тонкомолотой золе №1 и №2. Реотехнологические свойства пластифицированных золяно-водных суспензий и физико-механические показатели затвердевшего золяного камня представлены в табл. 2.

Суспензии из золяного вяжущего (ЗВ) на основе обеих зол-уноса ТЭЦ характеризуются достаточно высокой подвижностью и хорошей жизнеспособностью, что обусловлено введением при помолке золы-уноса 7 % по массе гипсового камня. Прочность золяного камня на основе золы №2 через 28 суток нормального твердения составила 24 МПа. Аналогичный состав на золе №1 при схожих реотехнологических характеристиках имел прочность в 2 раза ниже (рис. 2).

Т а б л и ц а 2

Золяное вяжущее на основе тонкомолотых зол-уноса №1 и №2

Компоненты состава	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие / изгиб через 28 сут, МПа	Дополнительные показатели
Золя №1, гипсовый камень (7 % от золы); $S_{уд}=6150$ см <sup>2</sup> /г; ГП Хидетал 9γ (1 % от массы золы); вода	2050	13 / 1,9	$V/3=0,220$ жизнеспособность смеси более 1,5 ч; расплав конуса Хегерманна 26 см; $ZB_{R_{сж}}^{уд} = 127,9$ кг/МПа; $R_{ЗВ}^{уд} = 0,008$ МПа/кг
Золя №2, гипсовый камень (7 % от золы); $S_{уд}=6050$ см <sup>2</sup> /г ГП Хидетал 9γ (1 % от массы золы); вода	2011	24 / 3,6	$V/3=0,232$ жизнеспособность смеси более 1,5 ч; расплав конуса Хегерманна 25 см; $ZB_{R_{сж}}^{уд} = 69,3$ кг/МПа; $R_{ЗВ}^{уд} = 0,014$ МПа/кг

П р и м е ч а н и е :  $V/3$  – водо-золяное отношение

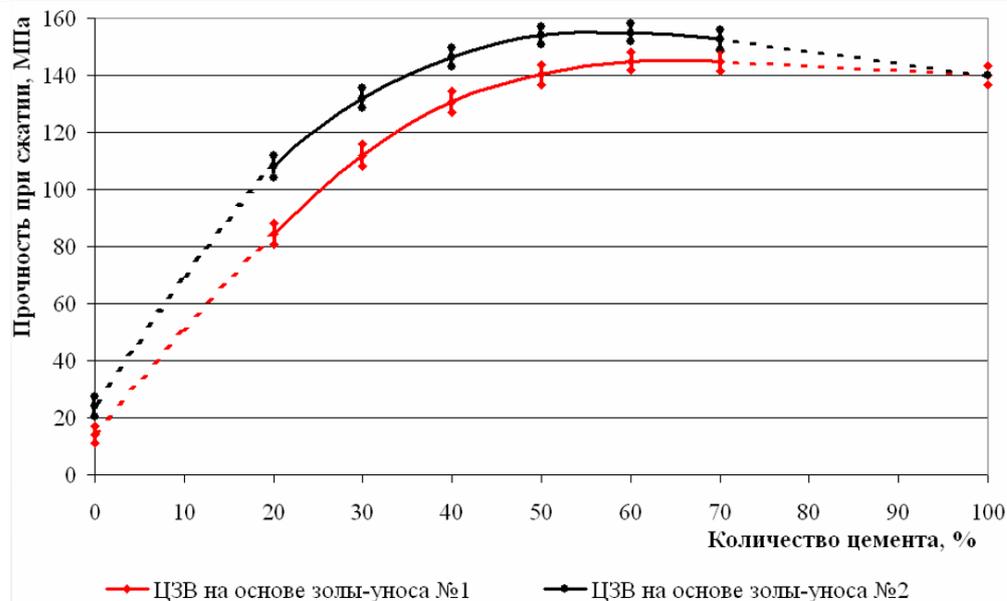


Рис. 2. Зависимость прочности зольного и цементно-зольного камня от содержания тонкомолотой золы-уноса

На втором этапе были изготовлены образцы из цементно-зольного вяжущего (ЦЗВ) на основе Красноярского портландцемента ПЦ500 Д0 и золы-уноса №2 (табл. 3). Количество золы в ЦЗВ варьировалось от 30 до 80 % от массы вяжущего. Испытания проводились в возрасте 2, 7, 28 суток нормального твердения (рис. 3) на образцах-балочках 40×40×160 мм, изготовленных из литых самоуплотняющихся суспензий.

Т а б л и ц а 3

Реотехнологические свойства цементно-зольных суспензий

Отношение цемент : зола, %	Реотехнологические характеристики цементно-зольных суспензий	Дополнительные показатели	
		ЦЗВ <sup>уд</sup> <sub>R<sub>сж</sub></sub> , кг/МПа	Ц <sup>уд</sup> <sub>R<sub>сж</sub></sub> , кг/МПа
20 : 80	V/V=0,2, ρ=2150 кг/м <sup>3</sup> ; распływ конуса Хегерманна 35 см	25,00	5,00
30 : 70	V/V=0,2, ρ=2205 кг/м <sup>3</sup> ; распływ конуса Хегерманна 37 см	18,42	5,53
40 : 60	V/V=0,2, ρ=2215 кг/м <sup>3</sup> ; распływ конуса Хегерманна 41 см	16,41	6,56
50 : 50	V/V=0,2, ρ=2240 кг/м <sup>3</sup> ; распływ конуса Хегерманна 35 см	15,00	7,50
60 : 40	V/V=0,2, ρ=2245 кг/м <sup>3</sup> ; распływ конуса Хегерманна 38 см	14,58	8,75
70 : 30	V/V=0,2, ρ=2241 кг/м <sup>3</sup> ; распływ конуса Хегерманна 36 см	14,67	10,28

П р и м е ч а н и е : V/V – водовяжущее отношение.

Сравнительный анализ свойств суспензий и затвердевших цементно-зольных вяжущих с отношением цемент : зола от 20:80 до 70:30 представлен в табл. 3 и на рис. 3. Удельный расход цемента в цементно-зольном вяжущем на единицу прочности при сжатии в зависимости от процентного содержания цемента варьируется от 5,00 до 10,28 кг/МПа. В связи с тем, что прочностные показатели затвердевших вяжущих с 50, 60 и 70 % цемента практически одинаковы, то не имеет смысла увеличивать содержание цемента выше 50 %. Однако окончательное максимальное количество цемента может быть установлено при испытании бетона.

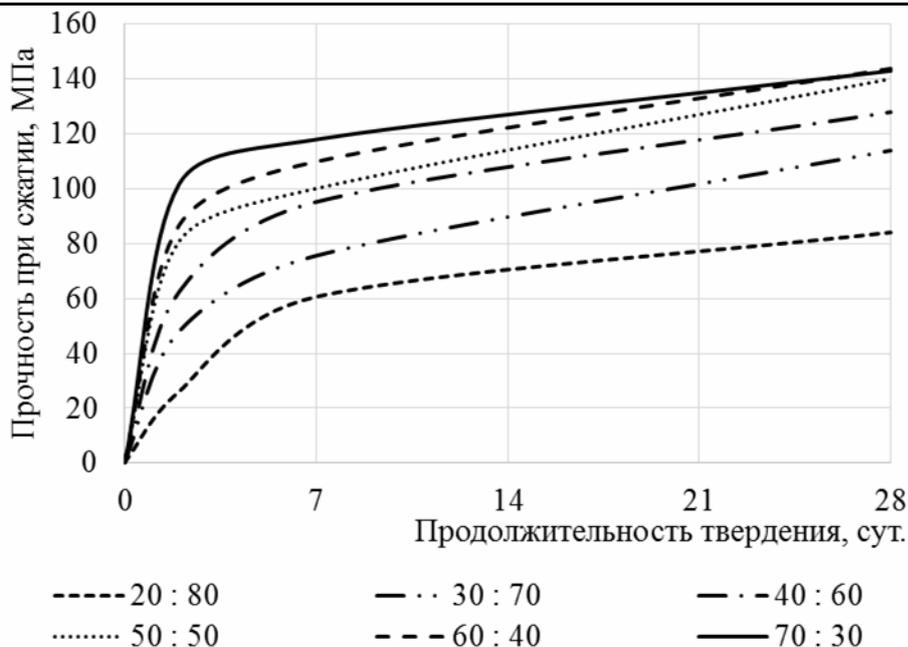


Рис. 3. Физико-механические характеристики цементно-зольного вяжущего на основе золы №2 (обозначения составов по табл. 3)

При сравнении прочностных характеристик зольного и цементно-зольного камня выявлено, что введение в ЦЗВ цемента в количестве 20 % позволило достигнуть увеличения прочности цементно-зольного камня из литой пластифицированной самоуплотняющейся суспензии в 4,5–7,0 раз по сравнению с зольным камнем. При содержании золы №2 в ЦЗВ в количестве 40–50 % превышение прочности цементно-зольного камня по сравнению с цементным камнем составило около 10 %.

Представляло интерес и нарастание ранней прочности порошково-активированного бетона на ЦЗВ в течение первых часов твердения. Как видно из рис. 4, в ранние сроки твердения (3,5–4 часа) прочность затвердевшего цементно-зольного камня существенно отличается от значений прочности через 24 часа.

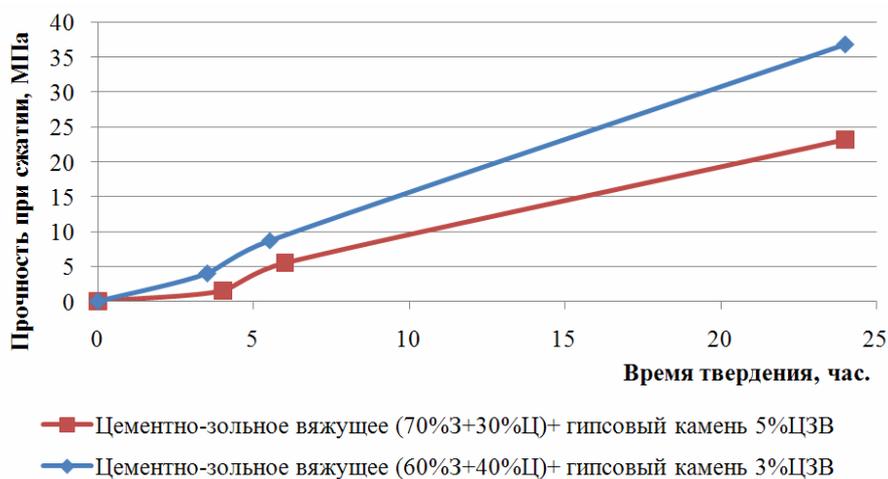


Рис. 4. Зависимость кинетики нарастания ранней прочности цементно-зольного камня от содержания тонкомолотой золы-уноса

Удельный расход цемента на единицу прочности бетона является, как известно, техническим, экономическим и экологическим критерием эффективности разрабатываемых бетонов нового поколения. В полученных цементно-зольных смесях  $\rho_{R_{сж}}^{уд}$

изменяется в зависимости от процентного соотношения сухих компонентов и колеблется, как уже упоминалось, от 5 до 10,28 кг/МПа. Количество используемой в таких составах золы-уноса является значительным, что также отражается на себестоимости строительного материала и экологической обстановке региона-производителя зол. Так, удельный расход золы-уноса колеблется в пределах от 4,4 до 20 кг/МПа.

Таким образом, в результате исследований удалось разработать композиционное вяжущее с требуемыми реотехнологическими и прочностными характеристиками. Для прогнозирования характеристик материала эффективно использовались методы планирования эксперимента.

### Список литературы

1. Планирование эксперимента. Обработка опытных данных / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, А.П. Прошин, Ю.Л. Соколова; под ред. д-ра техн. наук, проф. А.М. Данилова. – М.: Издательство «Палеотип», 2005. – 272 с.
2. Калашников, В.И. Новые направления использования зол ТЭЦ в порошково-активированных бетонах нового поколения / В.И. Калашников, О.В. Тараканов, Е.А. Белякова, М.Н. Мороз // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3(17). – С. 22–27.
3. Калашников, В.И. Высокоэкономичный композиционный цемент с использованием золы-уноса / В.И. Калашников, О.В. Тараканов, Е.А. Белякова, Р.Н. Москвин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 1(18). – С. 24–29.
4. Мороз, М.Н. Возможность использования домолотого цементно-зольного вяжущего для производства бетонов нового поколения / М.Н. Мороз, Р.Н. Москвин, Е.А. Белякова, В.С. Белякова // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 2. – С. 126–129.
5. Калашников, В.И. Техносферная безопасность утилизации зол-уноса ТЭЦ в бетонах / В.И. Калашников, Р.Н. Москвин, Е.А. Белякова, В.С. Белякова // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2016. – №1(2). – С. 11–15.
6. Белякова, Е.А. Порошковые и порошково-активированные бетоны с использованием горных пород и зол ТЭЦ; дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Е.А. Белякова. – Пенза: ПГУАС, 2013.

### References

1. Planning an experiment. Processing of experimental data / I.A. Garkina, A.M. Danilov, A.P. Proshin, Yu.L. Sokolova; by ed. Dr. of sciences, prof. A.M. Danilov. – M.: Paleotype Publishing House, 2005. – 272 p.
2. Kalashnikov, V.I. New directions for using ashes of thermal power plants in powder-activated concretes of a new generation / V.I. Kalashnikov, O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova, M.N. Moroz // Regional architecture and engineering. – 2013. – №3 (17). – P. 22–27.
3. Kalashnikov, V.I. High-efficiency composite cement using fly ash / V.I. Kalashnikov, O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova, R.N. Moskvina // Regional architecture and engineering. – 2014. – №1 (18). – P. 24–29.
4. Moroz, M.N. The possibility of using grinded cement-ash binder for the production of new generation of concrete / M.N. Moroz, R.N. Moskvina, E.A. Belyakova, V.S. Belyakova // Modern scientific research and innovation. – 2015. – №2. – P. 126–129.
5. Kalashnikov, V.I. Technosphere safety of disposal of fly ash from CHP in concrete / V.I. Kalashnikov, R.N. Moskvina, E.A. Belyakova, V.S. Belyakova // Vestnik PGUAS: construction, science and education. – 2016. – №1 (2). – P. 11–15.
6. Belyakova, E.A. Powder and powder-activated concretes with the use of rocks and evils of thermal power plants: dissertation ... candidate of sciences: 05.23.05 / E.A. Belyakova. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2013.

*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

**Жегера Кристина Владимировна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: jegeera@yandex.ru

**Пышкина Ирина Сергеевна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: glazycheese@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

**Zhegera Kristina Vladimirovna**,  
Candidate of Sciences, Assistant Professor of  
the department «Quality management and  
construction technologies»  
E-mail: jegeera@yandex.ru

**Pyshkina Irina Sergeevna**,  
Candidate of Sciences, Assistant Professor  
of the department «Information and  
Computing Systems»  
E-mail: glazycheese@gmail.com

## ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОСИЛИКАТОВ КАЛЬЦИЯ В ОТДЕЛОЧНОМ СОСТАВЕ

К.В. Жегера, И.С. Пышкина

Представлены результаты исследования применения добавки на основе гидросиликатов кальция в известковых системах. Приведена технология синтеза добавки и рецептура известковой сухой строительной смеси с использованием модифицирующей добавки на основе гидросиликатов кальция. Установлено, что отделочный состав на основе разработанной рецептуры обладает высокими эксплуатационными характеристиками. Предложена технологическая схема производства сухой строительной смеси на основе добавки гидросиликатов кальция, и рассчитана заводская себестоимость предлагаемой рецептуры сухой строительной смеси.

*Ключевые слова: сухая строительная смесь, модифицирующие добавки гидросиликат кальция, эффективность, себестоимость*

## ASSESSMENT OF ECONOMIC EFFICIENCY OF CALCIUM HYDRO SILICATES APPLICATION IN THE FINISHING COMPOSITION

K.V. Zhegera, I.S. Pyshkina

The article presents the results of the use of an additive based on calcium hydrosilicates synthesized with diatomite in the formulation of dry building mixes. The technology of synthesis of the additive and the recipe of lime dry building mix using a modifying additive based on calcium silicate are given. It is established that a finishing composition based on the developed recipe has high performance characteristics. A flow chart for the production of a dry mortar based on an calcium hydrosilicates additive has been developed and the factory cost of 1 kg of the proposed dry mortar formulation has been calculated.

*Keywords: dry mortar, modifying additives, the calcium silicate hydrate, efficiency, cost*

При отделке и реставрации стен зданий и сооружений исторической застройки применяют известковые сухие строительные смеси (ССС). Сухие строительные смеси представляют собой модифицированный мелкозернистый строительный материал, в состав которого входят минеральные вяжущие (цемент, известь, гипс, редисперсионные полимерные составы), наполнители с оптимальной гранулометрией и определенного фракционного состава [1–4].

Для повышения эксплуатационных характеристик ССС в их рецептуру вводят модифицирующие добавки различного назначения [5–7].

Введение в рецептуру ССС модифицирующих добавок позволяет изменять технологические, физико-механические и эксплуатационные свойства ССС [8–11].

В настоящий момент большое количество модифицирующих добавок поступает из-за рубежа, что значительно повышает себестоимость отечественных сухих строительных смесей (ССС).

Одним из способов снижения себестоимости ССС, производимых на территории Российской Федерации является разработка отечественных модифицирующих добавок, которые не уступают по своим свойствам зарубежным аналогам.

Поэтому проблема разработки рецептур сухих строительных смесей с высокими эксплуатационными свойствами и низкой себестоимостью является актуальной. Решение этой задачи позволит частично отказаться от зарубежных модифицирующих добавок и расширить рынок отечественных модифицирующих добавок для ССС.

Одним из методов повышения эксплуатационных свойств и снижения себестоимости известковых ССС является применение в их рецептуре модифицирующих добавок как природного (трепел, диатомит, пемзы, опока, глинезем), так и искусственного (шлаки, кремнеземные отходы, доменные гранулированные шлаки) происхождения [12]. Модифицирующей добавкой на основе природных материалов являются синтезированные в присутствии диатомита гидросиликаты кальция (ГСК).

Ранее проведенные исследования подтвердили эффективность применения в рецептуре отделочных известковых ССС модифицирующих добавок на основе ГСК [13, 14]. Применение ГСК в составе сухих строительных смесей позволяет получить известковую ССС с более высокими эксплуатационными свойствами [15].

Технология синтеза добавки заключалась в перемешивании натриевого жидкого стекла и суспензии диатомита. В полученную смесь вводится 10 %-й раствор  $\text{CaCl}_2$  с соотношением твердая:жидкая фаза Т:Ж=1:2. Затем полученный раствор фильтровался, а полученный осадок высушивался и измельчался.

Полученная добавка характеризуется истинной плотностью, равной  $\rho_{\text{ист}}=2200 \text{ кг/м}^3$ , насыпной плотностью  $\rho_{\text{нас}}=370 \text{ кг/м}^3$  и активностью  $A=370 \text{ мг/г}$ .

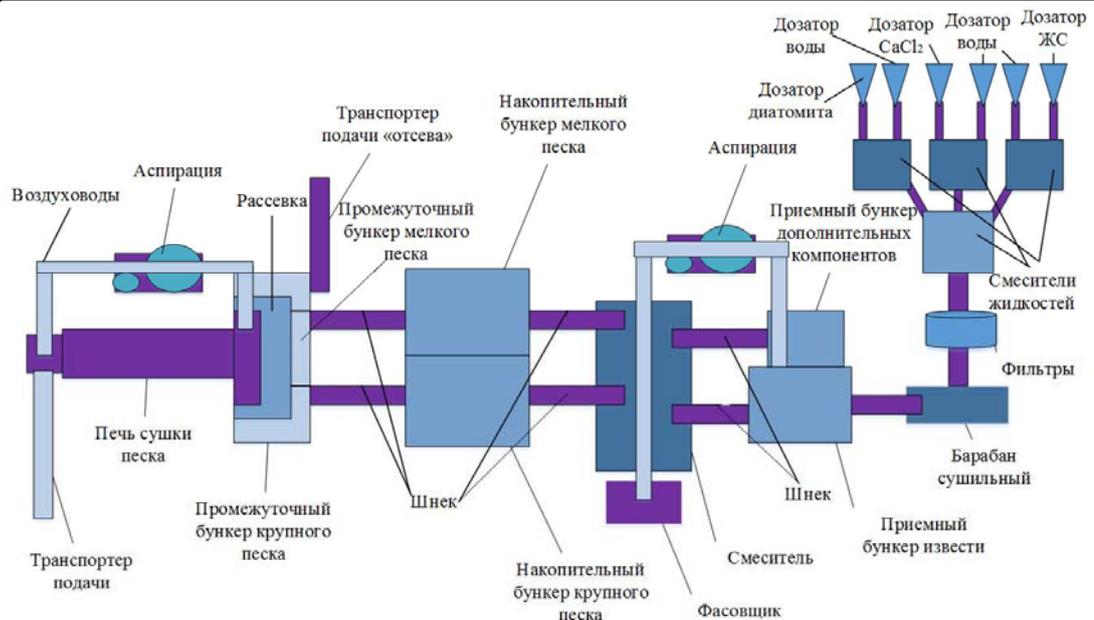
Предлагаемая добавка применяется в рецептуре известковой ССС в количестве 30 % от массы извести. Разработанная рецептура включает в себя: известь-пушонку 2-го сорта, кварцевый песок 80 % фракции 0,63–0,315, 20 % фракции 0,315–0,14, пластификатор Кратасол-ПФМ 1 % от массы извести, редиспергируемый порошок Neolith P-4400 0,3 % от массы извести и гидрофобизатор Zincum-5 0,5 % от массы извести.

Отделочный слой на основе разработанной смеси характеризуется адгезионной прочностью  $R_{\text{ад}}=0,89 \text{ МПа}$ , паропроницаемостью  $\mu=0,049 \text{ мг/м} \times \text{ч} \times \text{Па}$ , водопоглощением по массе  $W_T=10,15 \%$ , коэффициентом размягчения  $K_p=0,73$  и маркой по морозостойкости  $F35$ .

Для оценки себестоимости полученной известковой ССС разработана схема технологии производства сухой строительной смеси и выбрана производительность предприятия – 3705 тонн продукции за год. На рисунке представлена схема производства известковой ССС с применением синтезированной добавки.

Процесс производства сухих строительных смесей, представленный на рисунке, включает в себя следующие этапы: подготовка компонентов и их сушка, просеивание, помещение исходных материалов в расходные бункеры, дозировка, смешивание, упаковка, складирование.

В таблице представлена калькуляция себестоимости изготовления известковой сухой строительной смеси по предлагаемой технологии и производительности предприятия. Стоимость материалов, используемых при производстве сухой строительной смеси, принята по реальным ценам 2018 года.



Технологическая схема производства сухой строительной смеси на основе добавки ГСК

## Калькуляция себестоимости сухой строительной смеси

Наименование затрат	Единица измерения	Цена за единицу измерения, руб.	Норма расхода на калькуляционную единицу	Затраты на калькуляционную единицу, руб.
Известь	т	3000	0,23185 т	695,47
Песок	т	200	0,69557 т	139,11
Диатомит	т	2000	0,25423 т	508
Хлорид кальция	т	12000	0,01694 т	202
Жидкое натриевое стекло	т	6000	0,16949 т	1014
Гидрофобизирующая добавка	т	140000	0,0008 т	112
Пластифицирующая добавка	т	45000	0,0023 т	103,6
Полимерная добавка	т	137000	0,00069 т	94,53
Пигмент	т	308630	0,00193 т	59,55
Итого:	руб.			2929,26
Вспомогательные материалы	руб.			33,43
Амортизация основного оборудования	руб.			60,00
Электроэнергия на технологические цели	кВт/ч	2,6	10,67 кВт/ч	23,742
Зарплата работников	руб.			656,91
Дополнительная заработная плата, премии	руб.			198,43
Аренда производственного помещения	руб.			157
Оборудование	руб.			40
Заводская себестоимость 1 т	руб.			4098,77
Заводская себестоимость 1 кг	руб.			4,098

Таким образом, представленная технологическая схема производства разработанной ССС на основе добавки ГСК, синтезированной в присутствии диатомита, позволила произвести расчет калькуляции себестоимости сухой строительной смеси.

Установлено, разработанная рецептура известковой ССС с применением добавки на основе гидросиликатов кальция является экономически эффективной, так как заводская себестоимость 1 кг сухой строительной смеси составит 4,098 руб.

### Список литературы

1. Ботка, Е.Н. Рынок сухих строительных смесей России. Итоги и перспективы / Е.Н. Ботка // СтройПРОФИ. – 2014. – № 5 (21). – С. 46–47.
2. Гонтарь, Ю.В. Модифицированные сухие смеси для отделочных работ / Ю.В. Гонтарь, А.И. Чалова // Строительные материалы. – 2001. – № 4. – С. 8–10.
3. Демьянова, В.С. Высокоэффективные сухие смеси различного ассортимента и назначения / В.С. Демьянова, В.И. Калашников, Н.М. Дубошина // Строительные материалы и изделия: материалы XXIX науч.-техн. конф. – 1997. – Ч. 2. – С. 30.
4. Макаревич, М.С. Гранулометрический состав заполнителя как технологическое средство управления качеством сухих штукатурных смесей / М.С. Макаревич // Композиционные строительные материалы. Теория и практика. – Пенза: материалы НТК. – 2004. – С.178–180.
5. Голубев, В.И. Новые продукты на рынке добавок для сухих строительных смесей и бетонов / В.И. Голубев, П.Г. Василик // Строительные материалы. – 2006. – № 3. – С. 24–25.
6. Зоткин, А.Г. Применение наполнителей в строительных смесях / А.Г. Зоткин // Сухие строительные смеси. – 2009. – № 3. – С. 66–68.
7. Логанина, В.И. Влияние синтезируемых алюмосиликатов на структурообразование цементных сухих строительных смесей / В.И. Логанина, К.В. Жегера // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 5. – С. 36–40.
8. Zhegera, K.V. Application of amorphous aluminosilicates as a modifying additive in the recipe of a cementitious adhesive for tiles / K.V. Zhegera // Modern Science. – 2017. – № 4–1. – P. 65–68.
9. Пышкина, И.С. Способ получения добавки на основе гидросиликатов кальция для сухих строительных смесей / И.С. Пышкина, К.В. Жегера, А.В. Жуланов, Н.Ю. Елизаров // Приволжский научный журнал. – 2017. – № 4 (44). – С. 81–86.
10. Большаков, Е.А. Сухие смеси для отделочных работ / Е.А. Большаков // Строит. материалы. – 1997. – №7. – С.8–9.
11. Бобрышев, А.А. Отделочные клеевые растворы на основе сухих смесей с использованием комплексных порошковых полимерных добавок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / А.А. Бобрышев. – Пенза, 2003. – 22 с.
12. Лохова, Т.Д. Строение, свойства и применение природных цеолитов: обзор, информ / Т.Д. Лохова, Н.П. Бычкова. – М.: НИИТЭХИИ, 1984. – 48 с.
13. Пышкина, И.С. Разработка наполнителя для сухих строительных смесей на основе гидросиликатов кальция с применением опалкристиабалитовых пород / И.С. Пышкина, В.И. Логанина // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2014. – № 2. – С. 96–98.
14. Пышкина, И.С. Способ получения добавки на основе гидросиликатов кальция для сухих строительных смесей / И.С. Пышкина, К.В. Жегера, А.В. Жуланов, Н.Ю. Елизаров // Приволжский научный журнал. – 2017. – № 4 (44). – С. 81–86.
15. Пышкина, И.С. Реологические свойства известковых составов с применением добавок гидросиликатов кальция / И.С. Пышкина, В.И. Логанина // Сухие строительные смеси. – 2017. – № 1. – С. 14–15.

## References

1. Botka, E.N. The market of dry building mixtures in Russia. Results and prospects / E.N. Botka // *StroyPROFI*. – 2014. – № 5 (21). – P. 46–47.
2. Gontar, Yu.V. Modified dry mixes for finishing works / Yu.V. Gontar, A.I. Chalova // *Construction materials*. – 2001. – № 4. – P. 8–10.
3. Demyanova, V.S. High-performance dry mixes of various assortment and purpose / V.S. Demyanova, V.I. Kalashnikov, N.M. Duboshina // *Building materials and products: materials XXIX scientific and technical. conf.* – 1997. – Part 2. – P. 30.
4. Makarevich, M.S. The granulometric composition of the aggregate as a technological tool for managing the quality of dry plaster mixes / M.S. Makarevich // *Composite building materials. Theory and practice*. – Penza: materials NTK. – 2004. – P.178–180.
5. Golubev, V.I. New products on the market of additives for dry building mixes and concretes / V.I. Golubev, P.G. Vasilik // *Construction materials*. – 2006. – № 3. – P. 24–25.
6. Zhdanov, S.P. Synthetic zeolites: crystallization, structural and chemical modification and adsorption properties / S.P. Zhdanov, S.S. Khvoshev, N.N. Samulevich – M.: Chemistry, 1981. – 264 p.
7. Zotkin, A.G. The use of fillers in building mixtures / A.G. Zotkin // *Dry building mixtures*. – 2009. – № 3. – P. 66–68.
8. Loganina, V.I. Effect of synthesized aluminosilicates on the structure formation of cement dry building mixtures / V.I. Loganina, K.V. Zhegera // *Bulletin of Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov*. – 2014. – № 5. – P. 36–40.
9. Zhegera, K.V. Application of amorphous aluminosilicates as a modifying cementitious adhesive for tiles / K.V. Zhegera // *Modern Science*. – 2017. – № 4–1. – P. 65–68.
10. Pyshkina, I.S. The method of obtaining an additive based on calcium hydrosilicates for dry construction mixtures / I.S. Pyshkina, K.V. Zhegera, A.V. Zhulanov, N.Yu. Elizarov // *Volga Scientific Journal*. – 2017. – № 4 (44). – P. 81–86.
11. Bolshakov, E.A. Dry mixes for decorating / E.A. Bolshakov // *Builds. materials*. – 1997. – №7. – P.8–9.
12. Bobryshev, A.A. Finishing adhesive solutions based on dry blends using complex powder polymer additives: author. dis. ... Cand. of Sciences: 05.23.05 / A.A. Bobryshev. – Penza, 2003. – 22 p.
13. Lokhova, T.D. Structure, properties and application of natural zeolites: review, inform / T.D. Lokhova, N.P. Bychkova. – M.: NIITEKHII, 1984. – 48 p.
14. Pyshkina, I.S. Development of a filler for dry construction mixtures based on calcium hydrosilicates using opalcristaballite rocks / I.S. Pyshkina, V.I. Loganina // *Academic Bulletin UralNIIProekt of the RAACS*. – 2014. – № 2. – P. 96–98.
15. Pyshkina, I.S. The method of obtaining an additive based on calcium hydrosilicates for dry construction mixtures / I.S. Pyshkina, K.V. Zhegera, A.V. Zhulanov, N.Yu. Elizarov // *Volga Scientific Journal*. – 2017. – № 4 (44). – P. 81–86.
16. Pyshkina, I.S. Rheological properties of lime compounds with the use of calcium hydrosilicates / I.S. Pyshkina, V.I. Loganina // *Dry building mixes*. – 2017. – № 1. – P. 14–15.

УДК 691.32; 691.335

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

**Романенко Игорь Иванович,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Механизация  
и автоматизация производства»  
E-mail: rom1959@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

**Romanenko Igor Ivanovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Mechanization and  
automation of production»  
E-mail: rom1959@yandex.ru

## СТОЙКОСТЬ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ В ЦЕМЕНТНОМ КАМНЕ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СООРУЖЕНИЙ

И.И. Романенко

По результатам контроля стойкости заполнителей бетонов в щелочной среде цементной матрицы приводится единый подход к формированию специфических требований к заполнителям, обеспечивающим эксплуатационные свойства конструкций в условиях попеременного увлажнения-высушивания.

*Ключевые слова: цементный камень, реакционно-активный заполнитель, условия, деформация, алгоритм оценки*

## DURABILITY OF FILLERS IN CEMENT STONE FOR ENSURING THE DURABILITY OF STRUCTURES

I.I. Romanenko

The durability of aggregate concretes in the alkaline environment of cement matrix is monitored, and a unified approach is given to the formation of specific requirements for aggregates that ensure operational properties of structures under alternating wetting and drying conditions.

*Keywords: cement stone, reaction-active aggregate, conditions, deformation, estimation algorithm*

Основной целью исследования являлась разработка методологии получения в короткие сроки результатов оценки пригодности заполнителей бетонов для использования в гидросооружениях на основе экспресс-метода.

В процессе эксплуатации гидротехнические железобетонные сооружения подвергаются климатическим воздействиям: увлажнению, высушиванию, нагреванию, охлаждению, замораживанию и оттаиванию. Это способствует активации процессов химической деструкции, протекающей во временном интервале, сопровождаемой расшатыванием структуры и разрушением целостности бетона [1]. Химическая деструкция цементного камня в условиях переменного увлажнения-высушивания обусловлена реакцией между щелочью цементной матрицы и реакционно-активным заполнителем. Очевидно, что минералогический состав заполнителя оказывает влияние на свойства бетона в долгосрочной перспективе [2–3].

Химическая реакция между гидроксидами щелочных металлов и реакционноспособным кремнеземом является, по существу, реакцией растворения. Это происходит в результате повышенной растворимости аморфных, неупорядоченных или плохо кристаллизованных форм минералов кремнезема в растворах с высоким рН. Реакция образует гигроскопичный щелочной силикагель, который впитывает воду и вызывает набухание. Сила набухания может быть достаточной для разрушения реакционно-активных частиц заполнителя и цементной матрицы. Основными доказательствами

этого патологического проявления, вызывающего чрезмерную деформацию, являются: трещины в форме карты; отложения беловатого геля в порах бетона; характерный окрас зерен заполнителя и контактной зоны с цементной матрицей; выкрашивание зерен заполнителя из тела цементного камня; падение прочности на изгиб и сжатие [4].

Существует несколько ключевых параметров, которые существенно влияют на реакционную активность заполнителя в бетоне: температура, влажность, содержание щелочей, наличие свободного гидроксида кальция, вид и количество реакционно-активных пород, совокупный размер частиц заполнителя и размер тестовых образцов.

Реакции между заполнителем и щелочью цементного камня представляют собой комплекс химических процессов, в которых повышение температуры способствует увеличению протекания реакции. Однако проведенные исследования (Чаттерджи и Кристенсен, 1990 г.) показывают, что общее расширение бетонных призм уменьшается с ростом температуры. В интервале температур от 20 до 40 °С наблюдается увеличение расширения бетонных призм, а при дальнейшем росте температуры до 90 °С происходит снижение до минимума. Температура в 40 °С соответствует максимальному значению расширения бетона при протекании реакции между реакционно-активным заполнителем и щелочью [5].

При приготовлении бетонов используется мелкий заполнитель, который способен к взаимодействию с щелочью цементной матрицы. В Пензенской области наиболее распространены овражные (кварцевые) и Сурские (речные) пески. В речных песках присутствует опаловидный халцедон. Проведенные исследования показали, что при содержании опаловидного халцедона фракции 1,2–2,0 мм в количестве более 50 % наблюдается расширение бетонных призм более 6 % при экспозиции 150 дней, температуре 80 °С и влажности 90 %. Образцы бетонных призм, изготовленных на основе кварцевых песков с содержанием включений опаловидного халцедона в количестве менее 50 %, характеризуются меньшим расширением за весь период наблюдений – 0,2–2,4 % (рис. 1).

Как видно из рис. 1, различные виды заполнителя по-разному проявляют активность: одни быстро реагируют с щелочью, а другие – медленно.

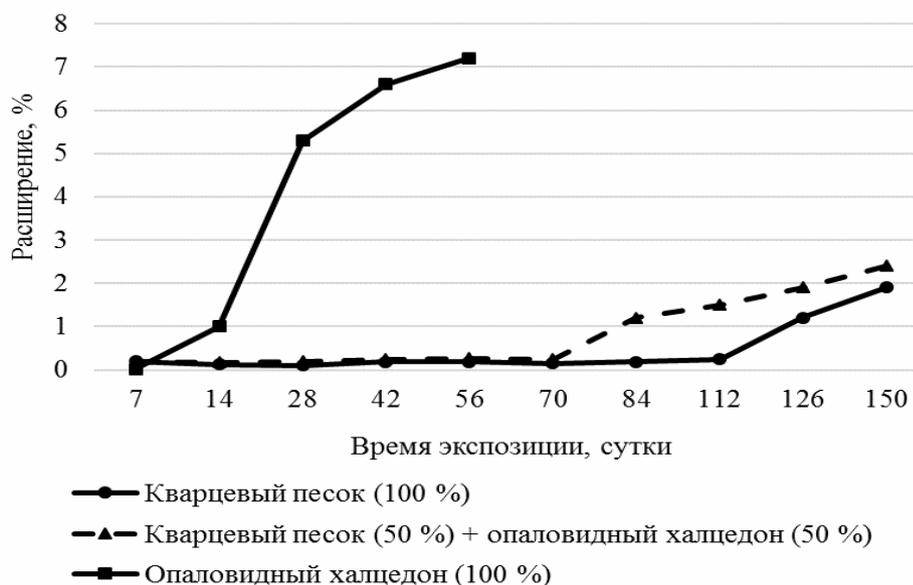


Рис. 1. Кинетика расширения бетонных призм размером 40×40×160 мм в зависимости от времени испытаний

Результаты испытаний по ускоренному тесту образцов бетонных балочек, изготовленных на основе реакционно-активного опаловидного песка, показали большее расширение призмы при крупности зерен от 0,15 до 0,63 мм, чем образцы с фракцией песка от 0,63 до 5,0 мм (рис. 2).

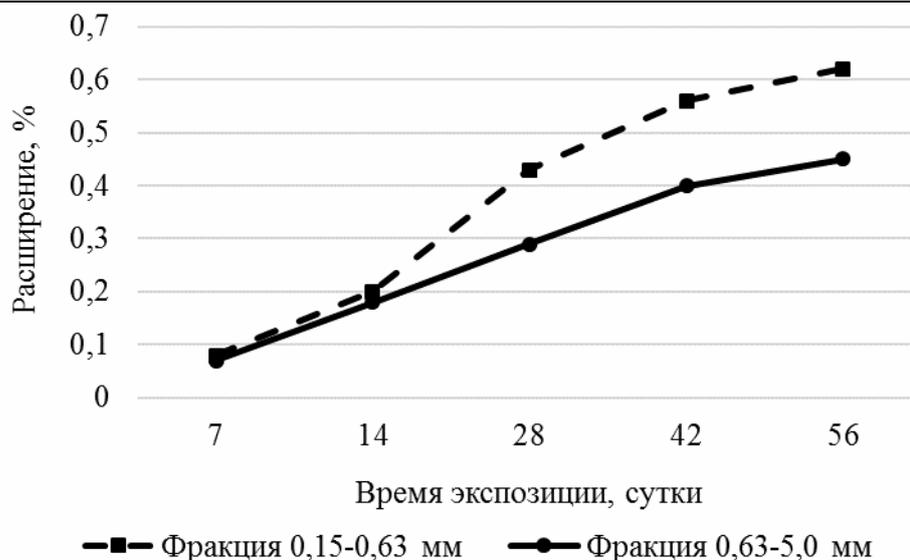


Рис. 2. Влияние крупности фракций реакционно-активного заполнителя на расширение бетонных призм. Песок – опаловидный халцедон (100 %)

В бетонных смесях присутствуют как мелкий заполнитель, так и крупный. В качестве щебня для строительства гидротехнических сооружений использовали гранитные и доломитовые породы, известняки и песчаники. На протяжении 60–40 лет эксплуатации при постоянном увлажнении и высушивании проявились разрушения в виде трещин, выхлопов заполнителя и выхода щелочи на поверхность конструкций (рис. 3).



Рис. 3. Разрыв сплошности цементной матрицы вокруг заполнителя и образование поверхностных трещин вдоль арматурных стержней

Не только вид заполнителя, но и размер частиц реакционноспособного крупного заполнителя влияют на скорость протекания щелочных реакций, расширение и степень повреждения бетонных конструкций. Гранитные породы показали себя инертным материалом по отношению к щелочной среде, а другие виды заполнителей требуется дополнительно тестировать на реакционную способность [5, 6].

Влияние размера частиц реакционноспособного заполнителя на расширение бетонных балочек исследовали на щебне следующих фракций: 5–8 мм, 8–10 мм, 10–12 мм. Несмотря на сходство химического и минералогического составов, более крупный размер заполнителя вызывает большее расширение. Однако при использовании составной фракции 5–12 мм бетонные образцы имели меньшее значение расширения, чем при отдельных фракциях (рис. 4, 5).

Полученные результаты можно объяснить явлением конкурентности и протеканием реакций в стесненных факторных условиях.

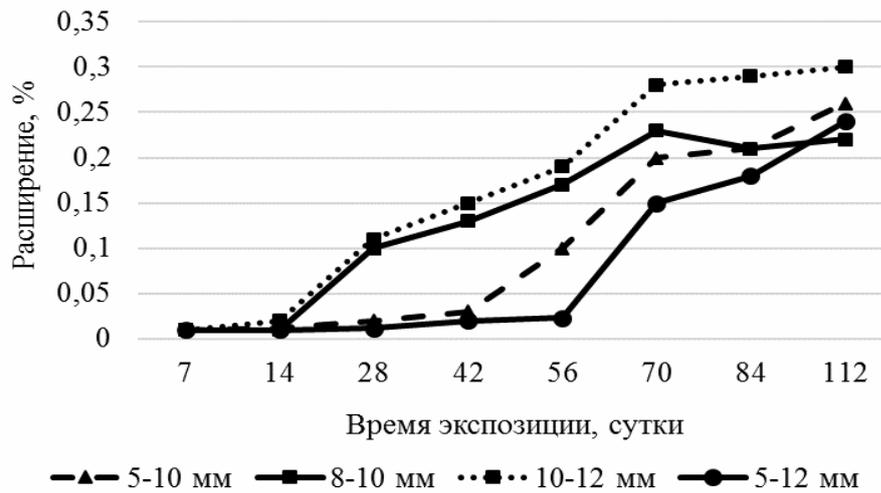


Рис. 4. Кинетика расширения бетонных призм в зависимости от фракции крупного заполнителя (доломитовый щебень)

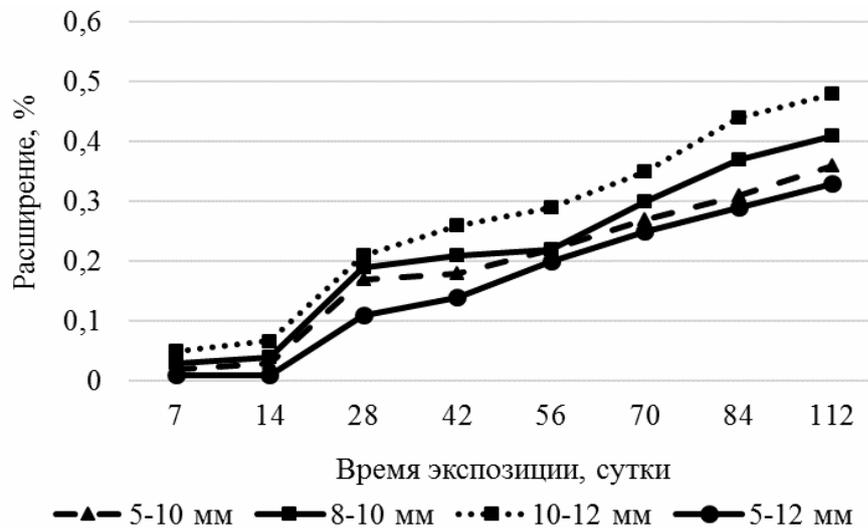


Рис. 5. Кинетика расширения бетонных призм в зависимости от фракции крупного заполнителя (песчаник)

Другим фактором, влияющим на результаты тестовых испытаний, является размер бетонных образцов. Испытания проводились на призмах размером  $40 \times 40 \times 160$  мм и  $30 \times 30 \times 300$  мм. Крупный заполнитель – щебень из песчаника фракцией 5–10 мм и кварцевый песок с модулем крупности  $M_{кр} = 1,5$ . Испытания в камере проводились при температуре  $40^\circ\text{C}$  при влажности 90 % и выдержке образцов на перфорированной решетке, расположенной над водой. На рис. 6 показана корреляционная зависимость между измеренными расширениями бетонных образцов с двумя размерами призм. На основании этих результатов утверждается, что расширение, полученное для малого образца, в 2,1 раза меньше, чем для большого образца ( $30 \times 30 \times 300$  мм). Измерения проводились во временном интервале от 7 до 28 суток. Уравнение корреляции между измерениями описывается как  $Y = 0,45X$  и  $R^2 = 0,92$ .

Результаты исследований показали, что размеры используемых образцов сильно влияют на измеренное расширение за счет щелочной коррозии заполнителя. Особенно часто такая реакция проявляется при использовании высокощелочных цементов и реакционно-активных заполнителей.

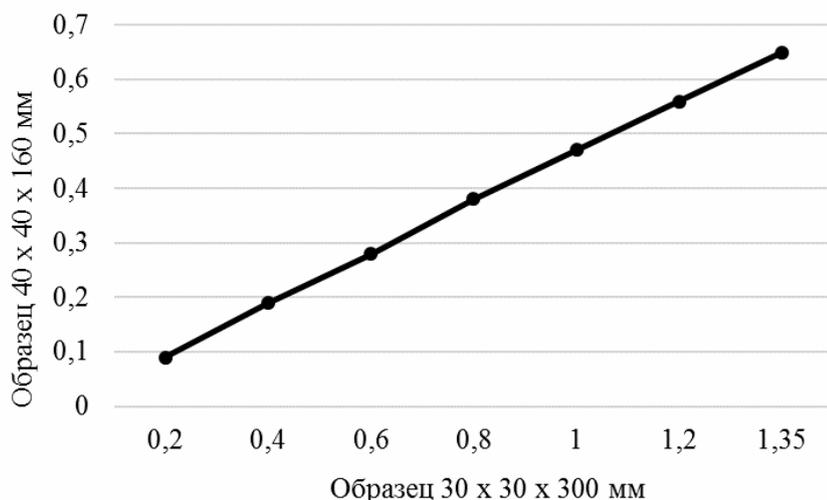


Рис. 6. Корреляционная зависимость между результатами измерений деформаций бетонных образцов размерами 40×40×160 мм и 30×30×300 мм

Обследование состояния железобетонных конструкций плотины в с. Казеевка Пензенской области показало, что прочность бетона составляет 35–40 МПа и не соответствует критическим величинам. На поверхности бетона тела плотины видны места, связанные с выпором бетона в результате коррозии арматуры, отстрела крупного заполнителя и щелочно-кремниевой реакции между опаловидным халцедоном с щелочью цементного камня [7]. Для проведения ремонтных работ требуется исследование используемых материалов на основе экспресс-метода.

Экспресс-метод оценки пригодности заполнителя для бетона, эксплуатируемого в сложных климатических условиях, состоит из двух этапов. На первом этапе изготавливались бетонные призмы с планируемым видом заполнителя на основе портландцемента. В качестве затворителя бетонной смеси использовали 2,5 % водный раствор NaOH в пересчете на Na<sub>2</sub>O. Осадка конуса бетонной смеси составляла 10 см. Образцы призм размером 40×40×160 мм подвергали тепловлажностной обработке по режиму 3 + 8 + 5 при температуре изотермической выдержки 80 °С. Через 24 часа образцы закладывались в емкость на перфорированную решетку, которая располагалась над водой. В камере поддерживалась температура 80±5 °С. Время экспозиции 50 дней. Результатом исследований было определение величины остаточного растяжения бетона. Затем в течение 21 дня проводили испытания на расшатывание структуры и ускорение щелочной реакции между заполнителем и свободной щелочью цементного камня: сушка при температуре 105 °С – 3 часа; охлаждение на воздухе до 20±5 °С – 3 часа; выдержка в воде 8 часов. Щебень не является реакционно-активным по отношению к щелочной среде, если растяжения бетонных призм не превышают 1,5 мм/м.

Второй этап экспресс-метода заключался в проведении следующих мероприятий. Поверхность щебня очищалась металлическими щетками, затем протравливалась 2 %-м водным раствором соляной кислоты. Пробы щебня промывались в проточной питьевой воде в течение 4 часов, высушивались, взвешивались по 300 г из каждой исследуемой пробы, затем помещались в емкости с 5 %-м раствором NaOH, и в течение 48 часов осуществлялось кипячение в эксикаторе. Далее производились охлаждение и промывка проб в водопроводной питьевой воде в течение 4 часов. Контролировался вес пробы. При потере массы более 2 % считается, что материал реакционно-активный и применять его в железобетонных конструкциях с высокой щелочностью цементной матрицы, подвергающейся постоянному увлажнению, не рекомендуется.

Методология проведения контроля пригодности заполнителей при строительстве гидротехнических сооружений представлена в виде алгоритма на основе разработанного экспресс-метода (рис. 7).

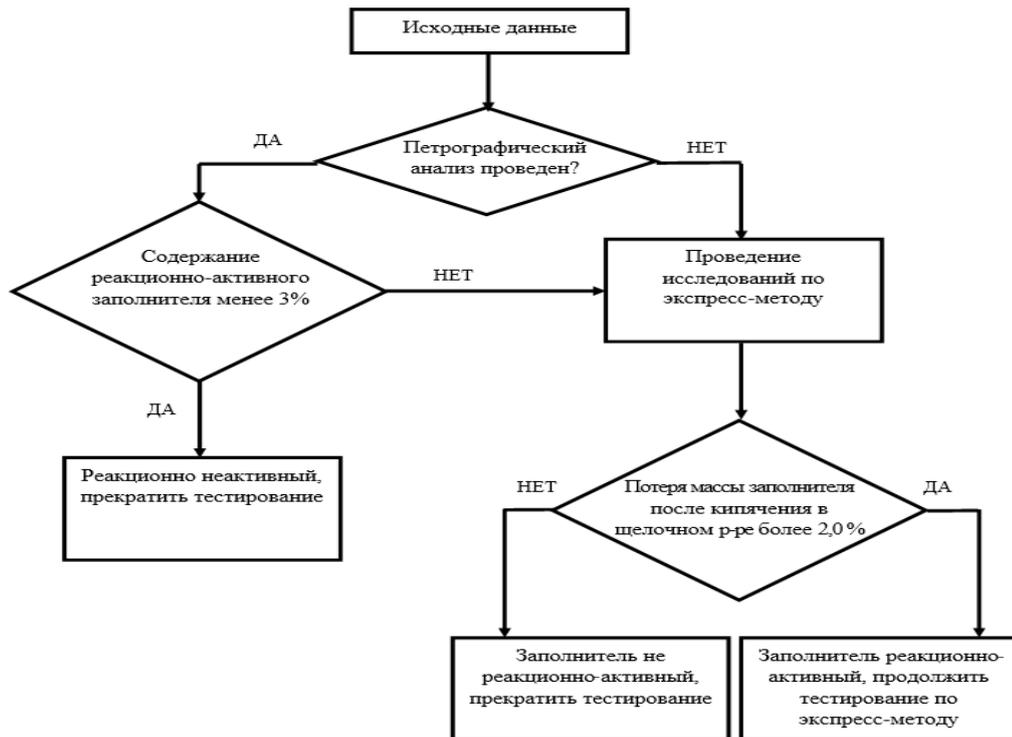


Рис. 7. Алгоритм проведения оценки восприимчивости ингредиентов бетонной смеси к развитию щелочно-кремнеземной реакции в цементном камне

Таким образом, чтобы предотвратить развитие щелочно-кремнеземистых реакций в бетонных сооружениях, предлагается:

- регулировать щелочность порового раствора цементного камня за счет использования пуццолановых компонентов, шлаков и зол;
- контролировать содержание реакционно-активного кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ) в заполнителе. В случае содержания его в количестве  $\geq 30\%$  необходимо провести исследования по разработанному экспресс-методу.

Экспресс-метод позволяет выяснить реактивность совокупного заполнителя в течение короткого времени и установить приемлемые пределы расширения бетона в результате реакции заполнителя в щелочной среде цементного камня.

#### Список литературы

1. Романенко, И.И. Коррозионная стойкость шлакощелочных бетонов в органических средах / И.И. Романенко, И.Н. Петровнина, Э.М. Пинт, М.И. Романенко // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 1. – С. 42–51.
2. Stark, J. Dauerhaftigkeit von Beton – Der Baustoff als Werkstoff / J. Stark, B. Wicht. – Basel:Verlag Birkhaeuser, 2001. – S.48–56.
3. Deutscher Ausschuss fuer Stahlbeton (DAf-Stb) (Hrsg.): Richtlinie Vorbeugende Massnahmen gegen schaedigende Alkaliereaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). – Ausgabe, Mai 2001. – S.31–43.
4. Stark, J. AKR-Pruefverfahren zur Beurteilung von Gesteinskoernungen and projektspezifischen Betonen / J. Stark [et al.] // In: beton 56 (2006). – Heft 12. – S. 574 – 581.
5. Малаханов, В.В. Совершенствование мониторинга состояния и декларирования безопасности гидротехнических сооружений / В.В. Малаханов, Д.В. Кузнецов // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 1. – С. 41–53.
6. Бандурин, М.А. Проблемы определения остаточного ресурса технического состояния закрытых водосборов низконапорных гидроузлов / М.А. Бандурин //

Инженерный вестник Дона. – 2014. – №1. – URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2279](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2279).

7. Романенко, И.И. Деформации цементного камня, приводящие к образованию поверхностных трещин / И.И. Романенко, Э.М. Пинт, М.И. Романенко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 4. – С. 32–36.

#### References

1. Romanenko, I.I. Corrosion resistance of slag concrete in organic media / I.I. Romanenko, I.N. Petrunina, E.M. Pint, M.I. Romanenko // Regional architecture and engineering. – 2013. – № 1. – P. 42–51.

2. Stark, J. Dauerhaftigkeit von Beton – Der Baustoff als Werkstoff / J. Stark, B. Wicht. – Basel: Verlag Birkhaeuser, 2001. – S.48–56.

3. Deutscher Ausschuss fuer Stahlbeton (DAf-Stb) (Hrsg.): Richtlinie Vorbeugende Massnahmen gegen schaedigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). – Ausgabe, Mai 2001. – S.31–43.

4. Stark, J. AKR-Pruefverfahren zur Beurteilung von Gesteinskoernungen and projektspezifischen Betonen / J. Stark [et al.] // In: beton 56 (2006). – Heft 12. – S. 574 – 581.

5. Malakhanov, V.V. Improvement of monitoring and Declaration of safety of hydraulic structures / V.V. Malakhanov, D.V. Kuznetsov // Hydraulic engineering. – 2016. – № 1. – P. 41–53.

6. Bandurin, M.A. Problems of determination of a residual resource of a technical condition of the closed spillways of low-pressure waterworks / M.A. Bandurin // Engineering Bulletin of the don. – 2014. – №1. – URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2279](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2279).

7. Romanenko, I.I. Deformation of cement stone, leading to the formation of surface cracks / I.I. Romanenko, E.M. Pint, M.I. Romanenko // Bulletin of Belgorod state technological University V. G. Shukhov. – 2012. – № 4. – P. 32–36.

УДК 691.32; 691.714

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

**Петровнина Ирина Николаевна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Механизация  
и автоматизация производства»  
E-mail: irisha-vas@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

**Petrovnina Irina Nikolaevna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Mechanization and  
automation of production»  
E-mail: irisha-vas@yandex.ru

## ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ПУТЕМ ИНГИБИРОВАНИЯ КОРРОЗИИ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИЦЕЛИАЛЬНЫХ МАСС

И.Н. Петровнина

Рассмотрена коррозия стальной арматуры в железобетонных конструкциях на шлакощелочном вяжущем при воздействии агрессивной среды. Выявлено, что бетон с содержанием мицелиальных масс в количестве 3 % от расхода гидравлического вяжущего выполняет роль ингибитора коррозии арматурной стали.

*Ключевые слова:* шлакощелочные бетоны, коррозия, арматура, щелочность среды, пассивация, ингибитор коррозии, мицелий

## IMPROVEMENT OF CONCRETE DURABILITY INHIBITING STEEL CORROSION USING MICELIAL MASSES

I.N. Petrovnina

The corrosion of steel reinforcement in reinforced concrete structures on slag-alkaline binder under the influence of aggressive environment is considered. It was revealed that concrete with the content of mycelial masses in the amount of 3 % of the flow rate of the hydraulic binder plays the role of a corrosion inhibitor of reinforced steel.

*Keywords:* slag concrete, corrosion, reinforcement, alkalinity, passivation, corrosion inhibitor, mycelium

Армирование бетонных конструкций направлено на повышение их прочности при растяжении и изгибе. В то же время арматура снижает долговечность железобетонных конструкций из-за склонности арматурной стали к коррозии [1]. В связи с этим защита стальной арматуры от коррозии является весьма актуальной задачей.

Для возникновения коррозии арматурной стали необходимы следующие условия: влажность (75–85 %) и наличие кислорода. Сохранение в бетоне щелочной среды  $\text{pH} \geq 12,5$  способствует образованию защитного покрытия на поверхности стали и повышению ее коррозионной стойкости. Однако с течением времени из-за карбонизации бетона или проникновения хлорид-ионов в бетон значение  $\text{pH}$  понижается, что способствует развитию коррозии и вызывает образование трещин и сколов бетона [2]. Ключевым фактором, обеспечивающим качество и долговечность бетона, является его непроницаемость, которая может быть обеспечена путем использования обмазочных составов или бесцементных вяжущих и подбором оптимального состава бетона [3–5].

При погружении стали в гидратирующую цементную пасту (на основе портланд-цемента) на ее поверхности образуется тонкий слой оксида металла, который обеспечивает защиту от взаимодействия с кислородом и водой. Такой процесс известен как электрохимическая пассивация. Следовательно, повысить эксплуатационные свойства железобетона можно при правильном подборе состава бетонов, наличии модифика-

торов-добавок и повышении трещиностойкости бетонов. Защитное действие бетонов по отношению к арматуре определяется способностью шлакощелочного бетона (ШЩБ) пассивировать сталь [6].

В ШЩБ может применяться модифицирующая добавка – гидролизный мицелий, являющийся отходом фармацевтической промышленности и позволяющий получить бетоны с высокой водонепроницаемостью, создать структуру камня с преобладанием мелких пор округлой формы. Кроме того, известно, что белковые соединения при определенных условиях оказывают пассивирующее воздействие на сталь. Предварительная оценка коррозионной стойкости стали в растворах углеводов (сахароза, глюкоза) и в суспензиях декстрана и декстрина выявила сильное ингибирующее действие этих веществ. Таким образом, можно предположить, что коррозия арматуры в бетоне с добавкой мицелия будет протекать менее интенсивно, чем в обычном бетоне равной плотности. В связи с этим возникла необходимость экспериментально провести оценку коррозионной стойкости арматурной стали в бетоне с добавками мицелия (отходы производства лекарственного препарата – олеандомицина) при воздействии агрессивных сред.

Испытания стали в ШЩБ выполнялись на армированных образцах размером 40×40×160 мм. Образцы изготавливались из мелкозернистого бетона состава 1:3 с Р/Ш = 0,4. Толщина защитного слоя для арматуры составляла 20 мм. Арматурные стержни и пластинки из стали СтЗсп очищались от ржавчины, полировались и обезжиривались ацетоном; перед укладкой в бетон образцы взвешивались (с точностью до 0,01 г). После тепловлажностной обработки образцы хранились в камере нормального твердения. В возрасте 28 суток образцы ШЩБ подвергали попеременному увлажнению и высушиванию (4 часа – увлажнение погружением в воду, 8 часов – высушивание при температуре 50 °С и 12 часов – пребывание на воздухе). Через 6, 9, 12 месяцев испытаний образцы ШЩБ подвергались разрушению. Стержни очищали от ржавчины, промывали водой, высушивали и взвешивали на аналитических весах.

Оценку коррозионной стойкости арматурной стали производили по потере массы образцов:

$$\Delta = \frac{P - P_1}{S},$$

где  $\Delta$  – потеря массы, г/м<sup>2</sup>;  $P$  – масса металлического образца до помещения его в ШЩБ, г;  $P_1$  – масса металлического образца после извлечения из ШЩБ, г;  $S$  – площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>.

Коррозионную стойкость арматура в ШЩБ с добавкой мицелия изучали при полном погружении образцов в 5 % растворы NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>. Результаты коррозионных испытаний представлены в таблице.

Потери массы арматуры в ШЩБ на щелочном компоненте + жидкое стекло (1:1) при выдержке в агрессивных средах, Р/Ш = 0,4 (плотность щелочного раствора  $\rho = 1200$  кг/м<sup>3</sup>)

Вид вяжущего	Дозировка добавки, % от массы шлака	Потери массы арматуры в бетоне во времени, в воде и растворах, г/м <sup>2</sup>														
		H <sub>2</sub> O			5%-й раствор NaCl			5%-й раствор Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			5%-й раствор MgSO <sub>4</sub>			Циклическое высушивание, увлажнение		
		6 мес	12 мес	24 мес	6 мес	12 мес	24 мес	6 мес	12 мес	24 мес	6 мес	12 мес	24 мес	6 мес	12 мес	24 мес
Новолипецкий	-	0,48	0,56	0,69	0,41	0,49	0,58	2,90	4,44	6,00	0,40	0,52	0,61	6,56	8,61	11,83
-//-	3	0,27	0,28	0,31	0,36	0,41	0,49	2,20	3,12	4,36	0,23	0,25	0,35	4,81	6,72	9,55
-//-	10	0,51	0,61	0,82	0,47	0,60	0,79	3,31	5,60	7,15	0,49	0,60	0,78	7,20	9,96	14,68

Как видно, степень коррозионного разрушения арматуры зависит от состава среды. Установлено, что наиболее агрессивным по отношению к арматуре является 5 %-й раствор  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Так, потери массы стали в бетоне с добавкой 3 % мицелия в данном растворе оказались больше в 8–14 раз (в зависимости от времени выдержки), чем потери массы арматуры в бетоне аналогичного состава при выдержке в воде, а потери массы металла в бетоне с 10 %-й добавкой – в 7–9 раз выше. Кроме того, полученные экспериментальные данные позволяют оценить интенсивность коррозии стали в зависимости от содержания модифицирующей добавки в бетоне. Так, во всех используемых агрессивных средах потеря массы арматурной стали в ШЩБ с 3 %-й добавкой мицелия меньше, чем в бетоне без добавки и с дозировкой мицелия 10 % (см. таблицу). Повышение коррозионной стойкости арматуры в образцах ШЩБ можно объяснить оптимальной поровой структурой цементного камня при дозировке мицелия 3 %. При увеличении содержания добавки до 10 % возрастает объем крупных пор [4], что негативно сказывается на коррозионной стойкости арматуры.

После выдержки в течение шести месяцев образцов ШЩБ в агрессивных средах и в воде проводилась визуальная оценка коррозионной стойкости металла. Обследование арматуры показало, что для состава бетона с 3 %-й добавкой мицелия характерно образование на поверхности металла ингибирующей пленки черного цвета, под которой не обнаружено коррозионного разрушения стали во всех средах (за исключением 5 %-го раствора  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Потери массы арматуры в них составили от 0,23 до 0,36 г/м<sup>2</sup>, что значительно меньше граничного значения 1,5–2,0 г/м<sup>2</sup>, т.е. бетон обладает высоким защитным эффектом по отношению к арматуре.

В 5 %-м растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  потери массы металла за тот же период составили 2,2 г/м<sup>2</sup>, однако значительных внешних изменений поверхности арматуры не выявлено.

В том случае, когда потери массы образцов равны 4,0 г/м<sup>2</sup> и более, можно считать, что пассивирующее действие бетона по отношению к арматуре полностью утрачено. При визуальном осмотре арматурной стали к концу 24-го месяца выдержки ШЩБ с добавкой 10 % мицелия в растворе сульфата натрия обнаружены очаги питтинговой коррозии. При этом потери массы металла составили 7,15 г/м<sup>2</sup>.

Результаты испытаний при циклическом увлажнении и высушивании образцов ШЩБ в течение 24 месяцев показали, что потери массы арматуры превышают потери массы стали при выдержке образцов железобетона в воде в 14–18 раз. Кроме того, для образцов бетона с добавкой мицелия 3 % отмечается меньшая величина потери массы металла (9,55 г/м<sup>2</sup>) по сравнению с образцами бетона, содержащими 10 % мицелия (14,68 г/м<sup>2</sup>) и образцами без модифицирующей добавки (11,83 г/м<sup>2</sup>).

Визуальное обследование образцов ШЩБ после испытаний при увлажнении и высушивании выявило коррозионные поражения арматуры отдельными язвами. Более глубокими язвами оказался поражен металл, находящийся в бетоне с 10 % мицелия. Можно полагать, что циклическое воздействие приводит к разрушению как пассивирующей пленки, так и бетона.

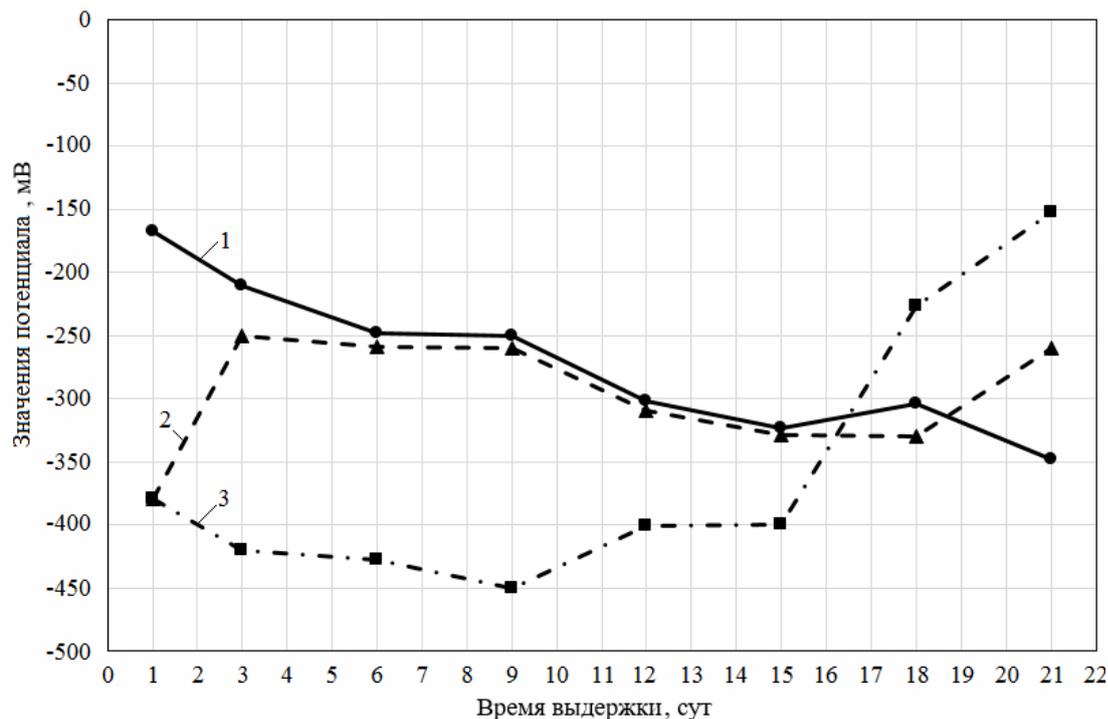
Таким образом, попеременное увлажнение и высушивание железобетонных образцов оказывает более значительное влияние на коррозионную стойкость стали по сравнению с их хранением в агрессивных растворах. Введение гидролизного мицелия в ШЩБ в количестве 3 % от массы шлака способствует повышению защитных свойств бетона.

Дальнейшие исследования проводились методом потенциалов полуэлемента в 0,2 М  $\text{H}_2\text{SO}_4$  [7]. Метод дает оценку наличия процесса коррозии в арматуре в местах измерений. Большие отрицательные значения потенциалов (< -350 мВ) означают, что процессы коррозии арматуры развиваются с большой степенью вероятности, тогда как значения потенциалов < -200 мВ говорят о пассивном состоянии арматуры.

Испытанию подвергались образцы ШЩБ с арматурными стержнями длиной 160 мм и диаметром 16 мм. С образцов удалялись окалина и пятна ржавчины. Затем они полировались, обезжиривались и высушивались. Часть стержня длиной 140 мм была погружена в центр бетонного образца, оставшиеся 20 мм выступали за его пределы. Свободная часть образца защищалась от атмосферной коррозии полимерным покрытием.

Каждый бетонный блок частично погружался в 0,2 М серной кислоты, так что ее средний уровень был ниже оголенной арматуры. Медно-сульфатный электрод контактировал с поверхностью образца, а свободный конец арматурной стали выполнял роль электрода. Измерения потенциала проводились на поверхности бетона в точках над арматурным стержнем по всей длине образца. Проводилось по три измерения в одно и то же время в течение 21 суток.

На рисунке представлены результаты измерений электрохимического потенциала арматурной стали при различном содержании добавки мицелия (0, 3, 10 %) в бетоне. Полученные графические зависимости характеризуют изменение электропотенциала (мВ) железобетонных образцов, частично погруженных в 0,2 М водный раствор  $H_2SO_4$ .



Зависимость потенциала арматурной стали в бетоне от времени выдержки при частичном погружении образцов в 0,2 М  $H_2SO_4$

Зависимость 1, полученная при измерении потенциала стали в бетоне без добавки мицелия, свидетельствует о том, что ШЩБ на протяжении всего времени наблюдений оставался в состоянии, при котором арматурная сталь практически не подвержена коррозии. Значения потенциала арматурной стали в бетоне находятся в пределах от -150 до -350 мВ. Зависимость 2, соответствующая 3,0 % содержания добавки мицелия, указывает на эффективность ингибирования почти в течение всего экспериментального периода. В период с 12-го по 21-й день испытаний значения потенциала стали находились в пределах от -260 до -310 мВ, что говорит о некоторой интенсификации коррозионного процесса стали. Зависимость 3, соответствующая 10 % содержания добавки, показала тенденцию к активации коррозионного процесса металла в период с 1-го по 9-й день проведения испытаний. Значения потенциала стали в это время изменяются от -380 мВ до -450 мВ. Однако в течение всего остального экспериментального периода бетон обеспечивает пассивирующий эффект по отношению к стальной арматуре. Потенциал бетона достигает значений -227 и -153 мВ на 18-й и 21-й день испытаний соответственно, что свидетельствует о том, что процесс коррозии арматурной стали внутри бетона в течение последних 9 дней испытаний практически отсутствовал.

## Заключение

1. Возможно получение пассивирующего эффекта бетона по отношению к арматурной стали за счет использования гидролизного мицеллия.
2. Поскольку возможность использования мицелиальных масс в качестве ингибитора коррозии арматурной стали недостаточно изучена и требует дальнейших исследований, то целесообразно для получения более полной информации о коррозионном поведении стали в бетонах увеличить время экспозиции (5 лет и более).

## Список литературы

1. Poursaee, A. Corrosion of steel bars in OPC mortarexposed to NaCl, MgCl<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub>: macro- and micro-cell corrosionperspective / A. Poursaee, A. Laurent, C.M. Hansson // *Cem Concr Res.* – 2010; 40:4. – P. 26–30.
2. Geng, J. Effect of carbonation on release of bound chlorides in chloridecontaminated concrete / J. Geng, D. Easterbrook, Q.-F. Liu, L.-Y. Li // *Mag. Concr. Res.* – 2015. – №68. – P. 353–363.
3. Bertolini, L. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair / L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli, R.B. Polder.– 2nd ed. – John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2013.
4. Романенко, И.И. Коррозионная стойкость шлакощелочных бетонов в органических средах / И.И. Романенко, И.Н. Петровнина, Э.М. Пинт, М.И. Романенко // *Региональная архитектура и строительство.* – 2013. – № 1. – С. 42–51.
5. Романенко, И.И. Формирование трещин в цементном камне строительных конструкций / И.И. Романенко, И.Н. Петровнина, К.А. Еличев // *Дневник науки.* – 2017. – № 11 (11). – 18 с.
6. Смирнов, Д.С. Оценка коррозионной стойкости стальной арматуры в модифицированном бетоне / Д.С. Смирнов, З.А. Камалова, Р.З. Рахимов // *Известия КГАСУ.* – 2014. – №3 (29). – С. 133–139.
7. ОДМ 218.3.001-2010. Рекомендации по диагностике активной коррозии арматуры в железобетонных конструкциях мостовых сооружений на автомобильных дорогах методом потенциалов полуэлемента. – М.: Федеральное дорожное агентство (РОСАВТОДОР), 2011.

## References

1. Poursaee, A. Corrosion of steel bars in OPC mortarexposed to NaCl, MgCl<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub>: macro- and micro-cell corrosionperspective / A. Poursaee, A. Laurent, C.M. Hansson // *Cem Concr Res.* – 2010; 40:4. – P. 26–30.
2. Geng, J. Effect of carbonation on release of bound chlorides in chloridecontaminated concrete / J. Geng, D. Easterbrook, Q.-F. Liu, L.-Y. Li // *Mag. Concr. Res.* – 2015. – №68. – P. 353–363.
3. Bertolini, L. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair / L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli, R.B. Polder. – 2nd ed. – John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2013.
4. Romanenko, I.I. Corrosion resistance of slag concrete in organic media / I.Romanenko, I.N. Petrunina, E.M. Pint, M.I. Romanenko // *Regional architecture and engineering.* – 2013. – № 1. – P. 42–51.
5. Romanenko, I.I. Formation of cracks in the cement stone of building structures / I.I. Romanenko, I.N. Petrovnina, K.A. Elichev // *Journal of science.* – 2017. – № 11 (11). – 18 p.
6. Smirnov, D. S. Assessment of corrosion resistance of steel reinforcement in modified concrete / D. S. Smirnov, Z. A. Kamalova, R. Z. Rakhimov // *Izvestiya kgasu.* – 2014. – №3 (29). – P. 133–139.
7. ODM 218.3.001-2010. Recommendations for the diagnosis of active corrosion of reinforcement in reinforced concrete structures of bridge structures on highways using the half-cell potential method. – М.: Federal Road Agency (ROSAVTODOR), 2011.

УДК 691.5

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

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

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

*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

## О СВЯЗИ СТОИМОСТИ ОТДЕЛОЧНЫХ РАБОТ С КАЧЕСТВОМ ИХ ВНЕШНЕГО ВИДА

В.И. Логанина

Установлена корреляционная зависимость между разбросом показателей качества лакокрасочных покрытий и экономическими затратами на их ремонт. Выявлено, что эксплуатационные расходы на ремонт окрашенных поверхностей могут быть снижены за счет более высокой культуры производства, предусматривающей снижение среднеквадратического отклонения показателей качества.

*Ключевые слова: покрытия, строительные изделия, качество внешнего вида, функция потерь*

## ON THE RELATIONSHIP OF THE FINISHING WORKS COST ON THE QUALITY OF THEIR APPEARANCE

V.I. Loganina

A correlation was established between the variance in the quality indicators of paint and varnish coatings and the economic costs of their repair. It was revealed that the operating costs of repairing painted surfaces can be reduced due to a higher production culture, which provides a reduction of standard deviation of quality indicators.

*Keywords: coatings, building products, appearance quality, loss function*

В соответствии с [1–7] оценка качества продукции может быть проведена по двум основным характеристикам: функции потерь качества, которая измеряет потери качества в результате отклонения параметра качества от требуемого значения, и разбросу показателей качества.

Тагути установил, что квадратичная форма функции потерь является эффективным представлением величины потерь от недостаточного качества, а отношение желаемого значения параметра качества (среднего) к его дисперсии рассматривается как отношение  $S/N$ . Тагути предложена функция потери  $L(y)$  качества, согласно которой стоимость отклонения от целевого значения возрастает по квадратичному закону по мере удаления от цели:

$$L = k \cdot (y - m)^2, \quad (1)$$

где  $L$  – функция потерь;  $k$  – постоянная потеря;  $y$  – значение измеряемой величины;  $m$  – номинальное значение соответствующей характеристики.

Это уравнение оценивает функцию потерь в случае, когда имеется одно значение параметра, а величины  $k$  и  $m$  – постоянные. Если же имеется более одного измерения параметра  $y$ , а именно  $n$  наблюдений, то среднее значение функции потерь по всем измерениям выражается как

$$L(y) = \frac{k}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - m)^2. \quad (2)$$

Качество любой окрашенной поверхности можно охарактеризовать классом, баллом, количественным показателем или любым другим нестандартным методом. Все данные методы объединяет то, что качество определяется количеством и размерами дефектов на площади поверхности. Можно выделить следующие виды дефектов, определяющие совокупность свойств ( $x_1, x_2, \dots, x_3$ ): изменение цвета ( $x_1$ ); изменение блеска ( $x_2$ ); меление ( $x_3$ ); грязеудержание ( $x_4$ ); волнистость ( $x_5$ ); включения ( $x_6$ ); потёки ( $x_7$ ); штрихи, риски ( $x_8$ ); разнооттеночность ( $x_9$ ); выветривание ( $x_{10}$ ); растрескивание ( $x_{11}$ ); отслаивание ( $x_{12}$ ); растворение ( $x_{13}$ ); сморщивание ( $x_{14}$ ); образование пузырей ( $x_{15}$ ). Оценив каждое из 15 вышеотмеченных свойств и обобщив результаты, можно получить исчерпывающую информацию о качестве покрытия.

В [8] предложено оценивать качество окрашенной поверхности интегральным показателем  $Q_{\text{пок}}$ , приведены значения установленного интегрального показателя качества  $Q_{\text{уст}}$ , который составляет при приемке сооружения промышленного и гражданского строительства  $Q_{\text{уст}}=0,968$ , а при приемке временных сооружений  $Q_{\text{уст}}=0,874$ .

Вычисляя в соответствии с критериями количественные значения показателя  $Q_{\text{пок}}$  и сравнивая полученные значения с установленными  $Q_{\text{уст}}$ , делается вывод о качестве окраски поверхности строительных изделий. Таким образом, применительно к лакокрасочным покрытиям строительных изделий и конструкций функция потери  $L(y)$  имеет вид

$$L(y) = \frac{k}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - 0,968)^2$$

или

$$L(y) = \frac{k}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - 0,874)^2. \quad (3)$$

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие связь качества внешнего вида покрытий с их стойкостью и стоимостью (табл.1).

Т а б л и ц а 1

Обобщенная оценка декоративных и защитных свойств лакокрасочных покрытий после испытаний на замораживание-оттаивание

Наименование красочного состава	Изменение качества покрытий после циклов испытаний, обобщенная оценка декоративных и защитных свойств покрытий				
	После отверждения	5	10	13	15
1	2	3	4	5	6
Алкидная эмаль ПФ-115	0,83	0,58	0,47 Наблюдается отслоение покрытия	-	-
	0,91	0,78	0,6	0,53 Наблюдается отслоение покрытия	-
	0,96	0,84	0,75	0,7	0,47 Наблюдается отслоение покрытия
	0,87	0,59	0,53 Наблюдается отслоение покрытия	-	-

1	2	3	4	5	6
	0,94	0,79	0,52 Наблюдается отслоение покрытия	-	-
	0,98	0,91	0,79	0,72	0,67
	0,8	0,45 Наблюдается отслоение покрытия	-	-	-
	0,89	0,66	0,53 Наблюдается отслоение покрытия	-	-
	0,95	0,81	0,52 Наблюдается отслоение покрытия	-	-
Масляная краска МА-15	0,86	0,5 Наблюдается отслоение покрытия	-	-	-
	0,9	0,67	0,61	0,53 Наблюдается отслоение покрытия	=
	0,95	0,81	0,69	0,6	0,58
	0,89	0,51 Наблюдается отслоение покрытия	-	-	-
	0,94	0,76	0,62	0,52 Наблюдается отслоение покрытия	-
	0,97	0,84	0,73	0,63	0,61
	0,86	0,53 Наблюдается отслоение покрытия			
	0,9	0,53 Наблюдается отслоение покрытия			
0,95	0,78	0,64	0,58	0,55	
Нитроцел- люлозная НЦ-123	0,79	0,66	0,49 Наблюдается растрескивание покрытия	-	-

1	2	3	4	5	6
	0,89	0,78	0,53 Наблюдается растрескивание покрытия		
	0,96	0,86	0,74	0,6	0,58
	0,86	0,72	0,52 Наблюдается растрескивание покрытия	-	-
	0,93	0,85	0,5 Наблюдается растрескивание покрытия	-	-
	0,98	0,91	0,76	0,64	0,5 Наблюдается растрескивание покрытия
	0,78	0,51 Наблюдается растрескивание покрытия	-	-	-
	0,84	0,74	0,52 Наблюдается растрескивание покрытия	-	-
	0,93	0,86	0,5 Наблюдается растрескивание покрытия	-	-
Вододисперсионная (фасадная)	0,83	0,66	0,65	0,63	0,58
	0,90	0,72	0,71	0,68	0,66
	0,94	0,83	0,79	0,76	0,74
	0,85	0,67	0,67	0,66	0,60
	0,90	0,74	0,73	0,70	0,69
	0,95	0,86	0,82	0,79	0,77
	0,81	0,65	0,63	0,60	0,56
	0,89	0,72	0,69	0,68	0,64
	0,92	0,78	0,76	0,73	0,71
Акрилатная, класс Универсал	0,88	0,80	0,76	0,73	0,70
	0,93	0,88	0,84	0,79	0,76
	0,95	0,93	0,89	0,86	0,82
	0,89	0,82	0,79	0,74	0,71
	0,90	0,86	0,80	0,77	0,74
	0,95	0,93	0,89	0,88	0,86
	0,86	0,79	0,73	0,70	0,68
	0,89	0,82	0,79	0,74	0,72
0,94	0,90	0,86	0,83	0,79	

Анализ данных, приведенных в табл.1, свидетельствует, что разрушение покрытия на основе краски ПФ-115 с начальным интегральным показателем качества  $Q_{no}=0,98$  не наблюдается в течение 15 циклов замораживания-оттаивания, а с начальным показателем  $Q_{no}$ , равным  $Q_{no}=0,8$  и  $Q_{no}=0,96$  (ниже установленного значения), соответственно после 5 и 15 циклов замораживания-оттаивания. В соответствии с данными, приведенными в ТЕР-62 “Малярные работы” стоимость ремонтных малярных работ составляет от 573 до 1219,54 руб. (на 100 м<sup>2</sup>) в зависимости от вида красочного состава и технологии производства малярных работ. Соответственно, покрытие с начальным значением интегрального показателя качества  $Q_{no}=0,8$  после 5 циклов замораживания-оттаивания (условно) требует дополнительных расходов на ремонт, составляющих до 1219,54 руб. на 100 м<sup>2</sup>, а покрытие с начальным  $Q_{no}=0,96$  этих расходов потребует после 15 циклов (условно).

В качестве величины, характеризующей отношение желаемого значения параметра качества (среднего) к его дисперсии, применялся показатель [9]

$$\frac{S}{N} = \frac{\bar{y}}{\sigma} \tag{4}$$

В табл. 2 приведены числовые значения показателей разброса экспериментальных данных и функции потерь.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, свидетельствует, что значение функции потерь зависит от отношения  $S/N$ , а именно для наименьшего из наблюдаемых значений функции потерь  $L(y)$  отношение  $S/N$  максимально. Так, значению отношения  $S/N = 17,01$  соответствует значение функции потерь  $L(y)=0,016k$ , а при  $S/N = 1,5$  значение функции потерь составляет  $L(y)=0,35k$ .

Значение  $S/N$  уменьшается по мере роста среднеквадратичного отклонения  $\sigma$ .

Т а б л и ц а 2

Статистические характеристики выборки

Значение показателя, $Q_{пок}$	Среднеквадратическое отклонение, $\sigma$	$\frac{S}{N} = \frac{\bar{y}}{\sigma}$	Функция потерь $L(y)$	Статус сооружения
$Q_1=0,9$ $Q_2=0,8$ $Q_3=0,85$	0,05	17,01	0,016k	Сооружения промышленного и гражданского строительства
$Q_1=0,5$ $Q_2=0,1$ $Q_3=0,30$	0,2	1,5	0,35k	Временные сооружения

Таким образом, установлена корреляционная зависимость между разбросом показателей качества и потерями, которые следует ожидать из-за этого. Из этого следует, что эксплуатационные расходы на ремонт окрашенных поверхностей могут быть снижены за счет более высокой культуры производства, предусматривающей снижение среднеквадратического отклонения.

Предлагаемый подход, предусматривающий учет функции потерь и разброс показателей качества, может быть применен при разработке процедур контроля качества отделки [10–12]. Следует отметить, что существующие в настоящее время нормативные документы, касающиеся вопросов качества отделки цементных изделий и конструкций, не содержат требований экономической целесообразности выбора заданного качества с учетом статистического контроля и управления качеством продукции. В настоящее время назрела необходимость решения этого вопроса.

Предлагаемая методология позволит более обоснованно оптимизировать отделочные составы и технологию производства отделочных работ с целью получения покрытий с комплексом заданных свойств и прогнозировать их стойкость с учетом стоимости малярных работ.

## Список литературы

1. Eşme, U. Application of Taguchi Method for the optimization of Resistance Spot welding process / U. Eşme // The Arabian journal for science and engineering. – 2009. – Vol. 34. – N. 2B.
2. Rajyalakshmi, G. Optimization of Process Parameters of Wire Electrical Discharge Machining Using Fuzzy Logic Integrated with Taguchi Method / G. Rajyalakshmi, R.P. Venkata // International Journal of Scientific Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 2. – Issue 6.
3. Bisgaard, S. Quality Engineering and Taguchi methods: A Perspective / S. Bisgaard. – University Of Winconsin Madison, 1990.
4. Rao, S. An Overview of Taguchi Method: Evolution, Concept and Interdisciplinary Applications / S. Rao, P. Samant, A. Kadampatta, R Shenoy // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2013. – Vol. 4. – Issue 10.
5. Ефимов, В.В. Методы Тагути: практика применения / В.В. Ефимов // Методы менеджмента качества. – 2005. – №6. – С. 28–35.
6. Леон, Р. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагути: пер с англ. / Р. Леон. – М.: «СЕЙФИ», 2002. – 384 с.
7. Варжапетян, А.Г. Современные инструменты менеджмента качества. Робастное проектирование / А.Г. Варжапетян. – СПб.: ГУЛИ, 2008. – 172 с.
8. Логанина В.И. Методика оценки качества внешнего вида лакокрасочных покрытий / В.И. Логанина // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – Т. 1, № 1 (15). – С. 4–7.
9. Ефимов, В.В. Потери качества и снижение вариабильности на обработанных деталях / В.В. Ефимов. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 61 с.
10. Логанина, В.И. К вопросу о регулировании технологических процессов производства бетона / В.И. Логанина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 3-4 (603-604). – С. 42–45.
11. Логанина, В.И. Статистическое управление производством строительных изделий / В.И. Логанина, Б.Б. Хрусталева, Т.В. Учаева // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 1, № 3 (61). – С. 65-67.
12. Логанина, В.И. Организация статистического приемочного контроля качества строительных изделий и конструкций / В.И. Логанина // Строительные материалы. – 2008. – № 8. – С. 98–99.

## References

1. Eşme, U. Application of Taguchi Method for the optimization of Resistance Spot welding process / U. Eşme // The Arabian journal for science and engineering. – 2009. – Vol. 34. – N. 2B.
2. Rajyalakshmi, G. Optimization of Process Parameters of Wire Electrical Discharge Machining Using Fuzzy Logic Integrated with Taguchi Method / G. Rajyalakshmi, R.P. Venkata // International Journal of Scientific Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 2. – Issue 6.
3. Bisgaard, S. Quality Engineering and Taguchi methods: A Perspective / S. Bisgaard. – University Of Winconsin Madison, 1990.
4. Rao, S. An Overview of Taguchi Method: Evolution, Concept and Interdisciplinary Applications / S. Rao, P. Samant, A. Kadampatta, R Shenoy // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2013. – Vol. 4. – Issue 10.
5. Efimov, V.V. Methods Taguchi: practice of application / V.V. Efimov // Methods of quality management. – 2005. – No. 6. – P. 28–35
6. Leon, R. Quality management. Robust design. Taguchi method: trans. from English / R. Leon. – М.: «SAFE», 2002. – 384 p.
7. Varzhapetyan, A.G. Modern quality management tools. Robust design / A.G. Varzhapetyan. – SPb.: Guli, 2008. – 172 p.

8. Loganina, V.I. Methods of assessing the quality of the appearance of paint coatings / V.I. Loganina // Technological audit and production reserves. – 2014. – Vol. 1, № 1 (15). – P. 4–7.

9. Efimov, V.V. Quality losses and reduced variability on the machined parts / V.V. Efimov. – Ulyanovsk: UISTU, 2011. – 61 p.

10. Loganina, V.I. On the issue of regulation of technological processes of concrete production/ V.I. Loganina // News of higher educational institutions. Building. – 2009. – No. 3–4 (603-604). – P. 42–45.

11. Loganina, V.I. Statistical management of construction products / V.I. Loganina, B.B. Khrustalev, T.V. Uchaev // East European Journal of Advanced Technologies. – 2013. – Vol. 1, No. 3 (61). – P. 65–67.

12. Loganina, V.I. Organization of statistical acceptance control of the quality of building products and structures/ V.I. Loganina // Construction materials. – 2008. – № 8. – P. 98–99.

УДК 69:624: 629.3

*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**Акимова Валентина Юрьевна,**  
доцент кафедры «Организация  
и безопасность движения»  
E-mail: obd@pguas.ru**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**Капунова Мария Константиновна,**  
студентка*Penza State University of Architecture  
and Construction*Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77**Akimova Valentina Yuryevna,**  
associate Professor of the department  
«Organization and safety of traffic»  
E-mail: obd@pguas.ru**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**Kapunova Maria Konstantinovna,**  
Student

## ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДОСТАВКИ СТРОИТЕЛЬНОГО ГРУЗА АВТОТРАНСПОРТОМ В КОМПАНИИ «ООО ПКФ ТЕРМОДОМ»

В.Ю. Акимова, Э.Р. Домке, С.А. Жесткова, М.К. Капунова

Приведены результаты экспериментальных исследований по доставке строительного груза на примере компании «ООО ПКФ Термодом». Выявлены недостатки в процессе доставки строительного груза. Предлагаются методы их исправления. Дана оценка эффективности предложенных решений.

*Ключевые слова: строительные объекты, доставка строительного груза, автомобильный транспорт*

## OPTIMIZATION OF THE SYSTEM OF DELIVERY CONSTRUCTION CARGO BY ROAD TRANSPORT COMPANY «PKF TERMODOM»

V.Yu. Akimova, E.R. Domke, S.A. Zhestkova, M. K. Kapunova

The results of experimental studies of the delivery of construction materials on the example of the company "LLC PKF Termodom" are given. Deficiencies in the process of delivery of construction materials are identified. Methods for solving them are proposed. An assessment of the proposed solutions effectiveness is given.

*Keywords: construction sites, delivery of construction cargo, road transport*

### Введение

Автомобильный транспорт занимает одно из ведущих мест в общей транспортной системе страны. При различном государственном устройстве, а также типе экономики, основной задачей транспорта было и остается своевременное и качественное удовлетворение потребностей как предприятий, так и организаций.

Так как на сегодняшний день возрастает объем перевозок строительных грузов, то для обеспечения наиболее рационального использования подвижного состава, сокра-

шения транспортных затрат, а также улучшения состояния окружающей среды большое значение имеет решение задачи по определению рациональных маршрутов перевозок, что, в свою очередь, подтверждает актуальность проводимых авторами исследований.

### **Постановка задачи**

В качестве объекта исследований выбрана компания «ООО ПКФ Термодом». Это одна из крупнейших компаний, работающих на рынке потребительских услуг.

Перевозка строительного груза осуществляется в основном автомобильным транспортом, так как пункты потребления груза находятся на небольших расстояниях от завода-производителя.

Экспериментальные исследования проводились на заводе, расположенном в г. Пензе. Пункты доставки устанавливаются диспетчером по заявке, поступающей от застройщиков.

Потребности застройщиков должны удовлетворяться полностью, своевременно и по приемлемой цене, для чего необходима синхронизация всех элементов перевозочного процесса.

Для перевозок кирпича и мелких блоков используются автомобили грузоподъемностью до 10 т. На АТП имеется 20 бортовых длинномеров марки МАЗ 5340В3-420-005 и 5 бортовых полуприцепов марки КамАЗ 53215.

В ходе исследований изучены виды технологических операций процесса доставки строительного груза.

В результате выполнения работы установлено, что завод обслуживает 10 строительных площадок.

Зона обслуживания работает автономно и использует свою диспетчерскую службу. Изучение их работы показало, что никаких программных средств при планировании маршрутов передвижения транспортных средств и выборе строительных объектов для пополнения кирпича и мелких блоков не используется. Логист диспетчерской службы работает по опыту «от достигнутого». Выбор строительных объектов осуществляется по заявкам о необходимости пополнения запаса строительного материала, получаемым диспетчерской службой. Распределение транспортных средств производится в начале рабочей смены.

Перевозка строительного груза на строительные объекты осуществляется помашинной отправкой в одну смену. Организовать обслуживание всех строительных площадок по маятниковой схеме передвижения транспортных средств руководству компании не удастся, так как реализация строительного груза на строительных объектах чаще всего одинакова. Главным критерием выбора пунктов обслуживания является полная загрузка транспорта.

Работа на заводе организована в одну смену. За это время водитель совершает до двух рейсов, в зависимости от дальности ездки и вида груза.

Погрузка кирпича и мелких бетонных блоков в транспортное средство в начале смены осуществляется по приоритету, устанавливаемому диспетчером.

Маршруты передвижения строительного груза могут не совпадать с кратчайшим расстоянием между пунктами транспортной сети на карте.

В результате исследований выявлены виды технологических операций в процессе развозки строительного груза (рис. 1).

В отличие от других видов грузов при перевозке кирпича время заезда занимает значительную часть общего времени на маршруте и включает ряд дополнительных операций, которые необходимо осуществить при транспортировке массового вида груза, в частности (при погрузке на заводе):

- оформление путевки;
- маневрирование;
- оформление документов и заполнение путевого листа при выезде.

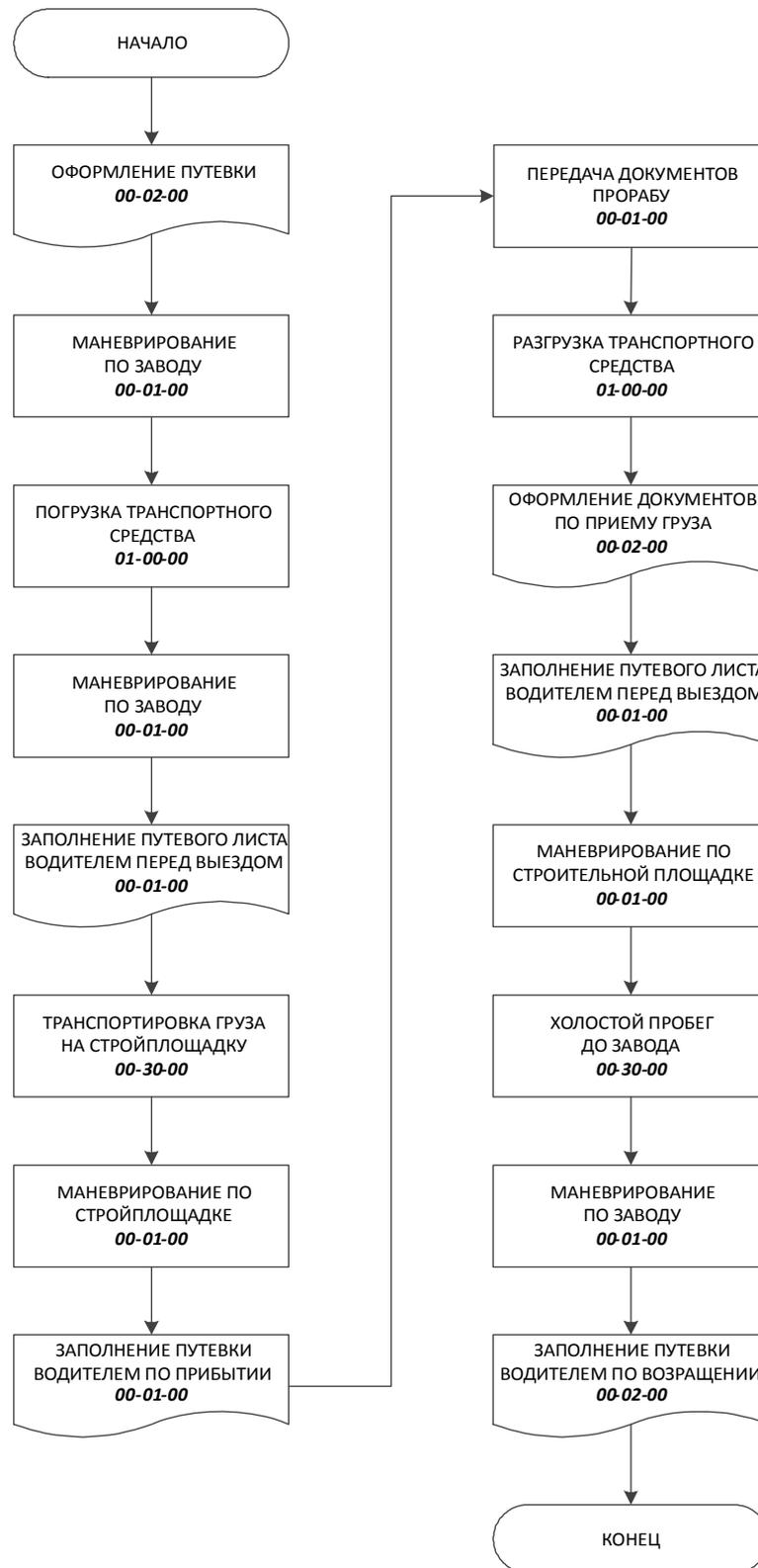


Рис. 1. Функциональная схема операций при доставке строительного груза

Таким образом, перечни технологических операций при заезде на строительную площадку и завод отличаются друг от друга. Следовательно, их необходимо учитывать отдельно.

В целом затраты времени на  $i$ -м маршруте складываются из пяти основных элементов [1–3]:

$$t_i = t_j^{\text{ДВ}} + t_j^{\text{П}} + t_j^{\text{ЗП}} + t_j^{\text{ЗР}} + t_j^{\text{Р}},$$

где  $t_j^{\text{ДВ}}$  – время движения автомобиля на маршруте;  $t_j^{\text{П}}, t_j^{\text{Р}}$  – время погрузки и разгрузки автомобиля соответственно;  $t_j^{\text{ЗП}}, t_j^{\text{ЗР}}$  – время заезда автомобиля на погрузку и разгрузку соответственно.

После прибытия на строительную площадку выполняются следующие операции, которые обозначаются одним термином – время заезда на разгрузку:

- маневрирование по строительному объекту при заезде;
- заполнение путевого листа водителем;
- передача путевого листа прорабу;
- оформление документов по приемке строительного груза;
- заполнение путевого листа при выезде со строительного объекта;
- маневрирование при выезде со строительного объекта;
- заполнение путевого листа при приезде на завод.

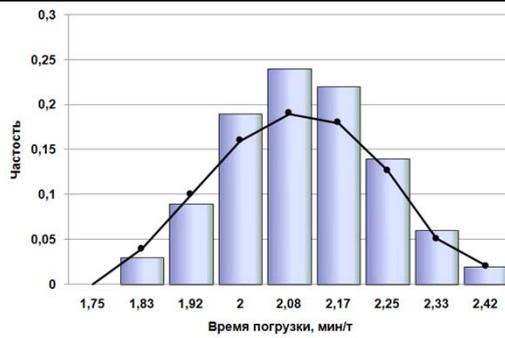
С целью определения статистических характеристик перевозочного процесса и принадлежности генеральной совокупности данных определенному закону распределения были проведены натурные исследования десяти реальных маршрутов развозки строительного груза на строительные объекты.

Статистическую обработку установленных параметров выполняли с использованием метода прямого счета. Результаты статистической обработки сравнивали с законом нормального распределения (рис. 2). Статистические характеристики рассмотренных величин приведены в табл.1. Установлено, что гистограммы распределения рассматриваемых характеристик описываются законом нормального распределения [4–6].

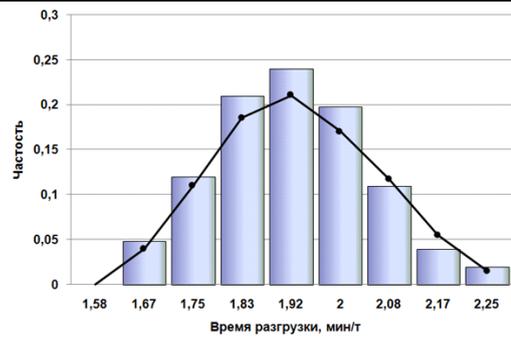
Т а б л и ц а 1

Статистические характеристики перевозочного процесса

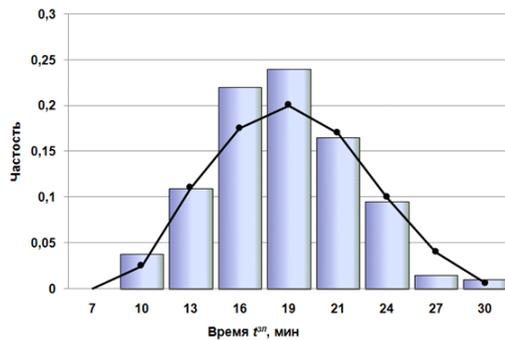
Исследуемая величина	Математическое ожидание	Среднее квадратическое отклонение	Критерий Пирсона
Время погрузки $t^{\text{П}}$ , мин/т	$M(t^{\text{П}}) = 2,034$	$\sigma(t^{\text{П}}) = 10,46$	$X^2(t^{\text{П}}) = 5,15$
Время разгрузки $t^{\text{Р}}$ , мин/т	$M(t^{\text{Р}}) = 1,83$	$\sigma(t^{\text{Р}}) = 9,58$	$X^2(t^{\text{Р}}) = 4,18$
Время заезда в пункт погрузки $t^{\text{ЗП}}$ , мин	$M(t^{\text{ЗП}}) = 18$	$\sigma(t^{\text{ЗП}}) = 12,06$	$X^2(t^{\text{ЗП}}) = 4,78$
Время заезда в пункт разгрузки $t^{\text{ЗР}}$ , мин	$M(t^{\text{ЗР}}) = 24,01$	$\sigma(t^{\text{ЗР}}) = 11,92$	$X^2(t^{\text{ЗР}}) = 3,84$
Техническая скорость вне населенного пункта $V_1$ , км/час	$M(V_1) = 59,5$	$\sigma(V_1) = 8,83$	$X^2(V_1) = 3,48$
Техническая скорость в населенном пункте $V_2$ , км/час	$M(V_2) = 39,5$	$\sigma(V_2) = 7,86$	$X^2(V_2) = 9,16$



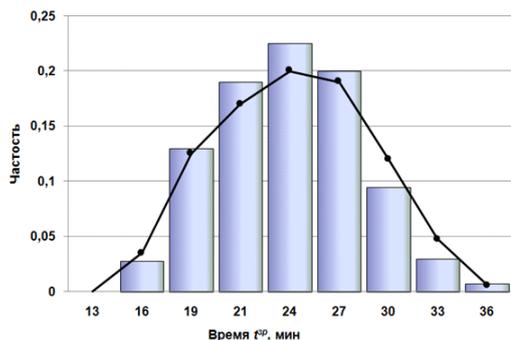
а) График распределения величины  $t^п$



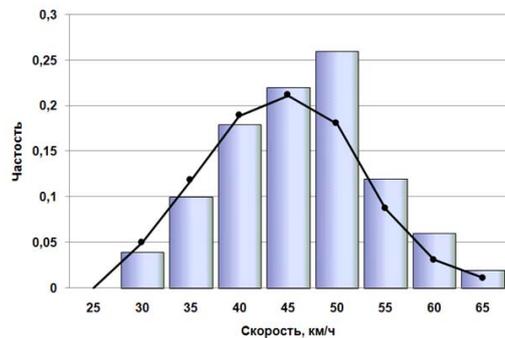
б) График распределения времени  $t^р$



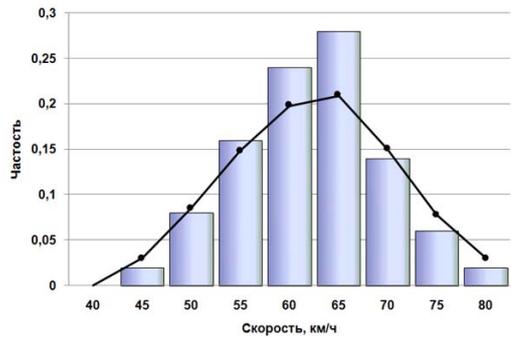
в) График распределения времени  $t^сп$



г) График распределения времени  $t^{3п}$



д) График распределения технической скорости  $V_T$  в населенном пункте



е) График распределения технической скорости  $V_T$  вне населенного пункта

Рис. 2. Сравнение гистограмм распределения с законом нормального распределения

При исследовании устанавливались:

$Q_{ij}$  – масса строительного груза, перевезенного  $i$ -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 строительного груза, доставляемого в  $j$ -м маршруте на каждый строительный объект;

$t_j^{ПРО}$  – время простоя автомобиля.

По этим исходным данным были определены:

1. Транспортная работа, выполненная на  $j$ -м маршруте:

$$P_{ij} = \sum_1^n M_{\xi_j} l_{\xi_j}^{\Gamma E}, \text{ т} \cdot \text{км}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество грузовых звеньев на  $j$ -м маршруте;  $l_{\xi_j}^{\Gamma E}$  – длина грузового звена за езду;  $M_{\xi_j}$  – масса строительного груза в на  $i$ -м грузовом звене  $j$ -го маршрута.

2. Выработка  $i$ -го автомобиля на  $j$ -м маршруте:

а) 
$$U_{ij} = Q_{ij} / t_{ij}, \text{ т/час}; \quad (2)$$

б) 
$$W_{ij} = P_{ij} / t_{ij}, \text{ т} \cdot \text{км/час}. \quad (3)$$

3. Коэффициент грузового пробега на  $j$ -м маршруте:

$$\beta = \sum l_{\xi_j}^{\Gamma E} / l_j. \quad (4)$$

Были исследованы маршруты доставки строительного груза до строительных объектов. За основу взята работа одной смены грузового транспорта. В основу планирования задания положен принцип того, чтобы статистический коэффициент грузоподъёмности транспортного средства был близок к единице. Было выявлено, что развозка осуществляется по 10 маршрутам на 10 строительных объектов (рис. 3).

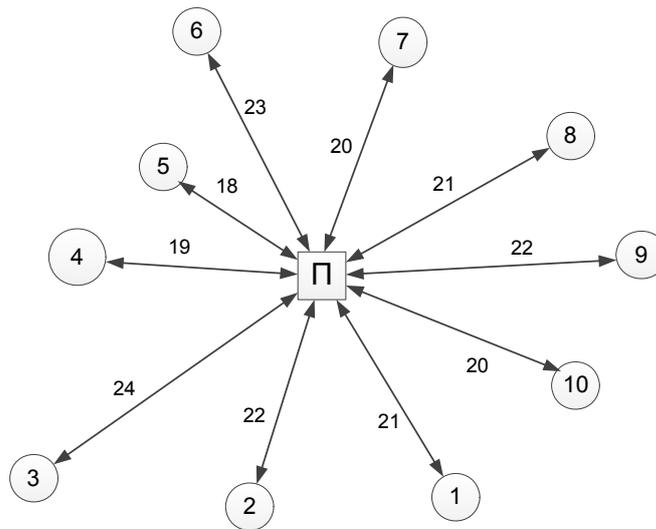


Рис. 3. Существующая схема развозки строительного груза на строительные объекты с завода

В табл. 2 представлены существующие показатели транспортного процесса.

В результате проведенных исследований установлено:

- планирование развозки строительного груза на строительные объекты с завода осуществляется на основе интуиции;
- завод работают автономно, обслуживая строительные объекты своей зоны;
- развозка строительного груза осуществляется по маятниковым маршрутам;
- развозка строительного груза за смену полностью не удовлетворяет потребность строительных объектов.

Технико-эксплуатационные показатели работы одной смены завода  
«ООО ПКФ Термодом»

№ партии	№ маршрута	№ строительного объекта	$q, \text{т}$	$Q, \text{т}$	$l, \text{км}$	$t, \text{ч}$	$\bar{l}, \text{км}$	$\bar{l}^e, \text{км}$	$\beta$	$P, \text{т} \cdot \text{км}$	$U, \text{т/ч}$	$W, \text{ткм/ч}$
1	1	1	5	10	41	2,16	21	21	0,5	210	4,6	97,22
			5									
	2	2	10	10	44	2,19	22	22	0,5	220	4,5	101,8
2	3	3	5	10	48	2,20	24	24	0,5	240	4,5	109
			5									
	4	4	10	10	38	2,10	19	19	0,5	190	4,7	90,4
3	5	5	5	10	26	2	18	18	0,5	180	5	90
			5									
	6	6	5	10	46	2,15	23	23	0,5	230	4,6	107
			5									
4	7	7	10	10	40	2,20	20	20	0,5	200	4,5	91
	8	8	5	10	41	2,16	21	21	0,5	210	4,6	97,22
			5									
5	9	9	5	10	44	2,19	22	22	0,5	220	4,5	101,8
	10	10	10	10	40	2,16	20	20	0,5	200	4,6	93
Итого				100	368	21,42	210	210	0,5	2100	4,6	98

### Усовершенствованный метод развозки строительного груза

Для повышения эффективности развозки строительного груза была разработана кольцевая схема (рис.5). В табл. 2 приведены показатели, полученные в результате натурных исследований по существующей схеме развозки строительного груза. Для решения задачи маршрутизации транспорта (ЗМТ) при КСРСГ (кольцевая схема развозки строительного груза) использовали метод линейного программирования «Фиктивные узлы и ветви» ФУВ [7–10].

Алгоритм метода фиктивных узлов и ветвей можно представить следующим образом:

1. Составляется исходная матрица весов – расстояний, стоимостей или времени – между пунктами исследуемой транспортной сети .

2. Формируется фиктивный транспортный граф путем дополнительного введения в транспортную сеть дублирующих узлов.

3. Составляется фиктивная матрица расстояний  $L^{\Phi}$ .

4. Затем в каждой строке исходной матрицы находится минимальный элемент  $h_i$ , который вычитается из всех остальных элементов  $a_{ij}$ , расположенных в рассматриваемой строке:

$$a'_{ij} = a_{ij-h_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (5)$$

5. Составляется новая матрица. В полученной матрице находится минимальный элемент в каждом столбце  $h_j$ , который вычитается из всех остальных элементов  $a'_{ij}$ , расположенных в рассматриваемом столбце:

$$a''_{ij} = a'_{ij} - h_j, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (6)$$

6. Из приведенной матрицы удаляются строки и столбцы с номерами узлов, в которые входят и из которых выходят радиальные маршруты соответственно.

7. Вычисляется новая приведенная матрица  $L_j^{np}$ .

8. На основе полученной матрицы составляется оценочная матрица  $L_i^o$ . Для этого устанавливается оценка каждого элемента с  $a_{ij}''$  по формуле

$$A = \min a_{ik}'' + \min a_{sj}'' , \quad (7)$$

где  $a_{ik}''$ ,  $a_{sj}''$  – наименьшие элементы соответственно в строке  $i$  и столбце  $j$ ;  $k \neq j$ ,  $s \neq i$ ,  $k, s = 1, 2, 3, \dots, n$ .

9. Создается матрица  $L_i$  путем вычеркивания ячейки  $k-s$  с максимальной оценкой:

$$A_{ks=\max A_{ij}} ; i, j = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (8)$$

10. Блокируется ячейка на пересечении строки  $s$  и столбца  $k$ , а также ветвь, ведущая к заикливаю цепи со звеном  $k-s$ .

11. Операции по пунктам 5–7 выполняются до тех пор, пока последняя вычеркиваемая ветвь станет очевидной.

12. Оптимальная связующая ветвь определяется путем сравнения всех возможных вариантов по наименьшей длине маршрута.

На основе данного алгоритма была разработана блок-схема компьютерной программы, позволяющая находить оптимальные маршруты движения на заданной сети (рис. 4).

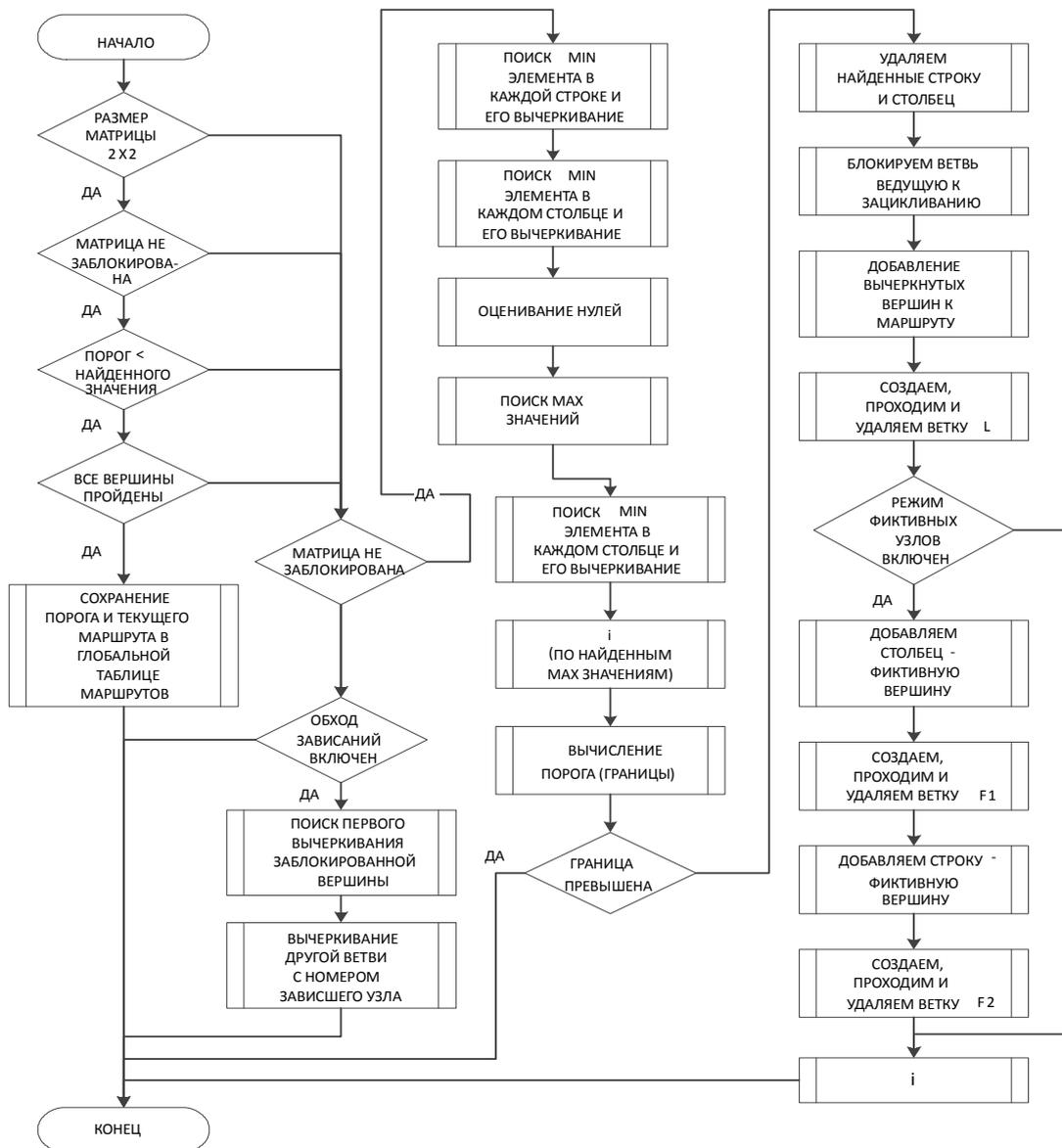


Рис. 4. Функциональная блок-схема программы

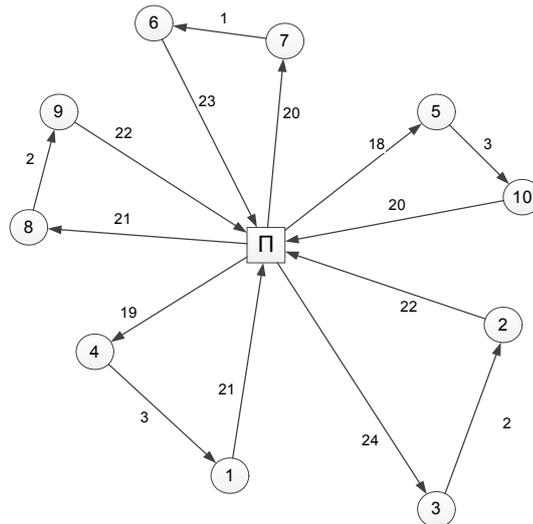


Рис. 5. Предлагаемая схема развозки строительного груза

Если в процессе расчета получается несколько маршрутов, имеющих одинаковое минимальное значение целевой функции, то она выбирает оптимальный маршрут с наименьшей транспортной работой.

Сравнение показателей, приведенных в табл.2 и 3, позволяет сделать следующие выводы:

- общая длина маршрутов сокращается соответственно на 40 %;
- увеличивается транспортная работа на 4,9 %;
- увеличивается выработка (т/ч) на 46 %;
- увеличиваете выработка (т·км /ч) на 50 %.

Т а б л и ц а 3

Расчетные показатели сменной работы компании при КСРСГ на строительные объекты

№ партии	№ маршрута	№ строительного объекта	$q, т$	$Q, т$	$l, км$	$t, ч$	$l^*, км$	$l^{*c}, км$	$\beta$	$P, т \cdot км$	$U, т/ч$	$W, ткм/ч$
1	2	2	10	20	47	2,55	24	23	0,48	450	8,16	183
	3	3	10									
2	6	6	10	20	44	2,35	20	24	0,54	470	8,7	204
	7	7	10									
3	8	8	10	20	44	2,40	22	22	0,5	430	8,7	187
	9	9	10									
4	1	1	10	20	43	2,35	19	24	0,58	450	9	205
	4	4	10									
5	5	5	10	20	43	2,35	20	23	0,53	410	8,7	186
	10	10	10									
Итого				100	221	11,58	105	116	0,5	2210	8,73	193

Для удовлетворения потребности строительных объектов и снижения себестоимости перевозимого груза авторами также был проведен стоимостной анализ по совершенствованию подвижного состава компании «ООО ПКФ Термодом».

По результатам анализа экономических показателей (табл. 4–8) было предложено заменить существующие транспортные средства МАЗ грузоподъемностью 10 т на транспортные средства КамАЗ грузоподъемностью 20 т.

Т а б л и ц а 4

## Расчет фонда заработной платы водителей

Марка автомобиля	Длинномер МАЗ	Бортовой КамАЗ
Объем перевозок, т	10674	15275
Грузооборот, ткм	51870	172900
Автомобиле-часы работы, авт-час	2482	2482
Часовая тарифная ставка водителя 1 класса, руб.	80	80
Надбавка за классность, руб.	49640	49640
Тарифный фонд заработной платы, руб.	198560	198560
Премия, руб.	79424	79424
Фонд основной заработной платы, руб.	476867	476867
Фонд дополнительной заработной платы, руб.	81067	81067
Общий фонд заработной платы, руб.	641625	641625
Среднемесячная заработная плата, руб.	26734	26734

Т а б л и ц а 5

## Расчет потребности и затрат на топливо для подвижного состава

Марка автомобиля	Длинномер МАЗ	Бортовой КамАЗ
Годовой пробег автомобилей, км	47189	48237
Грузооборот, ткм	51870	172900
Количество ездов, ед.	2247	993
Норма расхода топлива на 100 км пробега, л	28	32
на 100 ткм, л	36,5	1,3
Суммарный расход топлива на пробег и транспортную работу, л	16388	19509
Расход топлива на внутригаражные нужды, л	287	192
Затраты на топливо, руб.	721072	858396
Транспортно-заготовительные расходы, %	101036	59151
Общая стоимость годового расхода топлива, руб.	822108	917547

Т а б л и ц а 6

## Общехозяйственный расходы

Марка автомобиля	Длинномер МАЗ	Бортовой КамАЗ
Стоимость транспортного налога, руб.	15000	24000
Затраты на страхование гражданской ответственности, руб.	7100	4600
Технический осмотр, руб. (за 1 год)	1500	1500
Аренда помещения, руб.	750000	840000
Содержание административно-управленческого персонала, руб.	28873	28873
Сумма затрат по статьям, руб.	798530	807503
Накладные расходы, руб.	119025	132752
Всего	917555	940255

Т а б л и ц а 7

## Калькуляция себестоимости перевозок

Марка автомобиля	Себестоимость перевозок, р.	
	Длинномер МАЗ	Бортовой КамАЗ
Наименование статей	Всего затрат	Всего затрат
1. Расходы на оплату труда водителей	641625	641625
2. Отчисления на соц. нужды	196979	196979
3. Топливо для подвижного состава	721072	858396
4. Смазочные и эксплуатационные материалы	118038	140403
5. Затраты на ТО и ТР	49454	50552
6. Восстановление и ремонт шин	33221	50939
7. Амортизация подвижного состава	258004	237749
8. Общехозяйственные расходы	798530	807503
Всего затрат:	2816923	2984146

Т а б л и ц а 8

## Расчет балансовой стоимости подвижного состава

Марка автомобиля	Длинномер МАЗ	Бортовой КамАЗ
Количество автомобилей, ед.	1	1
Стоимость автомобиля на момент покупки, руб.	1120830	1010400
Стоимость нового автомобиля, руб.	2733731	2464390
Физический износ автомобиля на момент покупки, %	59	59
Фактический возраст, лет	4	4
Фактический пробег, км/1000	280	280
З <sub>год</sub> , руб.	2816923	2984146

**Выводы**

- Разработаны алгоритм и компьютерная программа, позволяющие определять оптимальные маршруты доставки строительного груза на строительные объекты компании «ООО ПКФ Термодом».
- Установлено, что в результате применения предложенных решений общий пробег автомобилей сокращается на 40 %, увеличивается транспортная работа на 4,9 %.
- Проведен стоимостной анализ с целью совершенствования подвижного состава компании «ООО ПКФ Термодом», который позволит снизить себестоимость перевозок после внедрения новой техники и удовлетворить потребность строительных объектов, что говорит о рациональной оптимизации подвижного состава.

**Список литературы**

1. Агуреев, И.Е. Нелинейная динамика в теории автомобильных транспортных систем / И.Е. Агуреев // Автомобильный транспорт. – 2006. – №9. – С.3–13.
2. Вельможин, А.В. Теория организации и управления автомобильными перевозками: логистический аспект формирования перевозочных процессов: монография / А.В. Вельможин, В.А. Гудков, Л.Б. Миротин. – Волгоград: ГТУ, 2001. – 172 с.
3. Домке, Э.Р. Совершенствование организации перевозочного процесса грузов автомобилями: монография / Э.Р. Домке, С.А. Жесткова. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 120 с.
4. Корчагин, В.А. Кластерный анализ на автомобильном транспорте / В.А. Корчагин // Вестник МАНЭБ. – 1997. – №6. – С. 4–12.

5. Криницкий, Е. Транспорт и логистические технологии XXI века / Е. Криницкий // Автомобильный транспорт. – 2001. – №5 – С. 10–12.
6. Меламед, И.И. Задача коммивояжера. Приближенный алгоритм / И.И. Меламед, С.И. Сергеев, С.И. Сигал // Автоматика и телемеханика. – 1989. – №11. – С.3–26.
7. Николин, В.И. Научные основы совершенствования теории грузовых автомобильных перевозок: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.10 / И.В. Николин. – М., 2000. – 37 с.
8. Подшивалов, С.Ф. Задача маршрутизации интегрированной системы развозки грузов / С.Ф. Подшивалов // Проблема качества и эксплуатации автотранспортных средств: материалы VII Международной научно-технической конференции, 07-09 апреля 2012 г. Пенза. – Пенза, 2012. – С. 112–115.
9. Пожидаев, М.С. Сбалансированная эвристика для решения задачи маршрутизации транспорта с грузоподъемности / М.С. Пожидаев, Ю.Л. Костюк // Вестник ГТУ. – 2010. – № 3. – С. 56–60.
10. Литл, Дж. Алгоритм для решения задачи обеспечивающие о коммивояжере / Дж. Литл, К. Мурти // Экономика и математические методы. – 1965. – Т.1. – Вн.1. – С. 94–107.

### References

1. Agureev, I.E. Nonlinear dynamics in the theory of automobile transport systems / I.E. Agureev // Automobile transport. – 2006. – №9. – P.3–13.
2. Velmozhin, A.V. Theory of organization and management of road transport: the logistic aspect of the formation of transportation processes: monograph / A.V. Velmozhin, V.A. Gudkov, L.B. Mirotin – Volgograd: GTU, 2001. – 172 p.
3. Domke, E.R. Improving the organization of the transportation process of goods by cars: monograph / E.R. Domke, S.A. Zhestkova. – Penza: PGUAS, 2013. – 120 p.
4. Korchagin, V.A. Cluster analysis on road transport / V.A. Korchagin // Bulletin MANEB. – 1997. – №6. – P. 4–12.
5. Krinitsky, E. Transport and logistics technologies of the XXI century / E. Krinitsky // Automobile Transport. – 2001. – No. 5. – P. 10–12.
6. Melamed, I.I. Traveling salesman task. Approximate algorithm / I.I. Melamed, S.I. Sergeev, S.I. Sigal // Automatics and Telemechanics. – 1989. – №11. – P.3–26.
7. Nikolin, V.I. The scientific basis for the improvement of the theory of road freight transport: author. dis. ... Dr. Techn. Sciences: 05.22.10 / I.V. Nikolin. – M., 2000. – 37 p.
8. Podshivalov, S.F. The task of routing the integrated system of cargo delivery / S.F. Podshivalov // The Problem of the Quality and Operation of Motor Vehicles: Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference, April 07-09, 2012 Penza. – Penza, 2012. – P. 112–115.
9. Pozhidaev, M.S. Balanced heuristics for solving the problem of transport routing with a lifting capacity / M.S. Pozhidaev, Yu.L. Kostyuk // Bulletin of the GTU. – 2010. – No. 3. – P. 56–60.
10. Little, J. Algorithm affect the distribution of the solution, providing the task of providing a traveling salesman associated / J. Little, K. Murthy // The economy is accompanied by mathematical and final methods. – 1965. – Vol.1. – Vn.1. – P.94–107.

УДК 666.972.7

*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**Алимов Марат Фатихович,**  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: marat\_alimov.91@mai.ru**Селяев Павел Владимирович,**  
кандидат технических наук, доцент  
E-mail: ntorm80@mail.ru**Шабаяев Ильшат Наилевич,**  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: ilshatshabaev@yandex.ru*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**Alimov Marat Fatihovich,**  
Postgraduate of the department «Building  
structures»  
E-mail: marat\_alimov.91@mai.ru**Selyaev Pavel Vladimirovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
E-mail: ntorm80@mail.ru**Shabayev Ilshat Nailevich,**  
Postgraduate of the department «Building  
structures»  
E-mail: ilshatshabaev@yandex.ru

## ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА ПРИ СЖАТИИ\*

В.П. Селяев, М.Ф. Алимов, П. В. Селяев, И. Н. Шабаяев

Изложены результаты анализа диаграмм деформирования бетона при сжатии, которые получены при скорости нагружения 0,5 мм/мин и с частотой измерения деформаций 0,1 с. Дифференцированным анализом диаграмм деформирования бетонов класса В20-В30 и высокопрочного В80-В100 выявлен дискретно-непрерывный характер разрушения бетонных образцов при сжатии. Предложены основные принципы формирования фрактальной модели, представляющей структуру бетона в виде сложной, иерархически организованной масштабно-инвариантной системы, которая на каждом масштабном уровне подобна целому.

*Ключевые слова: высокопрочный бетон, рядовой бетон, амплитуда сброса нагрузки, частота отказов структурных элементов, диаграмма «σ-ε»*

## A DIFFERENTIATED ANALYSIS OF DIAGRAMS OF CONCRETE DEFORMATION UNDER COMPRESSION

V.P.Selyaev, M.F. Alimov, V.P.Selyaev, I.N. Shabayev

The results of analysis of the concrete deformation diagrams under compression, which were obtained at a loading rate of 0.5 mm / min and at measurement frequency of deformations of 0.1 s, are presented. A differentiated analysis of deformation patterns of concrete class B20-B30 and high-strength B80-B100 revealed the discrete-continuous nature of destruction of concrete specimens under compression. The basic principles of a fractal model formation representing the structure of concrete in the form of a complex hierarchically organized scale-invariant system, which is similar to the whole model at each scale level, are proposed.

*Keywords: high strength concrete, ordinary concrete, the amplitude of load shedding, the frequency of failures of structural elements, the diagram «σ-ε»*

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №18-48-130001/18).

Разрушение бетона – это процесс, который начинается с микроразрушений в структуре материала [1–5]. По мере роста деформаций микроразрушения развиваются, что приводит к потере несущей способности конструкции. Рейниус Е. предлагает рассматривать бетон как сложную, статически неопределимую пространственную решетчатую систему, в которой под действием нагрузки постепенно разрушаются связи между узлами решетки [1]. Разрушение описывается как процесс накопления поврежденных элементов.

Развитие процессов разрушения наглядно отражается на диаграммах деформирования при сжатии или растяжении.

Берг О.Я. [1], анализируя диаграмму сжатия бетона, представленную гладкой линией, обращает внимание на компоненты полной величины деформации, среди которых выделяет упругие  $\varepsilon^I$ , ползучести  $\varepsilon^{II}$ , пластические 2-го рода  $\varepsilon^{III}$  (выше границы  $R_T^0$ ), псевдопластические  $\varepsilon^{IV}$  (выше границы  $R_T^v$ ) деформации. Также О.Я. Берг отмечает важную особенность диаграммы сжатия, которая заключается в том, что при первом приложении нагрузки на образец, который до этого не нагружался, обнаруживается существенная остаточная деформация  $\varepsilon_0$ , характеризующаяся низкими величинами модуля деформации. Методика анализа диаграмм деформирования, представленная О.Я. Бергом, базируется на оценке интегральных характеристик и дает возможность определить параметрические точки, которые соответствуют переходу структуры материала из одного состояния в другое. Современная испытательная техника позволяет рассматривать процесс разрушения как дискретно-непрерывный, формирующийся из отдельных актов локального (позлементного) разрушения структуры.

Современные испытательные машины в процессе нагружения с использованием программно-аппаратного комплекса Wille Geotechnik R (модель 13-PD/401) способны производить сбор и обработку данных с большой точностью и частотой сбора, что дает возможность дифференцировать (разделять) процесс разрушения, выявлять многообразие и различие форм разрушения на различных этапах деформирования [2, 3, 5].

В настоящей работе предлагается методика дифференцированного анализа особенностей процессов деформирования и разрушения бетонов класса В20-В30 и высокопрочного – В80-В100.

Дифференцированный анализ произведен по результатам испытания на сжатие образцов цилиндрической формы  $\varnothing 70$  мм, высотой 140 мм с постоянной скоростью нагружения  $v=0,5$  мм/мин и с частотой сбора данных 0,1 с. Общий вид образцов до и после нагружения представлен на рис. 1. В результате испытаний получаем большой численный массив, который затем обрабатывается в инженерной программе Autodesk с использованием графического масштабного коэффициента.

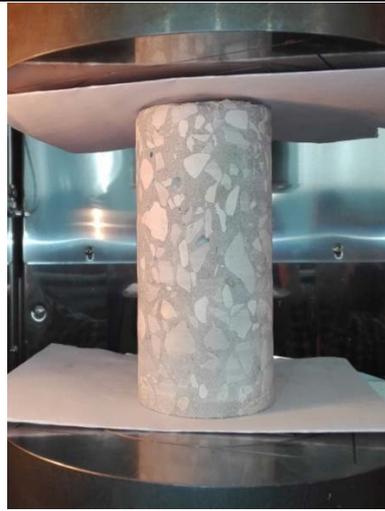
На рис. 2-3 приведены диаграммы деформирования бетонов классов В30 и В100, из которых видно, что процесс нагружения сопровождается дискретными актами разрушения. Диаграмма деформирования является фрактальной линией, у которой нет гладких отрезков больших масштабов. В ней представлены микромасштабные дискретные диаграммы деформирования, вероятно соответствующие разрушению структурного элемента.

Длина диаграмм деформирования

$$L = L_0 \alpha^{1-D},$$

где  $L_0$  – расстояние между концами линии по прямой;  $\alpha$  – длина звена (масштаб измерения) ломаной линии;  $D$  – фрактальная размерность.

Анализируя диаграмму в ПК Autodesk, с применением масштабного коэффициента определяли: амплитуды скачкообразного изменения уровня нагрузки на различных участках диаграммы деформирования ( $A$ , кН); частоту отказов ( $n$ ) локальных разрушений структурных элементов; фрактальную размерность  $D$ . Результаты анализа приведены в табл. 1, 2.



1a



2a



2a



2б

Рис. 1. Испытываемые образцы до (1а, 2а) и после (1б, 2б) нагружения

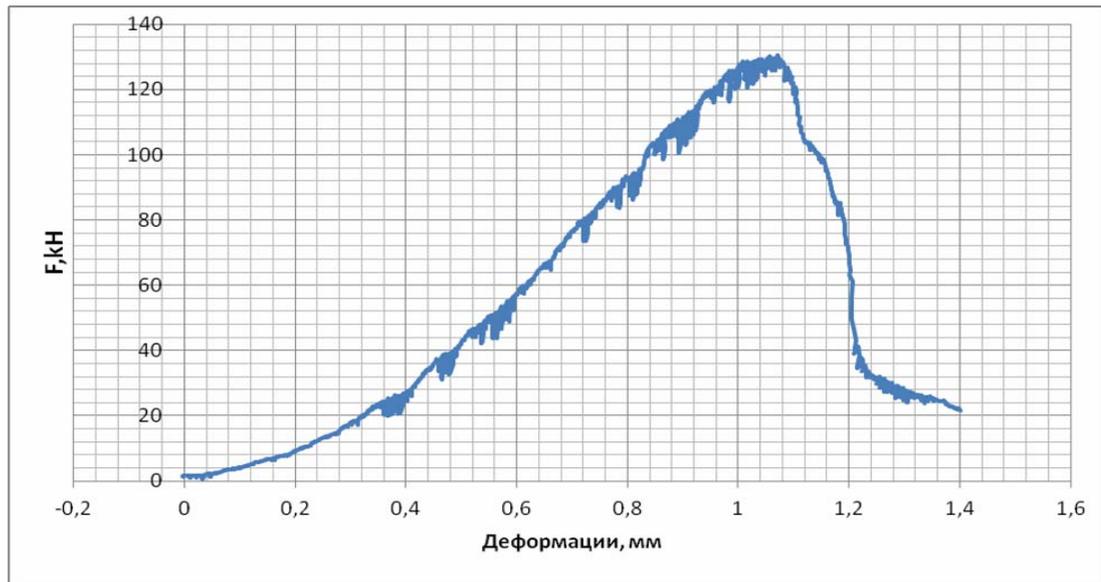


Рис. 2. Диаграмма деформирования образца из бетона класса В20-В30

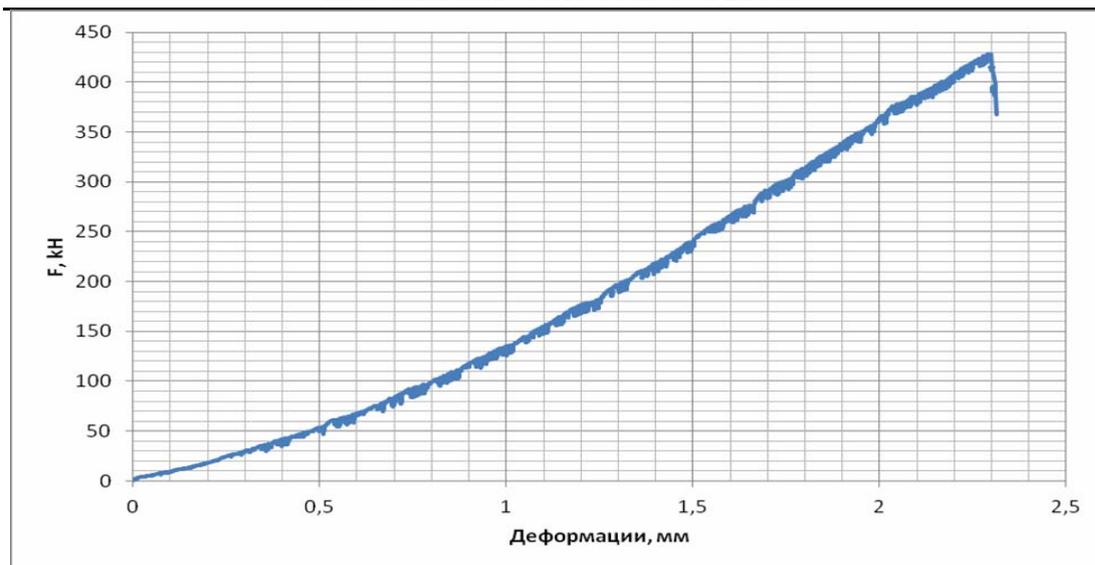


Рис. 3. Диаграмма деформирования для образца из бетона класса В80-В100

Т а б л и ц а 1

Результаты анализа развернутых диаграмм деформирования

$\delta, \text{мм}$	<i>n</i> -кол-во вспл.	<i>A</i> , кН	$\Delta P_u$ , кН	$\frac{\Delta P_u}{P_u}$
0.0-0.05	4	0.57-0.91	0.0-2.13	0.016
0.05-0.10	3	0.15-0.19	2.13-4.07	0.031
0.10-0.15	3	0.23	4.07-6.68	0.051
0.15-0.20	5	0.5-0.7	6.68-9.18	0.070
0.20-0.25	5	0.3	9.18-13.34	0.102
0.25-0.30	10	0.39-0.67	13.34-17.75	0.136
0.30-0.35	10	0.77-1.6	17.75-23.31	0.178
0.35-0.40	8	4.12-6.23	23.31-27.0	0.207
0.40-0.45	4	0.72-1.90	27.0-35.86	0.275
0.45-0.50	6	3.26-7.34	35.86-41.76	0.320
0.50-0.55	7	2.40-7.16	41.76-50.31	0.386
0.55-0.60	7	2.26-9.71	50.31-57.26	0.439
0.60-0.65	7	0.87-2.36	57.26-66.21	0.507
0.65-0.70	8	1.02-2.85	66.21-76.55	0.587
0.70-0.75	10	1.2-7.34	76.55-84.57	0.649
0.75-0.80	10	1.17-9.08	84.57-93.02	0.713
0.80-0.85	7	1.51-8.25	93.02-103.69	0.795
0.85-0.90	8	3.57-11.31	103.69-111.65	0.856
0.90-0.95	9	1.53-9.31	111.65-119.74	0.918
0.95-1.00	10	1.39-9.5	119.74-127.00	0.974
1.00-1.05	10	1.55-8.22	127.00-129.00	0.989
1.05-1.10	10	2.51-4.48	129.00-130.387	1.0
1.10-1.15	Ниспадающая ветвь			
1.15-1.20				
1.20-1.25				
1.25-1.30				
1.30-1.35				
1.35-1.40				

Примечание: *n* – количество квантов разрушения на отрезке  $\Delta = 0,05 \text{ мм}$ ; *A* – амплитуда всплеска, кН;  $\delta$  – абсолютная деформация, мм (В20-В30).

## Результаты физического анализа развернутых диаграмм деформирования

$\delta$ , мм	$n$ -кол-во вспл.	$A$ , кН	$\Delta P_u$ , кН	$\frac{\Delta P_u}{P_u}$
0.0-0.05	7	0.23-1.14	0.0-5.65	0.013
0.05-0.10	10	0.31-1.27	5.65-9.40	0.022
0.10-0.15	12	0.18-0.79	9.40-13.6	0.031
0.15-0.20	12	0.21-1.13	13.62-18.1	0.042
0.20-0.25	12	0.21-0.46	18.1-24.72	0.057
0.25-0.30	11	0.28-2.55	24.72-29.52	0.068
0.30-0.35	11	0.37-4.26	29.52-35.72	0.083
0.35-0.40	9	0.99-7.42	35.72-41.78	0.097
0.40-0.45	10	0.96-6.80	41.78-47.17	0.110
0.45-0.50	13	0.65-3.77	47.17-53.15	0.124
0.50-0.55	6	0.37-8.24	53.15-61.71	0.144
0.55-0.60	9	2.68-8.16	61.71-67.54	0.157
0.60-0.65	12	0.57-2.60	67.54-75.04	0.175
0.65-0.70	10	1.19-8.99	75.04-83.40	0.195
0.70-0.75	9	1.23-10.11	83.40-93.52	0.218
0.75-0.80	9	3.89-9.34	93.52-99.51	0.232
0.80-0.85	8	1.5-9.35	99.51-107.88	0.252
0.85-0.90	10	1.54-8.84	107.88-117.42	0.274
0.90-0.95	10	0.79-10.39	117.42-126.38	0.295
0.95-1.00	10	3.5-9.35	126.38-134.75	0.314
1.00-1.05	9	1.39-10.23	134.75-144.70	0.337
1.05-1.10	9	2.98-8.88	144.70-154.27	0.360
1.10-1.15	10	1.53-8.28	154.27-164.90	0.385
1.15-1.20	9	4.93-8.95	164.90-176.60	0.412
1.20-1.25	12	1.85-10.59	176.60-183.50	0.428
1.25-1.30	12	1.04-7.92	183.50-196.37	0.458
1.30-1.35	12	1.23-9.51	196.37-208.12	0.486
1.35-1.40	13	0.48-11.30	208.12-218.21	0.509
1.40-1.45	12	1.89-9.50	218.21-229.10	0.535
1.45-1.50	10	2.25-10.30	229.10-240.87	0.562
1.50-1.55	12	0.71-5.97	240.87-255.64	0.597
1.55-1.60	12	2.07-10.19	255.64-265.19	0.619
1.60-1.65	12	3.32-9.94	265.19-275.99	0.644
1.65-1.70	9	0.45-10.28	275.99-290.71	0.679
1.70-1.75	10	2.65-11.95	290.71-300.76	0.702
1.75-1.80	11	1.97-10.28	300.76-313.76	0.732
1.80-1.85	11	1.76-11.63	313.76-327.01	0.763
1.85-1.90	11	4.28-10.03	327.01-337.80	0.788
1.90-1.95	12	1.88-11.40	337.80-349.41	0.815
1.95-2.00	13	1.25-8.57	349.41-363.64	0.849
2.00-2.05	12	0.75-10.99	363.64-376.91	0.880
2.05-2.1	11	2.76-9.12	376.91-385.65	0.900
2.1-2.15	11	2.80-8.57	385.65-396.80	0.926
2.15-2.20	12	5.15-9.70	396.80-406.72	0.949
2.20-2.25	12	3.10-9.68	406.72-419.67	0.979
2.25-2.30	12	1.95-9.46	419.67-428.298	1.0
2.30-2.314				

П р и м е ч а н и е :  $n$  – количество квантов разрушения на отрезке  $\Delta = 0,05$  мм ;  
 $A$  – амплитуда всплеска, кН;  $\delta$  – абсолютная деформация, мм (В80-В100).

Изменение значений амплитуды и количества отказов для обоих образцов фиксировалось на отрезках диаграмм деформирования с шагом 0,05 мм. Для бетонного образца класса В20-В30 на начальном участке от 0 до 0,25 мм происходит уплотнение структуры, разрушаются слабые образования. Частота отказов на данном участке равна 3-5, нагрузка возрастает до 0,7 кН. Затем количество отказов увеличивается до 10, а амплитуда возрастает до 11,3 кН. Для образца класса В80-В100 с начального момента приложения нагрузки и практически на всем участке деформирования до разрушения количество отказов практически одинаково и равно 10-12. Значение амплитуды с ростом деформаций увеличивается до 12,1 кН (рис. 5-7).

Анализ диаграмм деформирования, полученных при испытании образцов из рядового и высокопрочного бетона классов В20-В30, В80-В100, подтверждает выводы о том, что диаграмма "σ – ε" качественно отражает процессы, происходящие в структуре бетона под действием сжимающих нагрузок. На первом этапе развивается процесс уплотнения структуры за счет разрушения наиболее слабых (рыхлых) структурных элементов. На втором этапе происходит уплотнение структуры, которое сопровождается уменьшением ширины раскрытия трещин. На третьем этапе зарождаются очаги локального разрушения, которые по мере роста нагрузки накапливаются, объединяются, самоорганизуются, разрушают структуру. Создаются условия для начала развития магистральной трещины. На четвертом этапе развивается магистральная трещина, но как следует из анализа ниспадающей ветви диаграммы деформирования, в структуре материала до полного разрушения сохраняются структурные элементы, способные воспринимать нагрузку.

Анализируя графики 4 и 5, можно сделать вывод о том, что интенсивность дискретно-непрерывного процесса разрушения возрастает по мере увеличения нагрузки. Она минимальна на первых двух этапах и достаточно стабильна на 3-м и 4-м этапах. Судя по изменению амплитуды колебаний нагрузки, на первых двух этапах разрушаются наиболее слабые элементы.

Разрушение высокопрочных бетонов отличается: стабильностью частоты отказов на всех этапах нагружения; незначительным количеством «слабых» (низкопрочных) элементов; высокой однородностью по прочности структурных элементов. Именно поэтому на диаграмме деформирования нет ниспадающей ветви. Разрушение высокопрочных бетонов происходит мгновенно, так как в структурных элементах практически одновременно напряжения достигают предельных значений.

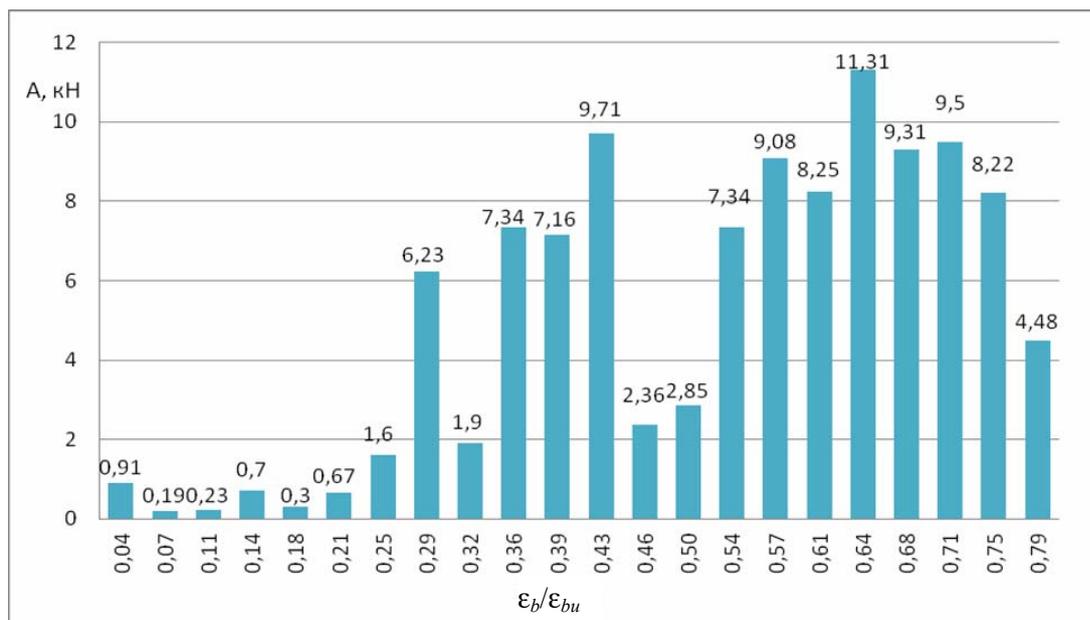


Рис. 4. Изменение амплитуды сбросов нагрузки на кривой деформирования образца из бетона класса В20-В30



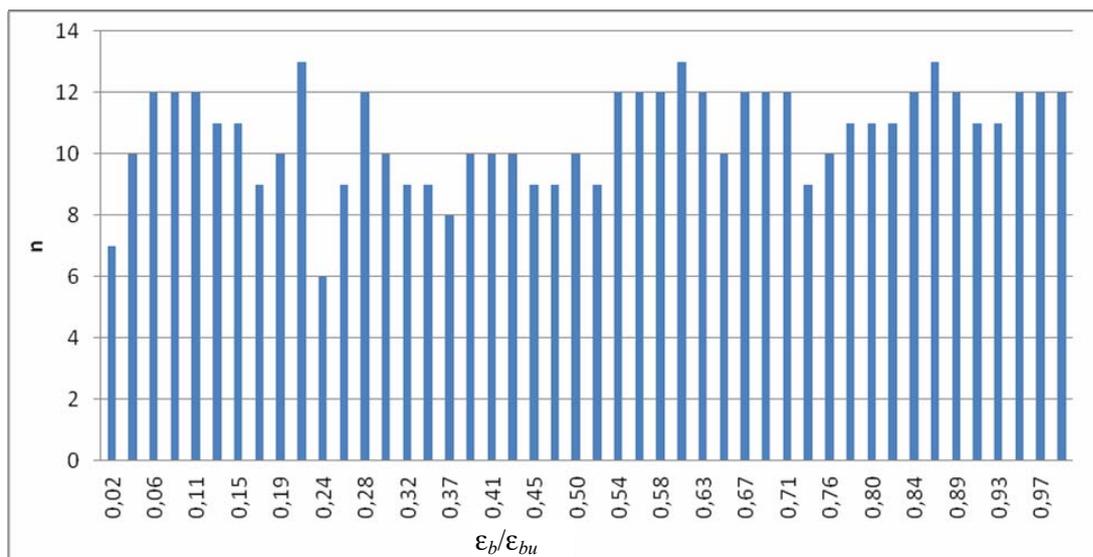


Рис. 7. Частота отказов структурных элементов с ростом деформаций образца из бетона класса В80-В100

На диаграммах деформирования каждый импульс можно рассматривать как единичный акт разрушения структурного элемента. Разрушение одного элемента не приводит к разрушению всего объема материала. Следовательно, классические модели и теории прочности, в которых материал рассматривается как сплошная среда, не работают. Поэтому в современных моделях материал (твердое тело) представляется как система структурных элементов, сформированных в бетоне из вяжущего, заполнителя, и дефектов [6–10].

В результате дифференцированного анализа экспериментальных данных предложено фрактальные модели формировать на основе следующих гипотез:

- все твердые тела состоят из масштабно-инвариантных структурных элементов конечного размера, которые по физическим и химическим свойствам, соотношению фаз подобны целому;
- структура твердого тела является сплошной иерархически организованной масштабно-инвариантной системой, которая формируется по принципу «структура в структуре» или «композит в композите» и на каждом масштабном уровне может быть представлена двумя обобщенными компонентами – матрицей и наполнителем;
- каждый элементарный акт разрушения соответствует разрушению одного или группы равнозначных элементов;
- параметры критерия разрушения элементов структуры не должны противоречить классической теории разрушения;
- система, состоящая из большого числа подсистем множества элементов, образующих структурную систему бетона, характеризуется наличием флуктуации физических параметров, которые являются причиной развития мегастабильных состояний.

Успешное развитие фрактальных моделей зависит от экспериментальных данных испытаний, проведенных по специальной методике.

#### Список литературы

1. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.
2. Селяев, В.П. Анализ физических характеристик диаграмм деформирования цементных композитов при сжатии / В.П. Селяев, П.В. Селяев, М.Ф. Алимов, Е.Л. Кечуткина // Академия. – 2015. – №4. – С. 103–107.
3. Бондаренко, В.М. Физические основы прочности бетона / В.М. Бондаренко, В.П. Селяев, П.В. Селяев // Бетон и железобетон. – 2014. – №4. – С.2–6.

4. Зиновьев, В.Н. Классификация микротрещин и границы их проявления в бетоне при сжатии. Часть 4-2 / В.Н. Зиновьев, Д.В. Романовский, Р.А. Шувалов. // Бетон и железобетон. – 2015. – №5. – С.27–32.
5. Селяев, В.П. Основы фрактальной механики разрушения бетона / В.П. Селяев, П.В. Селяев, Е.Л. Кечуткина // Механика разрушения строительных материалов и конструкций: материалы XIII Академических чтений РААСН. – Международной научно-технической конференции. – Казань: КГАСУ, 2014. – С.289–298.
6. Скоробогатов, С.М. Катастрофы и живучесть железобетонных сооружений (классификация и элементы теории) / С.М. Скоробогатов. – Екатеринбург: Ур. ГУПС, 2009. – 512 с.
7. Соломатов, В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, В.П. Селяев. – Ташкент: ФАН, 1991. – 345 с.
8. Травуш, В.И. О возможном квантовом характере деформации и разрушения композитов / В.И. Травуш, В.П. Селяев, П.В. Селяев, Е.Л. Кечуткина // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – №9. – С. 94–100.
9. Федер, Е. Фракталы: пер. с англ. / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
10. Чернышов, Е.М. Неоднородность структуры и сопротивление разрушению конгломератных строительных композитов / Е.М. Чернышов, Е.И. Дьяченко, А.И. Макеев. – Воронеж: Воронеж ГАСУ, 2012. – 98 с.

#### References

1. Berg, O.Ya. High-strength concrete / O.Ya. Berg, E.N. Shcherbakov, G.N. Picanco. – M.: Stroyizdat, 1971. – 208 p.
2. Selyaev, V.P. Analysis of the physical characteristics of the deformation diagrams of concrete composites under compression / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev., M.F. Alimov, E.L. Kechutkina // Academy. – 2015. – №4. – P. 103–107.
3. Bondarenko, V.M. Physical foundations of concrete strength / V.M. Bondarenko, V.P. Selyaev, P.V. Selyaev // Concrete and reinforced concrete. – 2014. – №4. – P. 2–6.
4. Zinoviev, V.N. Classification of microcracks and boundaries of their manifestation in concrete under compression. Part 4-2 / B.N. Zinoviev, D.V. Romanovsky, R. Shuvalov // Concrete and reinforced concrete. – 2015. – Vol. 5. – P. 27–32.
5. Selyaev, V.P. Fundamentals of fractal mechanics of concrete destruction / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, E.L. Kechutkina // Fracture Mechanics of materials and structures: Materials Chia readings RAASN. – International scientific and technical conference. – Kazan: KGASU, 2014. – P. 289–298.
6. Skorobogatov, S.M. Catastrophes and survivability of reinforced concrete structures (classification and theory elements) / S.M. Skorobogatov. – Yekaterinburg: Ur. Gups, 2009. – 512 p.
7. Solomatov, V.I. Polystructural theory of composite construction materials / V.I. Solomatov, V.N. Vyrovoy V.P. Selyaev. – Tashkent: FAN, 1991. – 345 p.
8. Travush, V.I. On the possible quantum nature of deformation and fracture of composites / V.I. Travush, V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, E.L. Chechetkina // Industrial and civil construction. – 2016. – №9. – P. 94–100.
9. Feder, E. Fractals: lane from English. / E. Feder. – M.: Mir, 1991. – 254 p.
10. Chernyshov, E.M. Heterogeneity of structure and resistance to destruction of conglomerate building composites / E.M. Chernyshov, E.I. Dyachenko, A.I. Makeev. – Voronezh: Voronezh GASU, 2012. – 98 p.

УДК 691.55:666.914.4.022.6

*Некоммерческое акционерное общество  
«Казахский национальный  
исследовательский технический  
университет имени К.И.Сатпаева»*

Казахстан, 050013, г. Алматы,  
ул. Сатпаева, д.22

**Орынбеков Елжан Серикович**,  
кандидат технических наук, младший  
научный сотрудник ТОО «SAVENERGY»  
E-mail: eljan\_79@mail.ru

**Нурлыбаев Руслан Ергалиевич**,  
доктор технических наук,  
директор ТОО «SAVENERGY»  
E-mail: rusya\_nre@mail.ru

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

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

**Селяев Владимир Павлович**,  
доктор технических наук, профессор,  
академик РААСН  
E-mail: ntorm80@mail.ru

*Институт металлургии и обогащения  
Казахстан, г. Алматы, ул. Шевченко, 29*

**Кульдеев Ержан Итеменович**,  
кандидат технических наук,  
зам. генерального директора  
E-mail: kuldeev\_erzhan@mail.ru

*Non-profit joint-stock company «Kazakh  
national research technical University named  
after K. I. Satpayev»*

Kazakhstan, 050013, Almaty,  
22, Satpayev St.

**Orynbekov Yelzhan Serikovich**,  
Candidate of Sciences, junior research  
assistant of LLP «SAVENERGY»  
E-mail: eljan\_79@mail.ru

**Nurlybaev Ruslan Ergalievich**,  
Doctor of Sciences,  
Director of LLP «SAVENERGY»  
E-mail: rusya\_nre@mail.ru

*National research Mordovian state University.  
N. P. Ogarev*

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, Academician of  
the Russian Academy of Architectural and  
Construction Sciences  
E-mail: ntorm80@mail.ru

*Institute of metallurgy and enrichment  
Kazakhstan, Almaty, 29, Shevchenko St.*

**Kuldeyev Yerzhan Cemenovich**,  
Candidate of Sciences,  
Deputy General Director  
E-mail: kuldeev\_erzhan@mail.ru

## СУХИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ СМЕСИ ДЛЯ ШТУКАТУРНЫХ РАБОТ С ТОНКОДИСПЕРСНЫМИ МИНЕРАЛЬНЫМИ АКТИВНЫМИ ДОБАВКАМИ

Е.С. Орынбеков, В.П. Селяев, Р.Е. Нурлыбаев, Е.И. Кульдеев

Качество сухих строительных смесей, используемых для штукатурных работ, с тонкодисперсными минеральными активными добавками определяется правильным подбором и взаимной гармонизацией всех составляющих.

Представлены результаты подбора рецептуры смесей и зависимость реотехнологических характеристик в системах «кварц – цемент – диатомит – добавка – вода» и «кварц – цемент – белая сажа – добавка – вода».

*Ключевые слова: смеси, штукатурные работы, добавка, диатомит, белая сажа, модификации, тонкодисперсная минеральная активная добавка*

## DRY CONCRETE MIXES FOR PLASTERING WITH FINE MINERAL ADDITIVES

E.S. Orynbekov, V.P. Selyaev, R.E. Nurlybaev, E.I. Kuldeyev

The quality of dry concrete mixtures for plastering works with fine mineral active additives is determined by correct selection and mutual harmonization of all components.

The article shows the results of the selection of mixtures recipes and the dependence of reotechnological characteristics in the system «quartz – cement – diatomite – additive – water» and «quartz – cement – white soot – additive – water.»

*Keywords: mixtures, plaster, additive, diatomite, white soot, modifications, finely dispersed mineral active additive*

Качество сухих строительных смесей зависит как от химических добавок, так и от тонкодисперсных минеральных активных добавок. При составлении рецептур необходимо было анализировать процессы, которые произойдут при затворении смеси и последующем превращении раствора в отвердевший материал.

*Тонкодисперсные активные минеральные добавки-наполнители*, использованные в работе: *диатомит* – Утесайского месторождения, светло-серого цвета, плотный, имеет следующий химический состав, масс. %: SiO<sub>2</sub> 65,88-83,65; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 8,36-14,00; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2,35-6,9; CaO 0,5-1,5; MgO 0,62-1,64; SO<sub>3</sub> 0,1-3,0. Размеры частиц 0,14-1,5 мм; *белая сажа* – отход производства высококачественного кремния (SiO<sub>2</sub> от 86 %), является побочным продуктом предприятия ТОО «Стекло К» с размерами частиц 20÷100 нм.

*Вязущее вещество* – ПЦ 400-Д20.

*Добавки*: BERMOCOLL; ELOTEX; С-3; *эфир-крахмал*; М70.

Совокупность некоторых требований к наполнителям заложена в ряде нормативных документов. При подборе рецептуры сухих смесей необходимо соблюдать стандарты по наполнителям, в частности: ГОСТ 8736-93 «Песок для строительных работ»; ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов»; ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка»; ГОСТ 31108-2003 «Цементы общестроительные»; ГОСТ 31189-2015 «Смеси сухие строительные»; ГОСТ 31357-2007 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем»; ГОСТ 31356-2013 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем»; ГОСТ 33083-2014 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем для штукатурных работ».

Для подбора рецептур сухих строительных смесей с тонкодисперсными минеральными активными добавками были проанализированы работы многих исследователей (Логанина В.И., Давыдова О.А., Симонов Е.Е., Никифоров Е.А., Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Емельянов А.И., Кисилев Е.В., Карпова О.В., Макарева М.С. Пустовгар А.П. Карапузов, Е. К., Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осипов А.К., Огаджанов Г.А., Пышкина И.С., Болдырев А.А., Нестерова С.А., Рябов Г.К., Великанова И.С., Демьянова В.С.) [1-22].

**Экспериментальные результаты.** Для проведения испытаний были изготовлены смеси на основе двух тонкодисперсных минеральных добавок – диатомита и белой сажи (аморфного микрокремнезема).

Рецептура модифицированных смесей включает в себя и другие компоненты – гашеную известь, песок, мраморную муку. Наполнители не содержат водорастворимых компонентов, например солей щелочных металлов или магния. Их наличие повышает гидрофильность раствора, ведет к росту В/Ц.

Рецептура 1-го состава:

Рецептура	Состав в %				
	№1	№2	№3	№4	№5
Портландцемент ПЦ 400Д-20	20	20	20	20	20
Гашеная известь	5	5	2	2	5
Песок	7	28	51,2	61,2	59,2
Белая сажа	52,2	36,2	21	11	15
Мраморная мука	15	10	5	5	0,10
Эфир-крахмал	0,10	0,10	0,10	0,10	0,2
BERMOCOLL	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5
ELOTEX	0,5	0,5	0,5	0,5	20-25

Рецептура 2-го состава:

Рецептура	Состав в %							
	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12	№13
Цемент	26,140	26,140	26,140	26,140	26,140	26,140	26,14	20
Песок	72,860	68,36	63,36	58,36	53,36	48,36	43,36	42
С 3	0,5	5	10	15	20	25	30	13
Белая сажа	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	24.8
M70								0.2

Рецептура 3-го состава:

Рецептура	Состав в %			
	№14	№15	№16	№17
Цемент	26,140	26,140	26,140	21.5
Песок	67,36	62,36	57,36	28
Белая сажа	5	10	15	35,2
С 3	0,5	0,5	0,5	
Technocel 500 1	1	1	1	1
Мраморная мука				10
Эфир-крахмал				0,10
BERMOCOLL				1.2
ELOTEX				3
Вода				

Рецептура 4-го состава:

Рецептура	Состав в %									
	№18	№19	№20	№21	№22	№23	№24	№25	№26	№27
Цемент	26,140	26,140	26,140	26,140	26,140	26,140	26,140	26,140	26,140	26,140
Песок	71.36	69.36	67.36	65.36	63.36	71.36	69.36	67.36	65.36	63.36
Белая сажа	1	3	5	7	9					
С 3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Technocel 500 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Диатомит						1	3	5	7	9

Рецептура 5-го состава:

Рецептура	Состав в %									
	№28	№29	№30	№31	№32	№33	№34	№35	№36	№37
Цемент	26,140	26,140	26,140	26,140	26,140	26,140	26,140	26,140	26,140	26,140
Песок	71.76	69.76	67.76	65.76	63.76	71.76	69.76	67.76	65.76	63.76
Белая сажа	1	3	5	7	9					
BERMOCOLL	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
ELOTEX	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Диатомит						1	3	5	7	9

Первый этап работы – определение *трещиностойкости*.

Визуальный осмотр показал, что в составах №1-5 после получения раствора и нанесения на бетонную поверхность толщиной до 0,5-2 см уже через сутки на поверхности штукатурки появились трещины, впоследствии наблюдалось отделение штукатурки от поверхности бетона. Трещины образовались также на составах № 6-17.

Расход Бермоколл зависит от планируемой толщины нанесения раствора. При толстослойном нанесении (от 1,6-2 см) передозировка от 0,2 до 0,5 % опасна, т.к. появляется «эффект карамели» и возникают трещины на поверхности (рис. 1).



Рис. 1. Трещины на поверхности бетонного слоя

Составы №18-37 показали хорошую трещиностойкость на бетонной поверхности. Толщина штукатурки 0,5-2 см (рис.2).



а) с применением белой сажи (аморфный микрокремнезем)



б) с применением диатомита (аморфный микрокремнезем)

Рис. 2. Трещиностойкость на поверхности бетонного слоя

Второй этап работы – определение *технических характеристик*:

1) *Насыпная плотность* сухой смеси: №18-22 в пределах 1300-1860 кг/м<sup>3</sup>; №23-27 в пределах 1640-1770 кг/м<sup>3</sup>; №28-32 в пределах 1120-1520 кг/м<sup>3</sup>; №33-37 в пределах 1530-1720 кг/м<sup>3</sup>.

2) *Плотность смеси*, готовой к применению: №18-22 в пределах 1450-1910 кг/м<sup>3</sup>; №23-27 в пределах 1720-1803 кг/м<sup>3</sup>; №28-32 в пределах 1205-1673 кг/м<sup>3</sup>; №33-37 в пределах 1628-1890 кг/м<sup>3</sup>.

По ГОСТ 33083-2014, сухая смесь, раствор которой имеет среднюю плотность менее 1300 кг/м<sup>3</sup>, относится к группе штукатурной легкой смеси, более 1300 кг/м<sup>3</sup> – к группе штукатурной тяжелой смеси.

3) Количество воды затворения: №18-22 – 4 л на 25 кг сухой смеси; №23-27 – 4 л на 25 кг сухой смеси; №28-32 – 6,5-8,25 л на 25 кг сухой смеси; №33-37 – 4-5,75 л на 25 кг сухой смеси.

Отклонение от оптимального В/Ц-отношения ухудшает прочность и ведет к образованию трещин.

4) Подвижность смеси определяется с помощью эталонного конуса.

Замечено, что чем тоньше наполнитель (*минеральные активные добавки*), тем больше его удельная поверхность. Следовательно, для достижения требуемой пластичности (подвижности) раствору с более тонкими наполнителями требуется больше воды.

Т а б л и ц а 1

Данные, полученные в ходе испытаний

№ состава	Подвижность, см	Марка по подвижности	Примечание
№18-22	от 4 до 7,5	Пк2	Подвижность свежеприготовленной растворной смеси, предназначенной для оштукатуривания поверхностей, должна соответствовать марке Пк3 (глубина погружения конуса 8-12 см), ГОСТ 33083-2014
№23-27	от 6 до 7	Пк2	
№28-32	от 11 до 11,5	Пк3	
№33-37	от 10 до 11	Пк3	

5) Температура применения сухих строительных смесей от+5 до +30°C.

6) Определение водоудерживающей способности.

Т а б л и ц а 2

Водоудерживающая способность смесей

№ состава	Водоудерживающая способность, %	Примечание
№18-22	90-93	Водоудерживающая способность смесей, готовых к применению, должна быть не менее 90 %, содержащих водоудерживающие добавки, – не менее 95 %
№23-27	92,5-96	
№28-32	97-97,5	
№33-37	96-97,5	

Водоудержание составов №18-37 без минеральных активных добавок составляет 75–80 %, с минеральными активными добавками – не менее 90-97,5 %.

7) Определение водопоглощения при капиллярном подсосе.

Образцы помещали торцевой гранью в ванну на сетчатую подставку.

Ванну заполняли водой температурой (20 ± 5)°C так, чтобы торец был погружен в воду на 5-10 мм. Уровень воды в ванне поддерживался постоянным в течение всего времени испытания.

Т а б л и ц а 3

Определение водопоглощения при капиллярном подсосе

№ состава	Водопоглощение	Примечание
№18-22	В течение 24 ч не превышает 0,4 кг/ч <sup>0,5</sup>	Водопоглощение при капиллярном подсосе в течение 24 ч не должно превышать 0,4 кг/ч <sup>0,5</sup> (кроме гидроизоляционных смесей), для гидроизоляционных смесей – не более 0,2 кг/(м <sup>2</sup> ·ч <sup>0,5</sup> )
№23-27		
№28-32		
№33-37		

Использование минеральных активных добавок позволяет снизить водопоглощение и отрегулировать паропроницаемость, уменьшить риск высолов.

**Выводы:**

1. Установлено, что введение тонкодисперсных минеральных активных добавок (диатомит, белая сажа) повышает реакционную способность наполненного вяжущего и приводит к увеличению его активности.

2. Установлены рациональные соотношения между пассивной (песок) и активной (диатомит, белая сажа) составляющими заполнителя растворной смеси, позволяющие регулировать эксплуатационные свойства штукатурного раствора.

3. Изучена возможность модификации сухих строительных смесей на цементном вяжущем добавкой комплексного действия (эфир-крахмал, М70, BERMOCOLL, ELOTEX, С-3, Technocel 500 1). Выявлены особенности изменения количества воды затворнения, подвижности смеси, температуры применения, водоудерживающей способности, водопоглощения при капиллярном подсосе.

4. Установлены особенности изменения реологических и технологических свойств растворов на основе сухих смесей в зависимости от состава, насыпной плотности и различных дозировок добавок.

5. Выявлена зависимость реотехнологических характеристик в системах «кварц – цемент – диатомит – добавка – вода» и «кварц – цемент – белая сажа – добавка – вода» от генетического типа сырья.

### Список литературы

1. Логанина, В.И. Теплоизоляционные сухие строительные смеси с применением модифицированного диатомита / В.И. Логанина // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 10.

2. Логанина, В.И. Влияние активации диатомита на свойства известковых композиций / В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 3. – С. 20–23.

3. Никифоров, Е.А. Особенности структурообразования известковых композитов с применением модифицированного диатомита / Е.А. Никифоров, В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – № 2. – С. 4–8.

4. Логанина, В.И. Исследования закономерностей влияния золя кремниевой кислоты на структуру и свойства диатомита / В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Строительные материалы. – 2011. – № 12. – С. 62–65.

5. Черкасов, В.Д. Активная минеральная добавка на основе химически модифицированного диатомита / В.Д. Черкасов, В.И. Бузулуков, А.И. Емельянов, Е.В. Кисилев, Д.В. Черкасов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 12. – С. 50–55.

6. Логанина, В.И. Структурообразование известковых композитов на основе модифицированного диатомита / В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Приволжский научный журнал. – 2012. – № 2. – С. 68–72.

7. Карпова, О.В. Эффективность применения известково-диатомитовой декоративной штукатурки для отделки ограждающих конструкций / О.В. Карпова, В.И. Логанина, Е.Е. Симонов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – № 5. – С. 44–47.

8. Логанина, В.И. Влияние поверхностной активности наполнителя на структурообразование отделочных покрытий на основе сухих смесей / В.И. Логанина, И.С. Великанова // Известия вузов. Строительство. 2005. – № 5. – С. 58–60.

9. Макарева, М.С. Сухие строительные смеси для штукатурных работ с тонкодисперсными минеральными добавками: автореф. дис. ... / М.С. Макарева. – 2005.

10. Симонов, Е.Е. Теплоизоляционные декоративные сухие строительные смеси с применением модифицированного диатомита: автореф. дис. ... / Е.Е. Симонов. – 2013.

11. Пустовгар, А.П. Эффективность применения активированных диатомитов в сухих строительных смесях / А.П. Пустовгар // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – 3 с.

12. Пустовгар, А.П. Опыт применения активированного диатомита в производстве сухих строительных смесей / А.П. Пустовгар // Материалы 7-й Международной конференции BALTIMIX-2007.

13. Карапузов, Е.К. Сухие строительные смеси: справ. пособие / Е.К. Карапузов, Г.Лутц, Х. Герольд [и др.]. – Киев: Техніка, 2000. – 226 с.
14. Селяев, В.П. Изучение условий получения аморфного микрокремнезема из природного диатомита / В.П. Селяев, А.А. Седова, Л.И. Куприяшкина, А.К. Осипов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. «Естественные науки». – 2015. – №4. – С.17–23.
15. Великанова, И.С. Отделочные составы на основе сухих смесей с использованием местных материалов: автореф. дис. ... / И.С. Великанова. – 2005.
16. Патент RU 2 540 998 С1. Сухая строительная смесь / Огаджанов Г.А. Опубликовано: 10.02.2015. Бюл. № 4
17. Патент RU 2 540 999 С1. Сухая строительная смесь / Огаджанов Г.А. Опубликовано: 10.02.2015. Бюл. № 4.
18. Патент RU2 411 219 С1 Сырьевая смесь для изготовления высокотемпературных теплоизоляционных изделий на основе диатомита / Никифоров Е.А. Опубликовано: 10.02.2011. Бюл. № 4.
19. Патент RU2 610 465 С1. Составы для отделки / Логанина В.И., Пышкина И.С. Опубликовано: 13.02.2017. Бюл. № 5.
20. Патент RU2 297 991С1. Сухая строительная смесь / Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Болдырев А.А. Опубликовано: 27.04.2007. Бюл. № 12.
21. Патент RU2 456 255 С1. Состав для отделки / Никифоров Е.А., Нестерова С.А., Рябов Г.К., Логанина В.И., Давыдова О.А., Симонов Е.Е.. Опубликовано: 20.07.2012. Бюл. № 20.
22. Патент RU2 274 619 С2. Шпатлевка / Логанина В.И., Великанова И.С., Демьянова В.С. Опубликовано: 20.04.2006. Бюл. № 11.

#### References

1. Loganina, V.I. thermal Insulation dry building mixtures with modified diatomite / V.I. Loganina // Modern scientific researches and innovations. – 2014. – No. 10.
2. Loganina, V.I. Effect of activation of diatomite on the properties of lime compositions / V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // Proceedings of higher educational institutions. Construction. – 2011. – № 3. – P. 20–23.
3. Nikiforov, E.A. Features of structure formation of lime composites using modified diatomite / E.A. Nikiforov, V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // Regional architecture and construction. – 2011. – № 2. – P. 4–8.
4. Loganina, V.I. Studies of the influence of silicic acid Sol on the structure and properties of diatomite / V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // Building materials. – 2011. – No. 12. – P. 62–65.
5. Cherkasov, V.D. Active mineral additive based on chemically modified diatomite / V.D. Cherkasov, V.I. Buzulukov, A.I. Emelyanov, E.V. Kisilev, D.V. Cherkasov // Proceedings of higher educational institutions. Construction. – 2011. – №12. – P. 50–55.
6. Loganina, V. I. Structure formation in lime-based composites modified diatomite / V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // Privolzhsky scientific journal. – 2012. – № 2. – P. 68–72.
7. Karpova, O.V. Efficiency of application of lime-diatomite decorative plaster for finishing of enclosing structures / O.V. Karpova, V.I. Loganina, E.E. Simonov // Proceedings of higher educational institutions. Construction. – 2012. – № 5. – P. 44–47.
8. Loganina, V.I. Influence of surface activity of filler on structure formation of finishing coatings on the basis of dry mixtures / V.I. Loganina, I.S. Velikanova // Izvestiya vuzov. Construction. – 2005. – № 5. – P. 58–60.
9. Makareva, M.S. Dry building mixes for plastering with fine mineral additives: autoref. dis. ... / M.S. Makareva. – 2005.
10. Simonov, E.E. Decorative thermal insulation of dry construction mixtures with use of modified diatomite: autoref. dis. ... / E.E. Simonov. – 2013.

11. Pustovgar, A.P. Effectiveness of the use of activated diatomites in dry mixes / A.P. Pustovgar // Building materials journal. – 2006. – №10 – 3 p.
12. Pustovgar, A.P. experience in the use of activated diatomite in the production of dry mixes / A.P. Pustovgar // 7th international conference BALTIMIX. – 2007.
13. Karpuzov, E.K. Dry mixes: right, a manual / E.K. Karpuzov, G. Lutz, X. Herald [etc.]. – Kiev: Techno, 2000. – 226 p.
14. Selyaev, P.V. Study of the conditions for obtaining amorphous silica fume from natural diatomite / P.V. Selyaev, A.A. Sedov, L.I. Kupryashkina, A.K. Osipov // News of higher educational institutions. Volga region. «Natural Sciences». – 2015. – N4. – P. 17–23.
15. Velikanova, I. S. Finishing compositions based on dry mixtures using local materials: abstract dis. ... / I. S. Velikanova. – 2005.
16. Patent RU 2 540 998 C1. Dry building mix / Ogajanov G. A. Published: 10.02.2015. Bull. No. 4.
17. Patent RU 2 540 999 C1. Dry building mix / Ogajanov G. A. Published: 10.02.2015. Bull. No. 4.
18. Patent RU2 411 219 C1 Raw mixture for the manufacture of high-temperature thermal insulation products based on diatomite / Nikiforov E. A. Published: 10.02.2011. Byul. No. 4.
19. Patent RU2 610 465 C1. Compositions for finishing / Loganina V. I., Pyshkina I. S. Published: 13.02.2017. Byul. No. 5.
20. Patent RU2 297 991C1. Dry building mix / Selyaev V.P., Kupryashkina L.I., Boldyrev A. A. Published On: 27.04.2007. Bull. No. 12.
21. Patent RU2 456 255 C1. Composition for finishing / Nikiforov, E. A., Nesterov S. A., Ryabov G. K., Loganina V. I., Davydova O. A., Simonov E. E.. Published: 20.07.2012. Byul. No. 20.
22. Patent RU2 274 619 C2. Putty / Loganina V. I., Velikanova I. S., Demyanova V. S. Published: 20.04.2006. Byul. No. 11.

УДК 691:519.7

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

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

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

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

*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

## ОСНОВЫ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

И.А. Гарькина, А.М. Данилов

Дается методология системных исследований в разработке композиционных материалов. Предполагается, цель ставится исследователем для получения полезной функции; реализация потребности в системе может осуществляться несколькими функциями (множественные пути развития) при ограниченных ресурсах. Показывается, что при синтезе системы основным является определение системного свойства. Указывается возможность представления строительных материалов как сложных систем с системными атрибутами с выделением системообразующих интегративных свойств. Отмечается, что система (в том числе строительный материал) может быть охарактеризована только через взаимодействие составляющих элементов.

*Ключевые слова: сложные системы, системные атрибуты, функциональность, целостность, структура, организация, системное качество, цель, композиты, когнитивное моделирование, кинетические процессы, системные исследования*

## BASES OF SYSTEM RESEARCH IN SCIENCE OF MATERIALS

I.A. Garkina, A.M. Danilov

The methodology of system research in the development of composite materials is given. It is assumed that the goal is set by the researcher to obtain a useful function; realization of the need in a system can be carried out by several functions (multiple ways of development) with limited resources. It is shown that at system synthesis, the determination of the system property is fundamental. The possibility of the presentation of building materials as complex systems with system attributes allocated of system-forming integrative properties is indicated. It is noted that the system (including building material) can only be characterized by the interaction of constituent elements.

*Keywords: complex systems, system attributes, functionality, integrity, structure, organization, system quality, goal, composites, cognitive modeling, kinetic processes, system research*

*Смысл системного подхода заключается в рассмотрении некоторого объекта как системы взаимосвязанных элементов, образующих единое целое. Чтобы познать закономерности функционирования системы, необходимо определить, что такое сложная система, из каких элементов она состоит, как возникают и функционируют связи между частями, каковы последствия от действия внешних и внутренних факторов (функциональность, целостность (структура), организация, системное качество и т.д.; отсутствие хотя бы одного признака не позволяет считать объект системой).*

Обычно *цель* задается человеком, исходя из получения *полезной функции* (*синтез системы* – целенаправленный процесс; *цель* – результат осознания потребности; *функция* – реализация потребности в системе). Отметим, потребность может быть удовлетворена несколькими функциями, так что *системы имеют множественные пути развития*. Практически всегда воплощение потребности осуществляется человеком при *ограниченных ресурсах*.

Чем конкретнее описывается функция (способность проявлять свойство системы (качество, полезность) при определенных условиях и преобразовывать форму объекта), тем лучше определяется система и ее структура (выявленные закономерности функционирования (изменение свойств, характеристик и качеств системы в пространстве и времени) снижают вариантность исследования). Нередко система выполняет несколько функций (обычно лишь одна считается рабочей (*главная полезная функция*), остальные предполагаются вспомогательными). Отметим, неохватность всех свойств и связей, множественность требований, предъявляемых к системе внутренними и внешними связями, делают затруднительным определение *рабочей функции*. В частности, Ю. П. Саламатов так определяет иерархию функций кирпича:

- *отдельный кирпич* должен сохранять свою форму, не разваливаться, иметь определенный вес, структуру, твердость; иметь прямоугольные грани, схватываться с раствором (требование со стороны других кирпичей и раствора в будущей стене);

- *стены* должны нести нагрузку (в том числе собственную), быть вертикальными, не должны деформироваться при изменении температуры, влажности, нагрузки, выполнять функцию ограждения; кирпич должен соответствовать части этих требований;

- *дом* должен создавать определенные условия внутренней среды, защищать от атмосферных воздействий, иметь определенный внешний вид; кирпич должен выполнять часть и этих требований;

- *город* должен иметь определенный архитектурный облик и учитывать климатические, национальные и другие особенности.

Требования непосредственно к кирпичу постоянно увеличиваются: кирпич не должен впитывать грунтовую влагу, должен иметь хорошие теплоизоляционные и звукопоглощающие свойства, быть радиопрозрачным и т.д. Требования по мере удаления иерархического уровня, от которого они исходят, оказывают все меньшее влияние на данную систему; над- и подсистемные требования могут быть выполнены и другими системами, не обязательно данной системой. Например, прочность кирпича может быть достигнута различными добавками в исходную массу, а эстетичность – приклеиванием декоративной плитки на готовую стенку. Рабочая функция элемента определяется системой, в которую он включается. Тот же кирпич может быть включен и во множество других систем, где его рабочая функция может быть и совершенно иной. Физическим принципом осуществления требуемой полезной функции определяется совокупность элементов системы и связей между ними – *структура системы*. Соединение элементов в единое целое производится для получения полезной функции (достижение поставленной цели): определение цели системы зависит от человека, а *структура* – *наиболее объективный признак системы и зависит только от вида и состава используемых в системе элементов, а также от общих законов мира (способы соединения, виды связей (отношения между элементами системы), режимы функционирования элементов в структуре)*. Структура должна оставаться неизменной в процессе функционирования.

Основным при синтезе системы является определение *системного свойства* (*системное качество* – появление нового свойства (надсвойства), которого не было ни у одного из элементов до включения их в систему; непропорционально большое усиление или уменьшение имеющихся у элементов свойств – *системный эффект*). Авторами уже указывалась возможность представления строительных материалов как сложных систем с системными атрибутами, выделялись системообразующие интегративные свойства [1]; определялась роль парадоксов целостности и иерархичности [2]. В задачах материаловедения особую роль играет *декомпозиция системы* при решении

отдельных задач синтеза строительных материалов как систем. При *системном подходе к системе* учитывается, что «... отдельные части (подсистемы) системы настолько сильно взаимосвязаны между собой множеством прямых и обратных связей, что изменение одной из них может повлечь за собой значительные изменения в других ее частях. Поэтому часто не работает метод декомпозиции системы на ее отдельные части и исследования ее как более простых, а далее синтеза системы из ее отдельных более простых частей. На самом деле надо оценивать и анализировать систему как целостную или единую, и нельзя осуществить анализ и оценку системы после ее декомпозиции на более простые части» [3].

Строительный материал как многоцелевая сложная система оценивается несколькими показателями качества: естественно, возникает задача векторной оптимизации и управления структурой и свойствами материала изменением соответствующих рецептурно-технологических параметров, а также связанных с этим проблем скаляризации и разработки функционалов качества. С этой точки зрения очевиден подход к синтезу материалов и как к задаче управления [4]. Введение иерархии критериев и выделение комплексов решаемых частных задач являются основой разработки иерархической структуры материала (системы) с оценками её элементов (для радиационно-защитных композитов приводится в [5...7]); роль ингредиентов в формировании интегративных, системообразующих свойств материала как системы изучалась на примере синтеза материала на основе серы).

Традиционно оптимизация структуры и свойств композиционных материалов основывается на кинетических процессах формирования физико-механических характеристик материалов, в последнее время – и на их компьютерном моделировании [8...10]. При оптимизации структуры и свойств решается задача *идентификации кинетических процессов* в гомогенных и гетерогенных системах. Возможность идентификации кинетических процессов следует из *принципа 100 %-й эффективности математики А.Г. Бутковского* (в рамках полиструктурной теории объективные закономерности структурообразования и формирования свойств композита рассматриваются на уровнях от микро- до макроструктуры).

Выбранным физическим принципом воплощения рабочей функции определяются различные структуры. *Формирование структуры – основа синтеза системы*. Выбор принципа действия (цели) однозначно определяет структуру; функциональная схема строится по *принципу причинности (когнитивное моделирование, [11...14])*.

В многоуровневых системах (в том числе композитах) используется упорядочение взаимодействий между уровнями в порядке от высшего к нижнему (*иерархический принцип организации* структуры [15...17]). Каждый уровень выступает как управляющий по отношению ко всем нижележащим и как управляемый, подчиненный по отношению к вышележащему. Каждый уровень специализируется также на выполнении определенной функции (рабочая функция уровня). Абсолютно жестких иерархий нет, часть систем нижних уровней обладает меньшей или большей автономией по отношению к вышележащим уровням. В пределах уровня отношения элементов равны между собой, взаимно дополняют друг друга, им присущи черты самоорганизации (закладываются при формировании структуры). Эффективность, надежность и устойчивость функционирования сложных систем зависит от правильно выбранной иерархической структуры (в простых системах иерархия не требуется). Когда связи между элементами и/или их свойствами превышают связи с несистемными элементами, одновременно со структурой возникает *организация (алгоритм совместного функционирования элементов системы в пространстве и времени)*.

Степень организованности отражает степень предсказуемости поведения системы при функционировании (полная непредсказуемость – когда системы нет). Сложность организации определяется числом и разнообразием элементов, связей, уровней иерархии. *На микроуровне функция подсистемы осуществляется веществом. Организация дает возможность управления*, то есть изменения или поддержания состояния элементов в процессе функционирования системы. Можно выделить *три группы разрушающих организацию факторов: внешние* (надсистема, природа, человек;

разрушают связи, если их мощность превышает мощность внутрисистемных связей), *внутренние* (форсирование или случайное взаимоусиление вредных свойств; их количество увеличивается с течением времени из-за нарушений в структуре), *энтропийные* (саморазрушение элементов из-за конечности срока жизни).

Для определения системного эффекта надо разделить систему на составные элементы и проследить, какое качество исчезает при удалении некоторых элементов (ни одна усеченная система не может выполнить требуемую функцию всей системы; на некотором этапе деления теряются главные признаки).

*Выбор проектного решения* из числа возможных альтернативных вариантов (*средство достижения целей*) осуществляется на основе показателей (критериев выбора), обобщенно характеризующих степень достижения поставленной цели в том или ином варианте проекта. На этой стадии проектирования система рассматривается как совокупность взаимосвязанных управляемых подсистем, объединенных общей целью функционирования для решения заданной проблемы в некотором диапазоне условий. При выборе рационального варианта и оптимизации его параметров, как правило, используется и показатель, отражающий соотношение между эффективностью решения поставленной задачи и суммарными затратами на решение. Этим обеспечивается максимальная эффективность при заданных затратах (или минимальная стоимость при заданном уровне эффективности). При решении отдельных задач, в том числе обороны страны, этот показатель часто не учитывается.

Обычно любые *изменения внешней среды* влияют на систему; верно и обратное: свойства внешней среды (динамическая система) изменяются при работе системы. Поэтому при проектировании системы с длительным периодом эксплуатации учитывается не только сегодняшнее состояние среды, но и прогнозируются ее изменения. Предполагается возможность различных модификаций системы (возможные прогнозы не являются абсолютно точными). С системных позиций всегда исходят из *подчинения целей подсистем целям системы в целом* (организмический принцип). *Методологическая неприспособленность традиционной науки для анализа отношений в системах и недостаточность имеющихся математических методов являются причиной того, что системные проблемы во многом до сих пор остаются философскими и до конца не сформировались как наука.* Пока многочисленные успехи классической науки не привели к пересмотру ее *фундаментальной парадигмы* — *однолинейной причинности и расчленения предмета исследования на элементарные составляющие.*

Несмотря на внешнюю простоту, очевидны затруднения в тривиальных ответах по реализации понятия «система» на различных уровнях наблюдаемого мира. *Система может быть охарактеризована только через взаимодействие составляющих элементов.* Различие между реальными и концептуальными системами на уровне простого здравого смысла практически невозможно установить. Пока различные аспекты функционирования системы изучаются по разным теоретическим моделям, что в итоге может привести к их унификации.

Таким образом, *общая теория систем, являясь моделью определенных общих аспектов реальности, позволяет увидеть многое из того, что раньше не замечалось (или эти вопросы обходились).* В этом и заключается основное методологическое значение системных исследований.

#### Список литературы

1. Garkina, I.A. Materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Seylaev // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 11. – P. 2461–2464.
2. 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. 412–417.

3. Прангишвили, И.В. Системный подход и общесистемные закономерности / И.В. Прангишвили. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 528 с.
4. Garkina, I.A. Principles of optimal control in the synthesis of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Selyaev // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 723. – P. 32–36.
5. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2. Ser. «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering»*. – 2017. – P. 012006.
6. Garkina, I.A. Analytical design of building materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Journal of Basic and Applied Research International*. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.
7. Гарькина, И.А. Преодоление неопределенности целей в задачах многокритериальной оптимизации на примере разработки сверхтяжелых бетонов для защиты от радиации / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев, В.А. Смирнов // *Строительные материалы*. – 2006. – № 9. – С. 104–105.
8. Данилов, А.М. Методология проектирования сложных систем при разработке материалов специального назначения / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2011. – № 1 (625). – С. 80–85.
9. Гарькина, И.А. Опыт разработки композиционных материалов: некоторые аспекты математического моделирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2013. – № 8 (656). – С. 28–33.
10. Скачков, Ю.П. Модификация метода ПАТТЕРН к решению архитектурно-строительных задач / Ю.П. Скачков, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // *Региональная архитектура и строительство*. – 2011. – № 1. – С. 4–9.
11. Гарькина, И.А. Когнитивное моделирование при синтезе композиционных материалов как сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2009. – № 3–4 (603–604). – С. 30–37.
12. Garkina, I.A. Methodological principles design of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.A. Budylna // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2016. – Vol. 11, № 11. – С. 2524–2527.
13. Данилов, А.М. Цель системы: абстрактная модель и ее формализация / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // *Региональная архитектура и строительство*. – 2016. – № 1 (26). – С. 20–23.
14. Данилов, А.М. Методологическая парадигма естественных наук: системный подход / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // *Региональная архитектура и строительство*. – 2016. – № 3 (28). – С. 161–165.
15. Данилов, А.М. Кинетические процессы формирования свойств материалов, идентификация / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // *Региональная архитектура и строительство*. – 2018. – № 1 (36). – С. 63–67.
16. Данилов, А.М. Концептуальные модели композитов как сложных систем: состояние и перспективы / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // *Региональная архитектура и строительство*. – 2018. – № 3 (36). – С. 56–61.
17. Гарькина, И.А. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // *Строительные материалы*. – 2018. – № 1–2. – С. 60–62.

## References

1. Garkina, I.A. Materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Selyaev // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2016. – Vol. 11, № 11. – P. 2461–2464.
2. 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. 412–417.

3. Prangishvili, I.V. System approach and system-wide laws / I.V. Prangishvili. – M.: SINTEG, 2000. – 528 p.
4. Garkina, I.A. Principles of optimal control in the synthesis of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Selyaev // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 723. – P. 32–36.
5. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2*. Cep. «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.
6. Garkina, I.A. Analytical design of building materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Journal of Basic and Applied Research International*. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.
7. Garkina, I.A. Bridging the ambiguity of goals in multi-criteria optimization tasks by the example of developing extra-heavy concrete to protect against radiation / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev, V.A. Smirnov // *Construction materials*. – 2006. – № 9. – P. 104–105.
8. Danilov, A.M. Methodology of designing complex systems in the development of special-purpose materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Proceedings of higher educational institutions. Building*. – 2011. – № 1 (625). – P. 80–85.
9. Garkina, I.A. Experience in the development of composite materials: some aspects of mathematical modeling / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Proceedings of higher educational institutions. Building*. – 2013. – № 8 (656). – P. 28–33.
10. Skachkov, Yu.P. Modification of the PATTERN method for solving architectural and construction tasks / Yu.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and engineering*. – 2011. – № 1. – P. 4–9.
11. Garkina, I.A. Cognitive modeling in the synthesis of composite materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // *Proceedings of higher educational institutions. Building*. – 2009. – № 3–4 (603–604). – P. 30–37.
12. Garkina, I.A. Methodological principles design of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.A. Budylnina // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2016. – Vol. 11, № 11. – P. 2524–2527.
13. Danilov, A.M. The purpose of the system: an abstract model and its formalization / A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and engineering*. – 2016. – № 1 (26). – P. 20–23.
14. Danilov, A.M. Methodological paradigm of natural sciences: a systematic approach / A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and engineering*. – 2016. – № 3 (28). – P. 161–165.
15. Danilov, A.M. Kinetic processes of formation of material properties, identification / A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and engineering*. – 2018. – № 1 (36). – P. 63–67.
16. Danilov, A.M. Conceptual models of composites as complex systems: state and prospects / A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and engineering*. – 2018. – № 3 (36). – P. 56–61.
17. Garkina, I.A. The evolution 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.

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 519.633

*Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства*

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

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

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

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

### ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ДЕКАРТОВЫХ КООРДИНАТАХ ПРИ БИЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ЗАМЫКАЮЩИХ УРАВНЕНИЙ (геометрически нелинейная модель)

С.В. Бакушев

Излагаются вопросы построения дифференциальных уравнений равновесия в перемещениях для плоского деформирования сплошных сред при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений с учётом геометрической нелинейности в декартовой системе координат. Исходя из предположения о независимости, вообще говоря, друг от друга диаграмм объёмного и сдвигового деформирования, рассмотрено шесть основных случаев физических зависимостей, зависящих от взаимного расположения точек излома билинейных диаграмм объёмного и сдвигового деформирования. Построение билинейных физических зависимостей основано на вычислении секущих модулей объёмного и сдвигового деформирования. При этом на первом участке диаграмм секущий модуль и объёмного и сдвигового деформирования постоянен, в то время как на втором участке диаграмм секущий модуль объёмного деформирования является функцией объёмной деформации, а секущий модуль сдвига – функцией интенсивности деформаций сдвига. Подставив соответствующие билинейные физические уравнения в дифференциальные уравнения равновесия сплошной среды, записанные с учётом геометрической нелинейности, получим разрешающие дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях для плоской деформации в декартовой системе координат. Дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях могут найти применение при определении напряжённо-деформированного состояния сплошных сред, которые находятся в условиях

плоского деформирования с учётом геометрической нелинейности и физические соотношения для которых аппроксимированы билинейными функциями.

*Ключевые слова: дифференциальные уравнения равновесия, плоская деформация в декартовых координатах, билинейные замыкающие уравнения, геометрическая нелинейность*

## DIFFERENTIAL EQUATIONS OF EQUILIBRIUM SOLID ENVIRONMENT FOR FLAT DEFORMATION IN CARTESIAN COORDINATES WITH BILINEAR APPROXIMATION OF CLOSING EQUATIONS (geometrically nonlinear model)

S.V. Bakushev

The issues of building differential equations in the movements for flat deformation of continuous medium at bilinear approximation of closing equations taking into account geometrical non-linearity in the Cartesian coordinate system are stated. Assuming independence the diagrams of volumetric and shear deformation six major cases of physical dependency from relative position of fracture points bilinear diagrams of volumetric and shear deformation are discussed. Bilinear physical dependencies building is based on calculation of secant modulus of volumetric and shear deformation. On the first section of the diagrams the secant modulus of both volumetric and shear deformation is constant while on the second section of the diagrams the secant modulus of volumetric deformation is the function of volumetric deformation and the the secant modulus of the scear is the function of deformation shear intensity substituting corresponding bilinear physical equations into differential equations of continuous medium recorded with movement consideration of geometrical nonlinearity we obtain resolving differential equation of equilibrium in movements for flat deformation in Cartesian coordinate system. Differential equation of equilibrium in movements can final application at determining stress-strain State of continuous medium which are in the state of flat deformation considering geometrical nonlinearity and physical relations for which bilinear functions are approximated.

*Keywords: differential equations of equilibrium, flat deformation in Cartesian coordinates, trailing bilinear equations, geometrically nonlinear model*

**Введение.** Одним из наиболее важных факторов, определяющих адекватное описание механического поведения строительных и машиностроительных конструкций, является точное математическое описание зависимостей между напряжениями и деформациями для геометрически линейных нелинейно-упругих тел либо точное математическое описание зависимостей между обобщёнными напряжениями и нелинейными деформациями для геометрически нелинейных нелинейно-упругих тел. Наиболее общие соотношения между обобщёнными напряжениями и нелинейными деформациями для изотропных нелинейно-упругих тел, находящихся в условиях сложного напряжённого и деформированного состояния, были даны В.В. Новожиловым в работе [1]. Физические соотношения были построены В.В. Новожиловым на основе тензорных свойств понятий «напряжение» и «деформация». Однако замыкающие уравнения им построены не были. Он лишь указал на то, что замыкающие уравнения связывают между собой инварианты тензоров обобщённых напряжений и нелинейных деформаций. Обобщённый модуль объёмного расширения (сжатия) связывает первые инварианты, обобщённый модуль сдвига связывает вторые инварианты, фаза подобия девиаторов связывает третьи инварианты обобщённых тензоров напряжений и нелинейных деформаций. Рассматривая сплошную среду, для которой девиаторы обобщённых напряжений и нелинейных деформаций оказываются подобными, фазу подобия девиаторов принимают равной нулю. Таким образом, для нелинейно-упругих тел и конструкций, находящихся в условиях сложного напряжённо-деформированного состояния, зависимости между обобщёнными напряжениями и нелинейными деформациями для геометрически нелинейных моделей или зависимости между напряжениями и деформациями для геометрически линейных моделей описываются при помощи диаграмм объёмного и сдвигового деформирования.

Моделирование механического поведения твёрдых деформируемых тел, находящихся в условиях сложного напряжённого и деформированного состояния, основано

на математических моделях, описывающих объёмное и сдвиговое деформирование соответствующего материала. Обзор некоторых математических моделей, описывающих механическое поведение сплошных сред, предложенных во второй половине XX столетия (Сетх, Синьорини, Мурнаган, Джон, Блейтц и Ко), дан в работе А.И. Лурье [2]. К этому же периоду следует отнести математические модели сплошных сред, предложенные проф. Г.А. Гениевым, для описания механического поведения сыпучих сред и грунтовых массивов [3], бетона и железобетона [4].

Разработка математических моделей сплошных сред продолжается и в настоящее время. Так, для расчёта железобетонных конструкций получили распространение математические модели Н.И.Карпенко [5].

В работе [6] на основе точечной модели материала, точки которой соединены упругими, вязкими, пластическими и трансмиссионными элементами, предложен метод построения системы определяющих уравнений несжимаемой среды при конечных деформациях с нелинейными диссипативными свойствами. В работе [7] рассмотрен приём замены сплошной деформируемой среды эквивалентной по своим физико-механическим свойствам системой взаимодействующих частиц. Такой подход позволяет путём изменения потенциала взаимодействия между частицами имитировать и упругость, и пластичность, и вязко-упругость, а также физическую и геометрическую нелинейность.

Получены разрешающие уравнения в перемещениях для плоской деформации несжимаемого тела с учётом физической и геометрической нелинейности [8]. Физическая нелинейность определялась законом Мурнагана о связи напряжений Коши с деформациями Альманси. Метод построения определяющих соотношений для изотропного твёрдого тела, при котором не требуется традиционного априорного постулирования их математического вида или вида энергетических функций, из которых эти соотношения следуют, рассматривается в работе [9]. Установлены определяющие тензорно нелинейные соотношения, адекватно описывающие нелинейные эффекты при деформировании твёрдых тел. Отмечены особенности получения замкнутой системы разрешающих уравнений, учитывающие специфику определения тензора логарифмических деформаций, через который выражен закон состояния.

Кинематический вариационный принцип, согласно которому общий вид функционала энергии для исследуемой среды находится по заданным кинематическим связям различной сложности, используется в работе [10] для построения корректных математических моделей – определяющих и разрешающих уравнений, а также граничных условий – для континуальных сред с микроструктурой. В статье [11] приводится вариант модифицирования теории механики сплошных сред путём введения в основные уравнения градиентов деформации, что позволяет в рамках упругости, пластичности и механики разрушения адекватно описать как статические (например размерные эффекты на микромасштабном уровне), так и динамические (например дисперсия коротких упругих волн в гетерогенных или дискретных средах) явления, а также линейное и нелинейное поведение сплошной среды.

Приведённый выше краткий обзор работ, посвящённых разработке математических моделей механического поведения нелинейных сред и нелинейно-упругих тел, показывает, что математическое описание механического поведения тел и конструкций отличается достаточно сложным математическим аппаратом и, как правило, исключает возможность аналитического исследования процесса деформирования в зависимости от того или иного фактора. В то же время искусственное упрощение математических моделей приводит к неадекватному описанию механического поведения деформируемых тел и конструкций. Данное противоречие можно устранить, если воспользоваться приёмом, в соответствии с которым математические модели следует строить достаточно строго, в соответствии с экспериментальными данными, а затем полученные сложные замыкающие уравнения аппроксимировать какими-либо простыми функциями, например билинейными. Физические уравнения, построенные на основе билинейных функций, имеют простую структуру; следовательно, простую структуру будут иметь и разрешающие дифференциальные уравнения равновесия.

Данная работа посвящена построению дифференциальных уравнений равновесия в перемещениях сплошной среды в декартовых координатах. Сплошная среда, описываемая с учётом геометрической нелинейности, находится в условиях плоской деформации. Замыкающие уравнения при этом аппроксимируются билинейными функциями.

**Построение физических уравнений.** В данной работе представлено построение дифференциальных уравнений равновесия в перемещениях в декартовых координатах для случая плоского деформирования сплошной среды  $u = u(x, y)$ ,  $v = v(x, y)$ ,  $w = 0$  при аппроксимации замыкающих уравнений произвольной формы билинейными функциями с учётом геометрической нелинейности.

Аппроксимация замыкающих уравнений произвольной формы билинейными функциями для геометрически нелинейной модели [1, 14] сплошной среды представлена на рис. 1 и 2.

Секущие модули объёмного расширения (сжатия)  $K^* = K^*(\varepsilon^*, \Gamma^*)$  и сдвига  $G^* = G^*(\varepsilon^*, \Gamma^*)$  для геометрически нелинейной модели на первом прямолинейном участке диаграмм  $\sigma^* \approx \varepsilon^*$  и  $T^* \approx \Gamma^*$  будут определяться выражениями:

$$K^* = \frac{1}{3} K_0^* = \text{const}, \quad (1)$$

$$G^* = G_0^* = \text{const}. \quad (2)$$

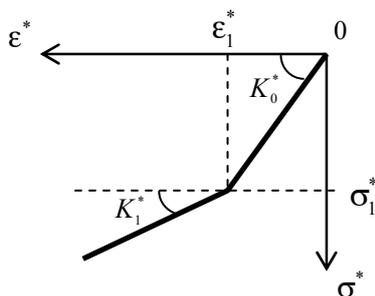


Рис. 1. Диаграмма  $\sigma^* \approx \varepsilon^*$

Figure 1. Chart  $\sigma^* \approx \varepsilon^*$

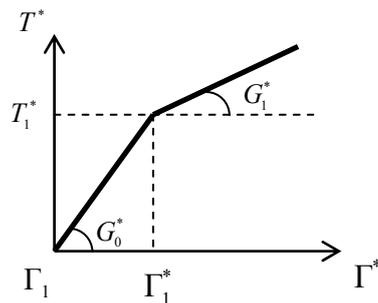


Рис. 2. Диаграмма  $T^* \approx \Gamma^*$

Figure 2. Chart  $T^* \approx \Gamma^*$

На втором прямолинейном участке диаграмм  $\sigma^* \approx \varepsilon^*$  и  $T^* \approx \Gamma^*$  секущий модуль объёмного расширения (сжатия)  $K^* = K^*(\varepsilon^*, \Gamma^*)$  и секущий модуль сдвига  $G^* = G^*(\varepsilon^*, \Gamma^*)$  будут определяться выражениями:

$$K^* = K^*(\varepsilon^*) = \frac{1}{3} \left[ K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \neq \text{const}, \quad (3)$$

$$G^* = G^*(\Gamma^*) = G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \neq \text{const}. \quad (4)$$

Здесь  $K_0^*$  – геометрически нелинейный аналог начального модуля объёмного расширения (сжатия);  $G_0^*$  – геометрически нелинейный аналог начального модуля сдвига;  $K_1^*$  – геометрически нелинейный аналог модуля упрочнения при объёмном расширении (сжатии);  $G_1^*$  – геометрически нелинейный аналог модуля упрочнения при сдвиге;  $\sigma^*$  – первый инвариант тензора обобщённых напряжений;  $\varepsilon^*$  – первый инвариант тензора нелинейных деформаций;  $T^*$  – интенсивность обобщённых касательных напряжений;  $\Gamma^*$  – интенсивность нелинейных деформаций сдвига.

При плоской деформации в декартовых координатах с учётом геометрической нелинейности  $\varepsilon^* = \varepsilon_{xx}^* + \varepsilon_{yy}^*$  и  $\Gamma^* = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*)^2 + \varepsilon_{xx}^{*2} + \varepsilon_{yy}^{*2} + \frac{3}{2} \varepsilon_{xy}^{*2}}$ , причём

$$\varepsilon_{xx}^* = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]; \quad \varepsilon_{yy}^* = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right];$$

$$\varepsilon_{xy}^* = \varepsilon_{yx}^* = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y}.$$

Кроме того,

$$\frac{\partial \varepsilon_{xy}^*}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_{yx}^*}{\partial x} = \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y};$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{xy}^*}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon_{yx}^*}{\partial y} = \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2};$$

$$\frac{\partial \varepsilon^*}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_{xx}^*}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{yy}^*}{\partial x} = \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y};$$

$$\frac{\partial \varepsilon^*}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon_{xx}^*}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{yy}^*}{\partial y} = \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2};$$

$$\frac{\partial \Gamma^*}{\partial x} = \frac{2}{3\Gamma^*} \left[ (2\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*) \frac{\partial \varepsilon_{xx}^*}{\partial x} + (2\varepsilon_{yy}^* - \varepsilon_{xx}^*) \frac{\partial \varepsilon_{yy}^*}{\partial x} + \frac{3}{2} \frac{\partial \varepsilon_{xy}^*}{\partial x} \varepsilon_{xy}^* \right];$$

$$\frac{\partial \Gamma^*}{\partial y} = \frac{2}{3\Gamma^*} \left[ (2\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*) \frac{\partial \varepsilon_{xx}^*}{\partial y} + (2\varepsilon_{yy}^* - \varepsilon_{xx}^*) \frac{\partial \varepsilon_{yy}^*}{\partial y} + \frac{3}{2} \frac{\partial \varepsilon_{xy}^*}{\partial y} \varepsilon_{xy}^* \right].$$

Рассмотрим шесть основных случаев физических зависимостей при учёте геометрической нелинейности.

*Случай 1:*  $K_0^* \neq K_1^*$ ,  $G_0^* \neq G_1^*$ . Точки излома билинейных диаграмм совпадают, то есть  $|\varepsilon_1^*| = \Gamma_1^*$ . При этом  $0 \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_1^*|$  и  $0 \leq \Gamma^* \leq \Gamma_1^*$ .

Точки излома билинейных диаграмм не совпадают, то есть  $|\varepsilon_1^*| < \Gamma_1^*$ . При этом  $0 \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_1^*|$  и  $0 \leq \Gamma^* \leq \Gamma_0^* < \Gamma_1^*$ . Здесь интенсивности  $\Gamma_0^*$  соответствуют такие компоненты деформации, что  $|\varepsilon_{xx}^* + \varepsilon_{yy}^*| = |\varepsilon_1^*|$ .

Точки излома билинейных диаграмм не совпадают, то есть  $|\varepsilon_1^*| > \Gamma_1^*$ . При этом  $0 \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_0^*| < |\varepsilon_1^*|$  и  $0 \leq \Gamma^* \leq \Gamma_1^*$ . Здесь объёмной деформации  $\varepsilon_0^*$  соответствуют такие

компоненты деформации, что  $\sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*)^2 + \varepsilon_{xx}^{*2} + \varepsilon_{yy}^{*2} + \frac{3}{2} \varepsilon_{xy}^{*2}} = \Gamma_1^*$ .

В этом случае физические уравнения плоской деформации с учётом формул (1) и (2) будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^* &= \frac{1}{3}K_0^*\varepsilon^* + 2G_0^*\left(\varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right); \\ \sigma_{yy}^* &= \frac{1}{3}K_0^*\varepsilon^* + 2G_0^*\left(\varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right); \\ \sigma_{xy}^* &= \sigma_{yx}^* = G_0^*\varepsilon_{xy}^*, \quad \sigma_{zz}^* = \left(\frac{1}{3}K_0^* - \frac{2}{3}G_0^*\right)\varepsilon^*.\end{aligned}\quad (5)$$

*Случай 2:*  $K_0^* \neq K_1^*$ ,  $G_0^* \neq G_1^*$ . Точки излома билинейных диаграмм не совпадают, то есть  $|\varepsilon_1^*| < \Gamma_1^*$ . При этом  $|\varepsilon_1^*| \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_0^*|$  и  $\Gamma_0^* \leq \Gamma^* \leq \Gamma_1^*$ . Здесь объёмной деформации  $\varepsilon_0^*$  соответствуют такие компоненты деформации, что  $\sqrt{\frac{2}{3}\sqrt{(\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*)^2 + \varepsilon_{xx}^{*2} + \varepsilon_{yy}^{*2} + \frac{3}{2}\varepsilon_{xy}^{*2}}} = \Gamma_1^*$ , а интенсивности  $\Gamma_0^*$  соответствуют такие компоненты деформации, что  $|\varepsilon_{xx}^* + \varepsilon_{yy}^*| = |\varepsilon_1^*|$ .

В этом случае физические уравнения плоской деформации с учётом формул (2) и (3) будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^* &= \frac{1}{3}\left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*)\frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*}\right]\varepsilon^* + 2G_0^*\left(\varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right); \\ \sigma_{yy}^* &= \frac{1}{3}\left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*)\frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*}\right]\varepsilon^* + 2G_0^*\left(\varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right); \\ \sigma_{xy}^* &= \sigma_{yx}^* = G_0^*\varepsilon_{xy}^*; \\ \sigma_{zz}^* &= \left\{\frac{1}{3}\left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*)\frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*}\right] - \frac{2}{3}G_0^*\right\}\varepsilon^*.\end{aligned}\quad (6)$$

*Случай 3:*  $K_0^* \neq K_1^*$ ,  $G_0^* \neq G_1^*$ . Точки излома билинейных диаграмм не совпадают, то есть  $|\varepsilon_1^*| > \Gamma_1^*$ . При этом  $|\varepsilon_0^*| \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_1^*|$  и  $\Gamma_1^* \leq \Gamma^* \leq \Gamma_0^*$ . Здесь объёмной деформации  $\varepsilon_0^*$  соответствуют такие компоненты деформации, что  $\sqrt{\frac{2}{3}\sqrt{(\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*)^2 + \varepsilon_{xx}^{*2} + \varepsilon_{yy}^{*2} + \frac{3}{2}\varepsilon_{xy}^{*2}}} = \Gamma_1^*$ , а интенсивности  $\Gamma_0^*$  соответствуют такие компоненты деформации, что  $|\varepsilon_{xx}^* + \varepsilon_{yy}^*| = |\varepsilon_1^*|$ .

В этом случае физические уравнения плоской деформации с учётом формул (1) и (4) будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^* &= \frac{1}{3}K_0^*\varepsilon^* + 2\left[G_1^* + (G_0^* - G_1^*)\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*}\right]\left(\varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right); \\ \sigma_{yy}^* &= \frac{1}{3}K_0^*\varepsilon^* + 2\left[G_1^* + (G_0^* - G_1^*)\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*}\right]\left(\varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right); \\ \sigma_{xy}^* &= \sigma_{yx}^* = \left[G_1^* + (G_0^* - G_1^*)\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*}\right]\varepsilon_{xy}^*; \\ \sigma_{zz}^* &= \left\{\frac{1}{3}K_0^* - \frac{2}{3}\left[G_1^* + (G_0^* - G_1^*)\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*}\right]\right\}\varepsilon^*.\end{aligned}\quad (7)$$

*Случай 4:*  $K_0^* \neq K_1^*$ ,  $G_0^* \neq G_1^*$ . Точки излома билинейных диаграмм совпадают, то есть  $|\varepsilon_1^*| = \Gamma_1^*$ . При этом  $|\varepsilon^*| \geq |\varepsilon_1^*|$  и  $\Gamma^* \geq \Gamma_1^*$ .

Точки излома билинейных диаграмм не совпадают, то есть  $|\varepsilon_1^*| < \Gamma_1^*$ . При этом  $|\varepsilon^*| \geq |\varepsilon_0^*|$  и  $\Gamma \geq \Gamma_1^*$ . Здесь объёмной деформации  $\varepsilon_0^*$  соответствуют такие компоненты деформации, что  $\sqrt{\frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*)^2 + \varepsilon_{xx}^{*2} + \varepsilon_{yy}^{*2} + \frac{3}{2} \varepsilon_{xy}^{*2}}} = \Gamma_1^*$ .

Точки излома билинейных диаграмм не совпадают, то есть  $|\varepsilon_1^*| > \Gamma_1^*$ . При этом  $|\varepsilon^*| \geq |\varepsilon_1^*|$  и  $\Gamma^* \geq \Gamma_0^*$ . Здесь интенсивности  $\Gamma_0^*$  соответствуют такие компоненты деформации, что  $|\varepsilon_{xx}^* + \varepsilon_{yy}^*| = |\varepsilon_1^*|$ .

В этом случае физические уравнения плоской деформации с учётом формул (2) и (4) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^* &= \frac{1}{3} \left[ K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \varepsilon^* + 2 \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \left( \varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right); \\ \sigma_{yy}^* &= \frac{1}{3} \left[ K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \varepsilon^* + 2 \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \left( \varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right); \\ \sigma_{xy}^* &= \sigma_{yx}^* = \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \varepsilon_{xy}^*; \\ \sigma_{zz}^* &= \left\{ \frac{1}{3} \left[ K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] - \frac{2}{3} \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \right\} \varepsilon^*. \end{aligned} \tag{8}$$

*Случай 5:*  $K_0^* = K_1^*$ ,  $G_0^* \neq G_1^*$ . Точка излома на диаграмме  $\sigma^* \approx \varepsilon^*$  отсутствует. При этом, если  $0 \leq \Gamma^* \leq \Gamma_1^*$ , то физические уравнения плоской деформации будут иметь вид (5); если  $\Gamma^* \geq \Gamma_1^*$ , то физические уравнения плоской деформации будут иметь вид (7).

*Случай 6:*  $K_0^* \neq K_1^*$ ,  $G_0^* = G_1^*$ . Точка излома на диаграмме  $T^* \approx \Gamma^*$  отсутствует. При этом, если  $0 \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_1^*|$ , то физические уравнения плоской деформации будут иметь вид (5); если  $|\varepsilon^*| \geq |\varepsilon_1^*|$ , то физические уравнения плоской деформации будут иметь вид (6).

**Построение дифференциальных уравнений.** Подставив физические уравнения (5) – (8) в дифференциальные уравнения равновесия плоской деформации сплошной среды в декартовых координатах при учёте геометрической нелинейности [1]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \sigma_{xx}^* + \frac{\partial u}{\partial y} \sigma_{xy}^* \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \sigma_{yx}^* + \frac{\partial u}{\partial y} \sigma_{yy}^* \right] + DF_x = 0; \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\partial v}{\partial x} \sigma_{xx}^* + \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \sigma_{xy}^* \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{\partial v}{\partial x} \sigma_{yx}^* + \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \sigma_{yy}^* \right] + DF_y = 0, \end{cases} \tag{9}$$

получим четыре вида разрешающих уравнений в перемещениях, имеющих одну и ту же структуру:

$$\begin{cases} A_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + B_1 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + C_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + D_1 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_1 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + F_1 \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + DF_x = 0; \\ A_2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + B_2 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + C_2 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + D_2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + F_2 \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + DF_y = 0. \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{Здесь } D = \begin{vmatrix} 1 + \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \end{vmatrix}.$$

Коэффициенты  $A_1, B_1, C_1, D_1, E_1, F_1$  и  $A_2, B_2, C_2, D_2, E_2, F_2$  в уравнениях (10) зависят от вида физических уравнений.

1. Для физических уравнений (5) получим:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{3} K_0^* \varepsilon^* + 2G_0^* \left( \varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) + \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left( \frac{1}{3} K_0^* + \frac{4}{3} G_0^* \right) + G_0^* \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2; \\ B_1 &= \frac{1}{3} K_0^* \varepsilon^* + 2G_0^* \left( \varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \left( \frac{1}{3} K_0^* + \frac{4}{3} G_0^* \right) + G_0^* \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2; \\ C_1 &= 2G_0^* \varepsilon_{xy}^* + 2 \frac{\partial u}{\partial y} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left( \frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_0^* \right) + 2G_0^* \frac{\partial u}{\partial y} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right); \\ D_1 &= \frac{\partial v}{\partial x} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left( \frac{1}{3} K_0^* + \frac{4}{3} G_0^* \right) + G_0^* \frac{\partial u}{\partial y} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right); \\ E_1 &= \frac{\partial u}{\partial y} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \left( \frac{1}{3} K_0^* + \frac{4}{3} G_0^* \right) + G_0^* \frac{\partial v}{\partial x} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right); \\ F_1 &= \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \left( \frac{1}{3} K_0^* + \frac{1}{3} G_0^* \right) + \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \left( \frac{1}{3} K_0^* + \frac{1}{3} G_0^* \right); \\ A_2 &= \frac{\partial v}{\partial x} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left( \frac{1}{3} K_0^* + \frac{4}{3} G_0^* \right) + G_0^* \frac{\partial u}{\partial y} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right); \\ B_2 &= \frac{\partial u}{\partial y} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \left( \frac{1}{3} K_0^* + \frac{4}{3} G_0^* \right) + G_0^* \frac{\partial v}{\partial x} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right); \\ C_2 &= \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \left( \frac{1}{3} K_0^* + \frac{1}{3} G_0^* \right) + \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \left( \frac{1}{3} K_0^* + \frac{1}{3} G_0^* \right); \\ D_2 &= \frac{1}{3} K_0^* \varepsilon^* + 2G_0^* \left( \varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \left( \frac{1}{3} K_0^* + \frac{4}{3} G_0^* \right) + G_0^* \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2; \\ E_2 &= \frac{1}{3} K_0^* \varepsilon^* + 2G_0^* \left( \varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) + \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \left( \frac{1}{3} K_0^* + \frac{4}{3} G_0^* \right) + G_0^* \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2; \\ F_2 &= 2G_0^* \varepsilon_{xy}^* + 2 \frac{\partial v}{\partial x} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \left( \frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_0^* \right) + 2G_0^* \frac{\partial v}{\partial x} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

2. Для физических уравнений (6):

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \frac{1}{3}K_1^*\varepsilon^* + 2G_0^*\left(\varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right) + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \left(\frac{1}{3}K_1^* + \frac{4}{3}G_0^*\right) + G_0^*\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2; \\
 B_1 &= \frac{1}{3}K_1^*\varepsilon^* + 2G_0^*\left(\varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right) + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \left(\frac{1}{3}K_1^* + \frac{4}{3}G_0^*\right) + G_0^*\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)^2; \\
 C_1 &= 2G_0^*\varepsilon_{xy}^* + 2\frac{\partial u}{\partial y}\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)\left(\frac{1}{3}K_1^* - \frac{2}{3}G_0^*\right) + 2G_0^*\frac{\partial u}{\partial y}\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right); \\
 D_1 &= \frac{\partial v}{\partial x}\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)\left(\frac{1}{3}K_1^* + \frac{4}{3}G_0^*\right) + G_0^*\frac{\partial u}{\partial y}\left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right); \\
 E_1 &= \frac{\partial u}{\partial y}\left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right)\left(\frac{1}{3}K_1^* + \frac{4}{3}G_0^*\right) + G_0^*\frac{\partial v}{\partial x}\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right); \\
 F_1 &= \frac{\partial u}{\partial y}\frac{\partial v}{\partial x}\left(\frac{1}{3}K_1^* + \frac{1}{3}G_0^*\right) + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)\left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right)\left(\frac{1}{3}K_1^* + \frac{1}{3}G_0^*\right);
 \end{aligned}$$

(12)

$$\begin{aligned}
 A_2 &= \frac{\partial v}{\partial x}\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)\left(\frac{1}{3}K_1^* + \frac{4}{3}G_0^*\right) + G_0^*\frac{\partial u}{\partial y}\left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right); \\
 B_2 &= \frac{\partial u}{\partial y}\left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right)\left(\frac{1}{3}K_1^* + \frac{4}{3}G_0^*\right) + G_0^*\frac{\partial v}{\partial x}\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right); \\
 C_2 &= \frac{\partial u}{\partial y}\frac{\partial v}{\partial x}\left(\frac{1}{3}K_1^* + \frac{1}{3}G_0^*\right) + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)\left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right)\left(\frac{1}{3}K_1^* + \frac{1}{3}G_0^*\right); \\
 D_2 &= \frac{1}{3}K_1^*\varepsilon^* + 2G_0^*\left(\varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 \left(\frac{1}{3}K_1^* + \frac{4}{3}G_0^*\right) + G_0^*\left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2; \\
 E_2 &= \frac{1}{3}K_1^*\varepsilon^* + 2G_0^*\left(\varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right) + \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \left(\frac{1}{3}K_1^* + \frac{4}{3}G_0^*\right) + G_0^*\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2; \\
 F_2 &= 2G_0^*\varepsilon_{xy}^* + 2\frac{\partial v}{\partial x}\left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right)\left(\frac{1}{3}K_1^* - \frac{2}{3}G_0^*\right) + 2G_0^*\frac{\partial v}{\partial x}\left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right).
 \end{aligned}$$

3. Для физических уравнений (7):

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \frac{1}{3}K_0^*\varepsilon^* + 2\left[G_1^* + (G_0^* - G_1^*)\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*}\right]\left(\varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right) + \\
 &\quad + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \left[\frac{1}{3}K_0^* - \frac{2}{3}G_1^* - \frac{2}{3}(G_0^* - G_1^*)\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*}\right] + b_{11}\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) - b_{15}\frac{\partial u}{\partial y}; \\
 B_1 &= \frac{1}{3}K_0^*\varepsilon^* + 2\left[G_1^* + (G_0^* - G_1^*)\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*}\right]\left(\varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right) + \\
 &\quad + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \left[\frac{1}{3}K_0^* - \frac{2}{3}G_1^* - \frac{2}{3}(G_0^* - G_1^*)\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*}\right] - b_{14}\frac{\partial u}{\partial y} + b_{16}\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_1 &= 2 \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \varepsilon_{xy}^* + 2 \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial u}{\partial y} \left[ \frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - \\
 &\quad - b_{12} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) - b_{13} \frac{\partial u}{\partial y} - b_{15} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) + b_{16} \frac{\partial u}{\partial y}; \\
 D_1 &= \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial v}{\partial x} \left[ \frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] + b_{11} \frac{\partial v}{\partial x} - b_{15} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right); \\
 E_1 &= \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial u}{\partial y} \left[ \frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - b_{14} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + b_{16} \frac{\partial v}{\partial x}; \\
 F_1 &= \left[ \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} \right] \left[ \frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - \\
 &\quad - b_{12} \frac{\partial v}{\partial x} - b_{13} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - b_{15} \frac{\partial v}{\partial x} + b_{16} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right).
 \end{aligned}$$

(13)

$$\begin{aligned}
 A_2 &= \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial v}{\partial x} \left[ \frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] + b_{21} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) - b_{25} \frac{\partial u}{\partial y}; \\
 B_2 &= \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial u}{\partial y} \left[ \frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - b_{24} \frac{\partial u}{\partial y} + b_{26} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right); \\
 C_2 &= \left[ \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} \right] \left[ \frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - \\
 &\quad - b_{22} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) - b_{23} \frac{\partial u}{\partial y} - b_{25} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) + b_{26} \frac{\partial u}{\partial y}; \\
 D_2 &= \frac{1}{3} K_0^* \varepsilon^* + 2 \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \left( \varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) + \\
 &\quad + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \left[ \frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] + b_{21} \frac{\partial v}{\partial x} - b_{25} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right); \\
 E_2 &= \frac{1}{3} K_0^* \varepsilon^* + 2 \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \left( \varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) + \\
 &\quad + \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \left[ \frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - b_{24} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + b_{26} \frac{\partial v}{\partial x}; \\
 F_2 &= 2 \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \varepsilon_{xy}^* + 2 \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial v}{\partial x} \left[ \frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - \\
 &\quad - b_{22} \frac{\partial v}{\partial x} - b_{23} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - b_{25} \frac{\partial v}{\partial x} + b_{26} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right).
 \end{aligned}$$

4. Для физических уравнений (8):

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \frac{1}{3} \left[ K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \varepsilon^* + 2 \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \left( \varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) + \\
 &\quad + \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \left[ \frac{1}{3} K_1^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] + b_{11} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) - b_{15} \frac{\partial u}{\partial y}; \\
 B_1 &= \frac{1}{3} \left[ K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \varepsilon^* + 2 \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \left( \varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) + \\
 &\quad + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \left[ \frac{1}{3} K_1^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - b_{14} \frac{\partial u}{\partial y} + b_{16} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right); \\
 C_1 &= 2 \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \varepsilon_{xy}^* + 2 \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial u}{\partial y} \left[ \frac{1}{3} K_1^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - \\
 &\quad - b_{12} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) - b_{13} \frac{\partial u}{\partial y} - b_{15} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) + b_{16} \frac{\partial u}{\partial y}; \\
 D_1 &= \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial v}{\partial x} \left[ \frac{1}{3} K_1^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] + b_{11} \frac{\partial v}{\partial x} - b_{15} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right); \\
 E_1 &= \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial u}{\partial y} \left[ \frac{1}{3} K_1^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - b_{14} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + b_{16} \frac{\partial v}{\partial x}; \\
 F_1 &= \left[ \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} \right] \left[ \frac{1}{3} K_1^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - \\
 &\quad - b_{12} \frac{\partial v}{\partial x} - b_{13} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - b_{15} \frac{\partial v}{\partial x} + b_{16} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right).
 \end{aligned}$$

(14)

$$\begin{aligned}
 A_2 &= \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial v}{\partial x} \left[ \frac{1}{3} K_1^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] + b_{21} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) - b_{25} \frac{\partial u}{\partial y}; \\
 B_2 &= \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial u}{\partial y} \left[ \frac{1}{3} K_1^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - b_{24} \frac{\partial u}{\partial y} + b_{26} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right); \\
 C_2 &= \left[ \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} \right] \left[ \frac{1}{3} K_1^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - \\
 &\quad - b_{22} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) - b_{23} \frac{\partial u}{\partial y} - b_{25} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) + b_{26} \frac{\partial u}{\partial y}; \\
 D_2 &= \frac{1}{3} \left[ K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \varepsilon^* + 2 \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \left( \varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) + \\
 &\quad + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \left[ \frac{1}{3} K_1^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] + b_{21} \frac{\partial v}{\partial x} - b_{25} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right); \\
 E_2 &= \frac{1}{3} \left[ K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \varepsilon^* + 2 \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \left( \varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) + \\
 &\quad + \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \left[ \frac{1}{3} K_1^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - b_{24} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + b_{26} \frac{\partial v}{\partial x};
 \end{aligned}$$

$$F_2 = 2 \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \varepsilon_{xy}^* + 2 \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial v}{\partial x} \left[ \frac{1}{3} K_1^* - \frac{2}{3} G_1^* - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] -$$

$$- b_{22} \frac{\partial v}{\partial x} - b_{23} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - b_{25} \frac{\partial v}{\partial x} + b_{26} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right).$$

В уравнениях (13) и (14)

$$b_{11} = 2 \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left\{ \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) (2\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*) \left( \varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}} \right\} -$$

$$- \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial y} (G_0^* - G_1^*) (2\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*) \frac{\varepsilon_{xy}^* \Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}};$$

$$b_{12} = \frac{2}{3} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) (G_0^* - G_1^*) (2\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*) \frac{\varepsilon_{xy}^* \Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}} + \frac{4}{3} \frac{\partial u}{\partial y} (G_0^* - G_1^*) (2\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*) \times$$

$$\times \left( \varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}};$$

$$b_{13} = \frac{4}{3} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) (G_0^* - G_1^*) (2\varepsilon_{yy}^* - \varepsilon_{xx}^*) \left( \varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}} + \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial y} (G_0^* - G_1^*) \times$$

$$\times (2\varepsilon_{yy}^* - \varepsilon_{xx}^*) \frac{\varepsilon_{xy}^* \Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}};$$

$$b_{14} = \frac{2}{3} \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) (G_0^* - G_1^*) (2\varepsilon_{yy}^* - \varepsilon_{xx}^*) \frac{\varepsilon_{xy}^* \Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}} -$$

$$- 2 \frac{\partial u}{\partial y} \left\{ \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) (2\varepsilon_{yy}^* - \varepsilon_{xx}^*) \left( \varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}} \right\};$$

$$b_{15} = 2 \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) (G_0^* - G_1^*) \left( \varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) \frac{\varepsilon_{xy}^* \Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}} - \frac{\partial u}{\partial y} \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \left( 1 - \frac{\varepsilon_{xy}^{*2}}{\Gamma^{*2}} \right) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right];$$

$$b_{16} = \left( 1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \left( 1 - \frac{\varepsilon_{xy}^{*2}}{\Gamma^{*2}} \right) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - 2 \frac{\partial u}{\partial y} (G_0^* - G_1^*) \left( \varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) \frac{\varepsilon_{xy}^* \Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}};$$

$$b_{21} = 2 \frac{\partial v}{\partial x} \left\{ \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) (2\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*) \left( \varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}} \right\} -$$

$$- \frac{2}{3} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) (G_0^* - G_1^*) (2\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*) \frac{\varepsilon_{xy}^* \Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}};$$

$$b_{22} = \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial x} (G_0^* - G_1^*) (2\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*) \frac{\varepsilon_{xy}^* \Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}} + \frac{4}{3} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) (G_0^* - G_1^*) (2\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*) \times$$

$$\times \left( \varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}};$$

$$b_{23} = \frac{4}{3} \frac{\partial v}{\partial x} (G_0^* - G_1^*) (2\varepsilon_{yy}^* - \varepsilon_{xx}^*) \left( \varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}} + \frac{2}{3} \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) (G_0^* - G_1^*) \times$$

$$\times (2\varepsilon_{yy}^* - \varepsilon_{xx}^*) \frac{\varepsilon_{xy}^* \Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}};$$

$$\begin{aligned}
 b_{24} &= \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial x} (G_0^* - G_1^*) (2\varepsilon_{yy}^* - \varepsilon_{xx}^*) \frac{\varepsilon_{xy}^* \Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}} - \\
 &\quad - 2 \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \left\{ \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] - \frac{2}{3} (G_0^* - G_1^*) (2\varepsilon_{yy}^* - \varepsilon_{xx}^*) \left( \varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3} \varepsilon_{xx}^* \right) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}} \right\}; \\
 b_{25} &= 2 \frac{\partial v}{\partial x} (G_0^* - G_1^*) \left( \varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3} \varepsilon_{yy}^* \right) \frac{\varepsilon_{xy}^* \Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}} - \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \left( 1 - \frac{\varepsilon_{xy}^{*2}}{\Gamma^{*2}} \right) \right]; \\
 b_{26} &= \frac{\partial v}{\partial x} \left[ G_1^* + (G_0^* - G_1^*) \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \left( 1 - \frac{\varepsilon_{xy}^{*2}}{\Gamma^{*2}} \right) \right] - 2 \left( 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) (G_0^* - G_1^*) \left( \varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3} \varepsilon_{xx}^* \right) \frac{\varepsilon_{xy}^* \Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}}.
 \end{aligned}$$

Кроме того,

$$\begin{aligned}
 \Gamma^* &= \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{xx}^* - \varepsilon_{yy}^*)^2 + \varepsilon_{xx}^{*2} + \varepsilon_{yy}^{*2} + \frac{3}{2} \varepsilon_{xy}^{*2}} = \\
 &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left\langle \left[ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] - \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \right]^2 + \right. \\
 &\quad \left. + \left[ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \right]^2 + \left[ \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \right]^2 + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{3}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right]^2 \right\rangle^{\frac{1}{2}}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, дифференциальные уравнения в перемещениях для плоской деформации сплошной среды в декартовых координатах при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений с учётом геометрической нелинейности построены.

**Заключение.** Дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях в декартовых координатах могут найти применение при определении напряжённо-деформированного состояния сплошных сред, которые находятся в условиях плоской деформации с учётом геометрической нелинейности и физические соотношения для которых аппроксимированы билинейными функциями.

Дальнейшим развитием данной работы может быть определение рационального положения точек излома на диаграммах объёмного и сдвигового деформирования в зависимости от вида аппроксимируемых функций.

#### Список литературы

1. Новожилов, В.В. Теория упругости / В.В. Новожилов. – М.: Судпромгиз, 1958. – 370 с.
2. Лурье, А.И. Нелинейная теория упругости / А.И. Лурье – М.: Наука, 1980. – 512 с.
3. Гениев, Г.А. К вопросу о деформационной теории пластичности сыпучей среды / Г.А. Гениев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1974. – №4. – С.8-10.
4. Гениев, Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г.А. Гениев, В.Н. Киссюк, Г.А. Тюпин. – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с.
5. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.

6. Свистков, А.Л. Дифференциальные определяющие уравнения несжимаемых сред при конечных деформациях / А.Л. Свистков, Б. Лауке // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50, № 3 (295). – С. 158–170.
7. Ошхунов, М.М. Моделирование свойств деформируемых сред взаимодействующими частицами / М.М. Ошхунов, З.В. Нагоев // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. – 2014. – № 19 (190). – С. 155–163.
8. Бондарь, В.Д. Плоская задача в деформациях для несжимаемого нелинейно-упругого тела / В.Д. Бондарь // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50, № 2 (294). – С. 216–225.
9. Панов, А.Д. Теория определяющих соотношений при деформировании изотропного твёрдого тела / А.Д. Панов // Известия Российской академии наук. Механика твёрдого тела. – 2004. – № 6. – С. 27.
10. Лурье, С.А. Вариационная формулировка математических моделей сред с микроструктурами / С.А. Лурье, П.А. Белов // Вестник Пермского государственного технического университета. Математическое моделирование систем и процессов. – 2006. – № 14. – С. 114–132.
11. Jirásek, M. Nonlocal Theories in Continuum Mechanics / M. Jirásek // Acta Polytechnica. – 2004. – 44(5–6).
12. Бакушев, С.В. Геометрически и физически нелинейная механика сплошной среды: Плоская задача / С.В. Бакушев. – М.: Книжный дом «Либроком», 2013. – 312 с.

## References

1. Novozhilov, V.V. The theory of elasticity / V.V. Novozhilov. – М.: Sudpromgiz, 1958. – 370 p.
2. Lurie, A.I. The theory of elasticity / A.I. Lurie. – М.: Nauka, 1970. – 939 p.
3. Geniev, G.A. About the question of the deformation theory of plasticity of granular medium / G.A. Geniev // Building mechanics and Structural analysis. – 1974. – No.4. – P. 8–10.
4. Geniev, G.A. Theory of plasticity of concrete and steel concrete / G.A. Geniev, V.N. Kissyuk, G.A. Tyupin. – М.: Stroizdat, 1974. – 316 p.
5. Karpenko, N.I. General models of iron-concrete mechanics / N.I. Karpenko. – М.: Stroizdat, 1996. – 416 p.
6. Svistkov, A.L. Differential equation determiners of incompressible medium in final strain / A.L. Svistkov, B. Lauke // Applied Mechanics and technical Physics. – 2009. – V. 50, N3 (295). – P.158–170.
7. Ochunov, M.M. Property modeling of deformable Wednesday interacting particles / M.M. Ochunov, Z.V. Nagoev // Scientific statements, Belgorod State University. Series: Mathematics. Physics. – 2014. – N19 (190). – P. 155–163.
8. Bondar, V.D. Flat task in deformations for nonlinear incompressible elastic body / V.D. Bondar // Journal of applied mechanics and technical physics. – 2009. – V. 50, N2 (294). – P. 216–225.
9. Panov, A.D. Theory of defining relations with deformation isotropic solid / A.D. Panov // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Rigid body mechanics. – 2004. – N6. – P. 27.
10. Lurie, S.A. Variational formulation of mathematical models Wednesday with microstructures / S.A. Lurie, P.A. Belov // Bulletin of the Perm State Technical University. Mathematical modeling of systems and processes. – 2006. – N14. – P.114–132.
11. Jirásek, M. Nonlocal Theories in Continuum Mechanics / M. Jirásek // Acta Polytechnica. – 2004. – 44(5–6).
12. Bakushev, S.V. Geometrical and physic non-linear mechanic of continuous mediums: Plane problem / S.V. Bakushev. – М.: The Book House «LIBROCOM», 2013. – 312 p.

УДК 69.07

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

*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

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАМ С РАВНОУСТОЙЧИВЫМИ ЧАСТЯМИ

А.И. Шеин

Приводится решение задачи оптимизации многоэтажных эстакад, представляющих собой свободные и/или несвободные рамные системы, для которых характерно исчерпание несущей способности в виде потери устойчивости. Общая задача оптимального проектирования опор транспортной эстакады имеет вид задачи оптимизации многоэтажной рамной системы из условия устойчивости. Анализ работы отдельных элементов рамных систем в существующих проектных решениях показывает, что не все части рамы эффективно участвуют в обеспечении общей устойчивости сооружения. В связи с этим актуальной становится проблема оптимизации элементов рам с обеспечением равноустойчивости отдельных частей. При этом важно знать соотношение оптимальных рам и оптимальных рам с равноустойчивыми звеньями. Оптимизационное решение находится как решение двух задач оптимизации звеньев свободной рамы и двух задач для звеньев несвободной рамы. Установлено, что, составляя раму из оптимальных равноустойчивых частей, мы получаем раму, эквивалентную оптимальной нерасчлененной раме. И, следовательно, справедливо положение, высказанное еще А.Ф. Смирновым, что наиболее рациональной из условия устойчивости системой будет такая, все звенья (части) которой обладают равноустойчивостью. Рама минимальной массы с равноустойчивыми частями является оптимальной из условия устойчивости.

*Ключевые слова: оптимизация, оптимальность, равноустойчивость, устойчивость, метод перемещений, рамы, звенья*

## OPTIMIZATION OF FRAMES WITH EQUALLY STABLE PARTS

A.I. Shein

The solution of the problem of optimization of multi-storey overpasses, which are free and / or non-free frame systems, are characterized by the exhaustion of their bearing capacity in the form of loss of stability. The General problem of optimal design of transport overpass supports is the problem of optimization of multi-storey frame system in the condition of stability. Analysis of the work of individual elements of frame systems in existing design solutions shows that not all parts of the frame are effectively involved in ensuring the overall stability of the structure. In this regard, the problem of optimization frame elements ensuring equal stability of individual parts becomes urgent. It is important to know the ratio of optimal frames and optimal frames with equally stable links. The optimization solution is found as a solution of two problems of optimization of free frame links and two problems for non-free frame links. It is established that by composing the frame of the optimal equidistant parts, we obtain a frame equivalent to the optimal undivided frame. And, therefore, the position expressed by still A.F. Smirnov that the most efficient system from the condition of stability is a system in which all members are equally stability. The frame of the minimum mass with equal optimal parts is from the condition of stability.

*Keywords: optimization, optimality, equal stability, stability, method of movement, frames links*

### Введение

Одним из важных направлений развития строительной механики является разработка методов оптимального проектирования несущих конструкций зданий и сооружений. Решение задач этого направления в первую очередь может обеспечить удешевление конструкций и снижение их материалоемкости.

В последнее время в строительстве все чаще стали применяться многоэтажные конструкции в виде многоярусных рам. При этом несущие элементы каркаса проектируются из материалов с высокими механическими свойствами, что способствует созданию более экономичных и в то же время более гибких элементов. Это приводит к тому, что несущая способность рамных каркасов определяется их устойчивостью в упругой или упруго-пластической стадиях. Анализ работы отдельных элементов рамных систем в существующих проектных решениях показывает, что не все части рамы эффективно участвуют в обеспечении общей устойчивости сооружения. В связи с этим актуальной становится проблема оптимизации элементов рам с обеспечением равноустойчивости отдельных частей.

### Основные соотношения расчетной модели

При оптимизации сечений элементов рамных систем, несущая способность которых определяется их устойчивостью, известными являются конфигурация, опорные закрепления, материал и узловые нагрузки. Оптимизируемая рама состоит из  $n$  стержней неизвестной погонной жесткости на изгиб ( $i_j=x_j$ ), которую примем постоянной в пределах каждого стержня. Требуется найти значения переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , при которых функция веса (объема)  $G = \sum_{i=1}^m \bar{\lambda}_i^2 \cdot x_i$  принимает минимальное значение. Здесь  $\lambda_i$  – конструктивная гибкость  $i$ -го стержня. При этом необходимо, чтобы рама находилась в критическом состоянии и были удовлетворены необходимые условия прочности.

Расчетные схемы многоэтажных эстакад представляют собой свободные и/или несвободные рамные системы, для которых характерно исчерпание несущей способности в виде потери устойчивости. Таким образом, задача оптимального проектирования транспортной эстакады принимает вид задачи оптимизации многоэтажной рамной системы из условия устойчивости. Наиболее важными являются замкнутые решения задач оптимизации, позволяющие получать готовые формулы для проектирования отдельных классов конструкций [1, 3, 5–8].

Будем рассматривать задачу оптимизации рамной системы из условия устойчивости. В качестве аппарата формирования математической модели критического состояния примем метод перемещений с тригонометрическими функциями влияния продольных сил на реакции. Условие критического состояния многоэтажных рам (рис. 1), матрица жесткости которых представляет собой якобиеву матрицу, обычно определяется детерминантным уравнением критического состояния

$$\det [r_{ik}] = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_{32} & r_{33} & r_{34} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & r_{nn-1} & r_{nn} \end{vmatrix} = 0. \quad (1)$$

Здесь  $r_{ik}$  – реакции в дополнительных связях от единичных перемещений узлов, зависящие от неизвестных погонных жесткостей стоек и ригелей и параметров

$$v_j = \sqrt{\frac{N_j \cdot h_j}{x_j}}, \quad (2)$$

где  $N_j$  – продольная сила в стержне;  $h_j$  – длина стержня.

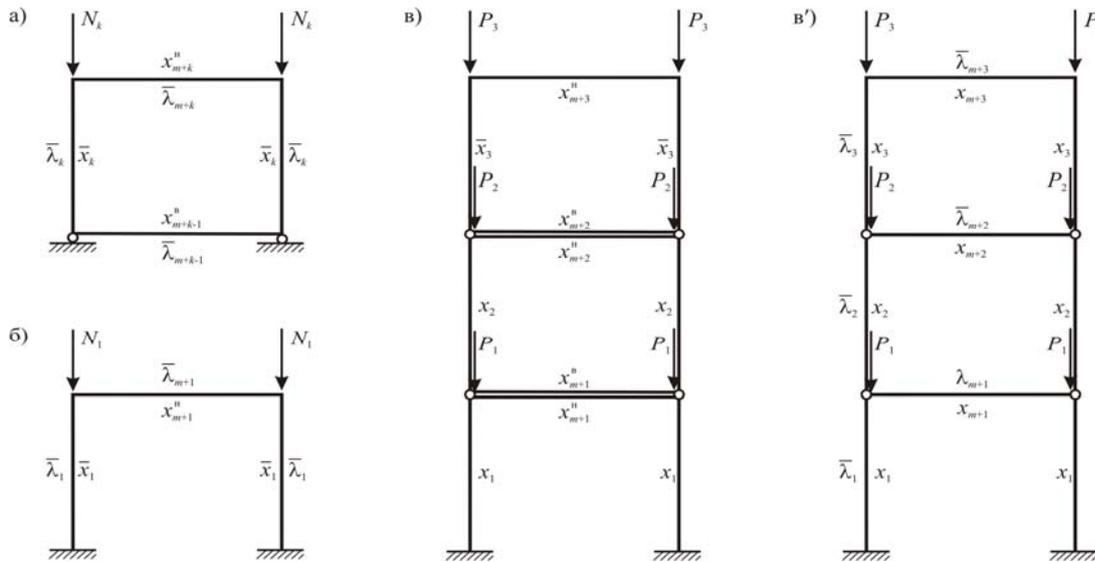


Рис. 1. Свободная рама

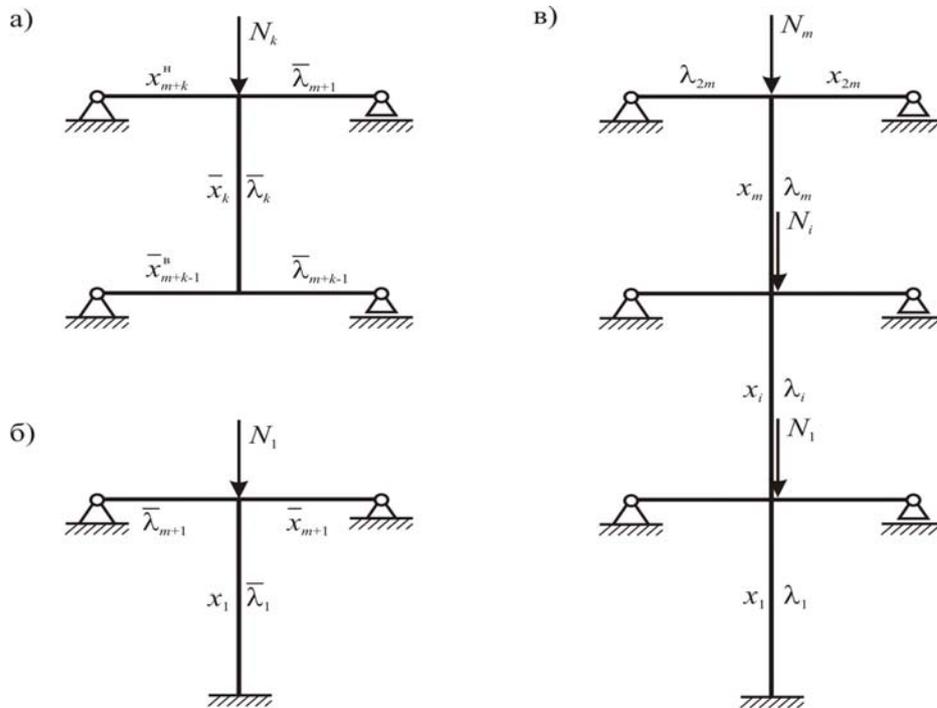


Рис. 2. Несвободная рама

При решении поверочной задачи трансцендентное уравнение, полученное при раскрытии определителя матрицы (1), служит для нахождения критической нагрузки. При этом критическое состояние достигается, как правило, при работе одних частей рам в состоянии стесненной, а других – принужденной потери устойчивости. Это объясняется некоторым произволом в назначении жесткостей рам.

При решении задачи оптимизации жесткостей рам по критерию минимума веса из условия устойчивости уравнение (1) служит для построения пограничной гиперповерхности области устойчивости в  $n$ -мерном пространстве жесткостей. Решением этой задачи является лежащая на гиперповерхности точка с координатами искомых жесткостей. При этом соотношение жесткостей определяется продольными силами в стойках рам.

**Решение оптимизационных задач.** Рассмотрим вопрос об оптимальности рам с равноустойчивыми частями (звеньями). Напомним, что общее решение задачи опти-

мизации представлено в работе [1]. На рис. 1 и рис. 2 показаны отдельные звенья свободных и несвободных рам: на рис. 1б и рис. 2б – звенья первого яруса, на рис. 1а и рис. 2а – звенья  $k$ -го яруса. Обозначим неизвестные жесткости стоек звеньев  $x_k$  нижнего и верхнего ригелей соответственно  $x_{m+k-1}^B$  и  $x_{m+k}^H$ . Определим оптимальные жесткости этих частей из условия критического состояния. Условие критического состояния запишем в виде равенства нулю определителей, составленных из коэффициентов метода перемещений каждой части рамы. Для полного аналитического решения двух задач оптимизации для звеньев свободной рамы и двух задач для звеньев несвободной рамы необходимо рассмотреть следующие математические модели. Для звеньев первого яруса получаем:

найти  $\min$

$$t\bar{\lambda}_1^2 \bar{x}_1 + \bar{\lambda}_{m+1}^2 x_{m+1} \quad (3)$$

при

$$r_{11} = 0, \quad (4)$$

где

$$r_{11} = \bar{x}_1 \frac{v_1}{\operatorname{tg} v_1} + 6x_{m+1}^H, \quad t=2, \quad (5)$$

и

$$r_{11} = 4\bar{x}_1 \varphi_2(v_1) + cx_{m+1}^H, \quad t=1, \quad (6)$$

для свободной и несвободной рам, соответственно. Решив оптимизационную задачу методом Лагранжа, получим:

$$\gamma_1(v_1) = \frac{24\bar{\lambda}_1^2}{\lambda_{m+1}^2}, \quad (7)$$

$$\bar{x}_1 = \frac{N_1 h_1}{v_1^2}, \quad (8)$$

$$x_{m+1}^H = -\frac{1}{6} \bar{x}_1 \frac{v_1}{\operatorname{tg} v_1}, \quad (9)$$

$$\theta(v_1) = \frac{\bar{\lambda}_1^2 c}{\lambda_{m+1}}, \quad (10)$$

$$\bar{x}_{m+1}^H = -\frac{4x_1 \varphi_2(v_1)}{c}. \quad (11)$$

Для 2-го, 3-го, ...,  $k$ -го звеньев задача оптимизации будет иметь вид:

найти 
$$\min V = t\bar{\lambda}_k^2 x_k + \bar{\lambda}_{m+k-1}^2 + \bar{\lambda}_{m+k}^2 x_{m+k}^H \quad (12)$$

при

$$D_k(x) = \begin{bmatrix} r_{k-1,k-1} & r_{k-1,k} \\ r_{k,k-1} & r_{k,k} \end{bmatrix} = 0, \quad (13)$$

где

$$r_{kk} = \bar{x}_k \frac{v_k}{\operatorname{tg} v_k} + 6x_{m+n}^H, \quad (14)$$

$$r_{k,k-1} = -\bar{x}_k \frac{v_k}{\sin v_k}, \quad (15)$$

или

$$r_{kk} = 4\bar{x}_k \varphi(v_k) + cx_{m+k}^H, \quad (16)$$

$$r_{k,k-1} = 2\bar{x}_k \varphi_3(v_k). \quad (17)$$

Ограничения задач преобразуем, согласно методике, описанной в [12], к виду

$$\Psi_{k-1} = \bar{\lambda}_{m+k-1} \cdot r_{k-1,k-1} \pm r_{k-1,k} \cdot \bar{\lambda}_{m+k} = 0, \quad (18)$$

$$\Psi_k = \pm \bar{\lambda}_{m+k-1} \cdot r_{k,k-1} + \bar{\lambda}_{m+k} \cdot r_{k,k} = 0, \quad (19)$$

переходя от определителя к отдельным уравнениям. Трансформированная оптимизационная задача принимает вид:

$$\left. \begin{array}{l} \min V \\ \Psi_{k-1} = 0, \\ \Psi_k = 0. \end{array} \right\}, \quad (21)$$

Условия стационарности

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{x}_n} = t\bar{\lambda}_k^2 + \frac{\partial \Psi_{k-1}}{\partial x_n} \cdot u_{k-1} + \frac{\partial \Psi_k}{\partial \bar{x}_n} u_k = 0, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial x_{m+n}} = \bar{\lambda}_{m+n}^2 + u_k \bar{\lambda}_{m+n} = 0, \\ \Psi_n = 0, n = k, k-1. \end{array} \right\} \quad (22)$$

Подставляя в эту систему выражения для  $\psi$ , получаем окончательно:

$$(\lambda_{m+k-1}^2 + \lambda_{m+k}^2) \cdot \gamma_1(v_k) + 2\bar{\lambda}_{m+k-1} \bar{\lambda}_{m+k} \gamma_2(v_k) = 24\bar{\lambda}_k^2, \quad (23)$$

$$X_k = N_k h_k / v_k^2, \quad (24)$$

$$x_{m+k-1}^e = \left( -x_k \frac{v_k}{\operatorname{tg} v_k} \bar{\lambda}_{m+k-1} + x_k \frac{v_k}{\sin v_k} \bar{\lambda}_{m+k} \right) / (6\bar{\lambda}_{m+k-1}), \quad (25)$$

$$x_{m+h}^H = \left( -x_k \frac{v_k}{\operatorname{tg} v_k} \bar{\lambda}_{m+k} + x_k \frac{v_k}{\sin v_k} \bar{\lambda}_{m+k-1} \right) / (6\bar{\lambda}_{m+k}) \quad (26)$$

для свободных рам;

$$(\lambda_{m+k-1}^2 + \lambda_{m+k}^2) \cdot \theta_1(v_k) + 2\bar{\lambda}_{m+k-1} \bar{\lambda}_{m+k} \theta_2(v_k) = \bar{\lambda}_k^2, \quad (27)$$

$$x_k = N_k h_k / v_k^2, \quad (28)$$

$$x_{m+k-1}^e = \left( -4x_k \varphi_2(v_k) \bar{\lambda}_{m+k-1} + 2x_k \varphi_3(v_k) \bar{\lambda}_{m+k} \right) / (6\bar{\lambda}_{m+k-1}), \quad (29)$$

$$x_{m+k}^H = (-4x_k \varphi_2(v_k) \bar{\lambda}_{m+k} + 2x_k \varphi_3(v_k) \bar{\lambda}_{m+k-1}) / (6\bar{\lambda}_{m+k}) \quad (30)$$

для частей несвободных рам.

Соединим отдельные звенья (рис. 1в и в', 2в), следуя условию

$$N_k = \sum P_n, n = k, k+1, \dots, m. \quad (31)$$

В результате получим:

$$\bar{x}_k = x_k, \quad (32)$$

$$\bar{x}_{m+k} = x_{m+k}^H + x_{m+k}^e. \quad (33)$$

### Выводы

Таким образом, составляя раму из оптимальных равноустойчивых частей, мы получаем раму, эквивалентную оптимальной [1] нерасчлененной раме. И, следовательно, справедливо положение, высказанное еще А.Ф. Смирновым, что наиболее рациональной из условия устойчивости системой будет такая, все звенья (части) которой обладают равноустойчивостью. Рама минимальной массы с равноустойчивыми частями является оптимальной из условия устойчивости.

В рамках с ригелями одинаковой конструктивной гибкости  $\lambda$  условие равноустойчивости может быть записано в виде

$$Z_k = \text{const}, k = 1, 2, 3, 4, \dots, m, \quad (34)$$

где  $m$  – количество этажей системы.

При этом равенство между собой гибкостей стоек приводит к равенству оптимальных параметров продольных усилий

$$v_k = \text{const}, k = 2, 3, 4, \dots, m, \quad (35)$$

и, следовательно, к равенству напряжений в сжатых элементах рам

$$\sigma_k = \frac{N_k}{F_k} = \frac{v_k^2 E}{\lambda_k^2 \ell_k} = \text{const}, k = 2, 3, \dots, m. \quad (36)$$

Аналитическим условием равноустойчивости  $n$  частей конструктивной системы является возможность тождественной замены общего критерия критического состояния  $n$  критериями, и, наоборот, если система описана  $n$  критериями критического состояния, при этом общий критерий обращается в тождество, то эта система является совокупностью  $n$  равноустойчивых звеньев.

Как показано выше, для обеспечения равноустойчивости регулярных систем достаточно ввести в оптимизационную модель условие  $Z_k = \text{const}$ .

В случае проектирования более сложных равноустойчивых конструкций для обеспечения тождественности решений  $n$ -критериальной и однокритериальной задач требуются дополнительные детерминантные условия, обеспечивающие совместность деформации дискретной и континуальной моделей.

### Список литературы

1. Shein, A.I. Analytical Solution of Optimization Problem of Stability of Frame Systems / A.I. Shein, O.G. Zemtsova // International Multi- Conference on Industrial Engineering and Modern technologies IOP 2018 Conf. Series: Materials Science and Engineering 463 (2018) 042065. doi:10.1088/1757- 899X/463/4/042065 (2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 463 042065).

2. Муханов, А.В. Оптимизация строительных конструкций на основе численного и аналитического решения задач механики неоднородных тел: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.В. Муханов. – Ростов н/Д, 2013. – 24 с.
3. Шеин, А.И. Расчёт и оптимизация арматуры композитных систем методом конечных элементов / А.И. Шеин, О.Г. Земцова, Я.А. Азимова // Моделирование и механика конструкций. – 2017. – №6. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no6/stroitel'naya-mehanika/6.2/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no6/stroitel'naya-mehanika/6.2/at_download/file)
4. Мироненко, И.В. Оптимизация конструкций железобетонных балок и рам методом эволюционного моделирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И.В. Мироненко. – Брянск, 2013. – 20 с.
5. Шеин, А.И. Оптимальные размеры прямоугольного сечения бруса при косом изгибе / А.И. Шеин // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. – Том 8, №2. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/116TVN216.pdf> (доступ свободный). – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.
6. Шеин, А.И. Оптимизация многомассовых гасителей колебаний при гармоническом воздействии / А.И. Шеин, О.Г. Земцова // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 1 (13). – С. 113–122.
7. Шеин, А.И. Замкнутое решение задачи оптимизации многоэтажных рамных систем из условия устойчивости/ А.И. Шеин, О.Г. Земцова // Транспортные сооружения. – 2018. – №2. – URL: <https://t-s.today/PDF/06SATS218.pdf> (доступ свободный). – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/06SATS218
8. Земцова, О.Г. Исследование пограничной гиперповерхности области устойчивости в осях жесткостей / О.Г. Земцова, А.И. Шеин // Транспортные сооружения. – 2018. – №2. – URL: <https://t-s.today/PDF/09SATS218.pdf> (доступ свободный). – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/09SATS218

#### References

1. Shein, A.I. Analytical Solution of Optimization Problem of Stability of Frame Systems / A.I. Shein, O.G. Zemtsova // International Multi- Conference on Industrial Engineering and Modern technologies IOP 2018 Conf. Series: Materials Science and Engineering 463 (2018) 042065. doi:10.1088/1757- 899X/463/4/042065 (2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 463 042065).
2. Mukhanov, A.V. Optimization of building structures based on the numerical and analytical solution of the problems of mechanics of inhomogeneous bodies: author. dis. ... CAND. those. Sciences / A.V. Mukhanov. – Rostov-on-Don, 2013. – 24 p.
3. Shein, A.I. Calculation and optimization of reinforcement of composite systems by the finite element method / A.I. Shein, O.G. Zemtsova, Ya.A. Azimova // Modeling and mechanics of structures. – 2017. – №6. – Systems. Requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no6/stroitel'naya-mehanika/6.2/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no6/stroitel'naya-mehanika/6.2/at_download/file)
4. Mironenko, I.V. Optimization of the structures of reinforced concrete beams and frames by the method of evolutionary modeling: author. dis. ... Cand. those. Sciences / I.V.. Mironenko – Bryansk, 2013. – 20 p.
5. Shein, A.I. The optimal dimensions of the rectangular section of the beam at oblique bending / A.I. Shein // Internet magazine «Naukovedenie». – 2016. – Vol. 8, No. 2. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/116TVN216.pdf> (free access). – Title from the screen. – Yaz. Rus.
6. Shein, A.I. Optimization of multi-mass oscillation dampers with harmonic effects / A.I. Shein, O.G. Zemtsova // Izvestiya Vuzov. Volga region. Technical science. – 2010. – № 1 (13). – P. 113–122.
7. Shein, A.I. Closed solution of the problem of optimization of multi-storey frame systems from the condition of stability / A.I. Shein, O.G. Zemtsova // Transport facilities. –

2018. – No. 2. – URL: <https://t-s.today/PDF/06SATS218.pdf> (free access). – The title from the screen. – Yaz rus DOI: 10.15862 / 06SATS218

8. Zemtsova, O.G. Investigation of the boundary hypersurface of the stability domain in the axes of stiffness / O.G. Zemtsova, A.I. Shein // Transport facilities. – 2018. – No. 2. – URL: <https://t-s.today/PDF/09SATS218.pdf> (free access). – The title from the screen. – Yaz rus DOI: 10.15862 / 09SATS218.

УДК 692.526:728.8

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 Vjacheslav Mikhajlovich**,  
Candidate of Sciences, Professor of the  
department "Building constructions"  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Karpov Vladimir Nikoloyevich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department "Building constructions"  
E-mail: Karpov5656@mail.ru

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ РЕБРИСТЫХ ПАНЕЛЕЙ ПЕРЕКРЫТИЯ ПОЛНОСБОРНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ДОМОВ

В.М. Вдовин, В.Н. Карпов

Приведены результаты расчета вариантов ребристых панелей с учетом совместной работы деревянных ребер и обшивок из древесностружечной плиты, на основе которых выполнен поиск рациональных конструкций панелей перекрытия, ориентированный на минимизацию затрат материалов (досок и древесностружечных плит) при сохранении требуемой несущей способности и жесткости всего перекрытия дома. Даны графики подбора рациональных размеров панелей перекрытия для различных районов строительства.

*Ключевые слова: полносборный деревянный дом, панель перекрытия, несущее ребро, оптимизация, обшивка, доска, древесностружечная плита*

## THE CHOICE OF A RATIONAL DESIGN OF RIBBED SLABS IN PREFABRICATED WOODEN HOUSES

V.M. Vdovin, V.N. Karpov

The calculations of ribbed panels variants are given taking into account the joint work of wooden ribs and chipboard skin panel. On the basis of the above calculation results, a search for rational designs of roof slabs was done aimed at minimizing materials cost (boards and chipboards) and maintaining the required bearing capacity and stiffness of the entire floor of the house. Charts of selection the rational sizes of roof slabs for various areas of construction are given.

*Keywords: prefabricated wooden house, roof slab, the bearing rib, optimization, skin, board, chipboard*

Перекрытие полносборного жилого деревянного дома выполняется из небольшого числа крупных панелей, изготовленных по единой конструктивной схеме и различающихся между собой лишь наличием малосущественных деталей (отверстий, проёмов, стыковочных элементов и т.п.). В целях повышения сборности дома габаритные размеры панелей принимаются достаточно большими. В полносборных крупнопанельных домах ширина панели ( $b$ ) принимается равной 2400 мм, а длина назначается исходя из ширины дома.

Все панели, надёжно стыкуясь между собой, образуют единую плиту, работающую в двух направлениях, что обеспечивает жесткость здания. Однако, как показывает опыт эксплуатации, существующие конструкции стыковых креплений, а также качество их выполнения не дают оснований считать, что все панели работают как единая плоская плита. В большинстве случаев панели работают как самостоятельные кон-

структивные элементы по своей статической схеме. При одинаковом конструктивном решении всех панелей перекрытий в подобных случаях возникает необходимость более детального расчёта такой из них, которая находится в наиболее неблагоприятных условиях, и распространения результатов ее расчёта на остальные панели. Предварительными исследованиями [1] было установлено, что в системе дома из 4-х панелей перекрытия наиболее опасной в работе является панель, имеющая лишь одну промежуточную опору при одинаковой их общей длине. В такой панели возникают наибольшие усилия по сравнению с другими панелями дома, которые имеют большее количество промежуточных опор и, следовательно, меньшие величины пролётов. В «неразрезных» панелях, или, иначе, в панелях размером на дом минимальное количество промежуточных опор может быть равно единице. И, следовательно, опасной в работе будет являться панель, работающая по схеме двухпролётной балки.

В основу исследований взята ребристая система панели, поперечное сечение которой показано на рис. 1.

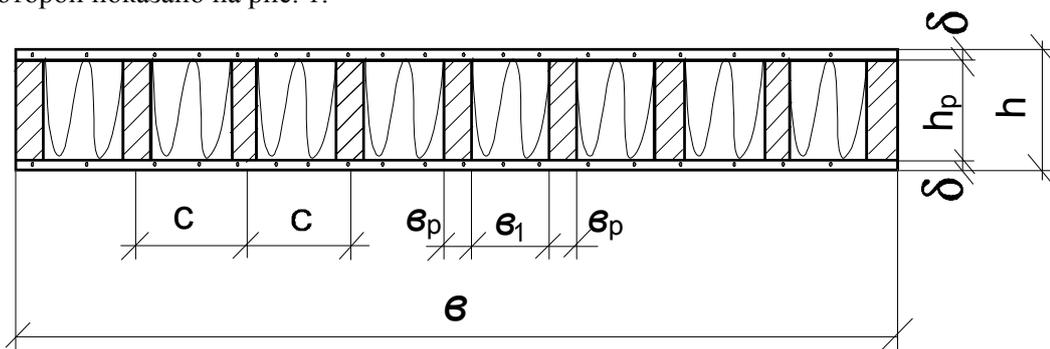


Рис. 1. Поперечное сечение ребристой панели перекрытия

Конструктивные решения такой панели включают вариацию следующих параметров:

- размеры поперечных сечений несущих рёбер ( $h_p \times b_p$ );
- толщина обшивок ( $\delta$ );
- высота панели ( $h_n$ );
- количество несущих рёбер или размер "с" – шаг несущих рёбер;
- конструкция несущего ребра (по материалу, по изготовлению).

Наметим возможные пределы отклонений названных изменчивых величин.

Для несущих рёбер, выполненных из цельных досок, размеры поперечных сечений ограничиваются существующим сортаментом пиломатериалов и предельными допусками на фрезеровку пласти и кромок, что обусловлено технологией изготовления клееных конструкций. Из этих соображений размеры рёбер могут быть  $h_p = 120, 144, 168, 172$  мм и  $b_p = 34, 44$  мм, которые получаются из черновых заготовок досок размерами  $h'_p = 125, 150, 175$  мм и  $b'_p = 40, 50$  мм.

Меньшие размеры рёбер по высоте не могут быть приняты, т.к. они не удовлетворяют требованиям необходимой прочности и жёсткости панелей. Доски шириной более 175 мм являются дефицитными, а с учётом их повышенного коробления при сушке и увлажнении к применению рекомендовать не могут.

Ширина несущих рёбер больше и меньше указанных не может быть рекомендована из-за технологических требований для склеивания конструкций из досок на ребро. Из двух названных размеров (34 мм и 44 мм) следует отдавать предпочтение 44 мм, как более технологичному, оно более устойчиво как в процессе изготовления, так и в процессе работы конструкций. Кроме того, большая ширина клеевого шва обеспечивает качественную приклейку рёбер к обшивкам. Исходя из этого, ширина рёбер принята равной 44 мм.

Размеры сечения рёбер из древесностружечных плит определяются исходя из толщины плит и технологических возможностей склеивания в процессе горячего

прессования. При этом рёбра могут быть из одного или двух слоёв древесностружечных плит.

Толщина обшивок определяется толщиной древесностружечных плит, выпускаемых отечественными заводами. В настоящее время для деревянного домостроения в основном используется плита толщиной 16 мм. Этот вариант принят за основной. Однако в порядке прогнозирования свойств и требований к плите в расчётах приняты также толщины плит, равные 10 мм и 13 мм.

Высота панелей  $h_{п}$  определяется двумя предыдущими параметрами –  $h_p$  и  $\delta$ , так как  $h_{п} = h_p + 2\delta$ . Однако высота не может быть больше предельной, допускающей опрессовку склеивания панели в прессах, и в условиях технологических линий комбинатов по изготовлению полносборных домов принята 250 мм.

Количество несущих рёбер должно прежде всего приниматься из условия прочности верхней обшивки при изгибе на действие местной нагрузки. Расчёт ведётся на два варианта сочетания нагрузок:

а) собственный вес и полезная нагрузка,

б) собственный вес и сосредоточенный монтажный груз  $P = 1,2$  кН (собственным весом ввиду его малости можно пренебречь).

Расчётной схемой при этом служит многопролётная неразрезная балка. Расчёт на сочетание нагрузок (вариант «а») даёт величину расчётного изгибающего момента, равного  $M_a = 0,13125c$  кН·м. При расчёте на сочетание нагрузок (вариант «б») имеем  $M_6 = 0,15c$  кН·м.

Из условия прочности обшивки при действии момента  $M_a$

$$\sigma = \frac{M_a}{W} = \frac{0,13125 \cdot c^2}{100 \cdot \delta^2} \leq R_u$$

имеем  $[c] = \sqrt{\frac{100 \cdot \delta^2 \cdot R_u}{6 \cdot 0,13125}} = 1,14 \text{ м} = 114 \text{ см}$  при  $\delta = 16$  мм,

$[c] = 71$  см – при  $\delta = 10$  мм.

Из условия прочности обшивки при действии момента  $M_6$

имеем  $[c] = \frac{100 \cdot \delta^2 \cdot R_u \cdot 1,2}{6 \cdot 15} = 1,36 \text{ м} = 136 \text{ см}$  при  $\delta = 16$  мм,

$[c] = 53$  см – при  $\delta = 10$  мм.

Таким образом, шаг несущих рёбер не должен превышать предельно допустимую величину, которая для всех возможных толщин обшивок (от 10 мм до 16 мм) равна 53 см. Иначе говоря, если шаг расстановки рёбер не будет превышать 53 см, условие прочности верхней обшивки на местный поперечный изгиб удовлетворяется.

Конструкция несущего ребра влияет как на экономичность ребристой панели, так и на обеспечение прочностных и жесткостных требований. Конструкции несущих ребер могут различаться по виду основного материала и по способу изготовления.

На существующих заводах по производству деревянных домов несущие рёбра могут изготавливаться из древесины, древесностружечной плиты или комбинированными, склеенными из древесины и древесностружечной плиты. Типы поперечных сечений несущих рёбер показаны на рис. 2.

Решение вопроса рационального выбора панелей основано на исследовании действительной работы панели перекрытия, заложенной в основу расчета надежности конструкций, с детальным изучением зависимости ее от различных факторов – величины и характера действующих нагрузок, условий эксплуатации, расчетной схемы, типа конструкций и др. Помимо указанных факторов учитывались также требования стандартизации, унификации, сортамента используемых материалов и обязательное выполнение условий действующих строительных норм и правил на проектирование деревянных конструкций [2, 3].

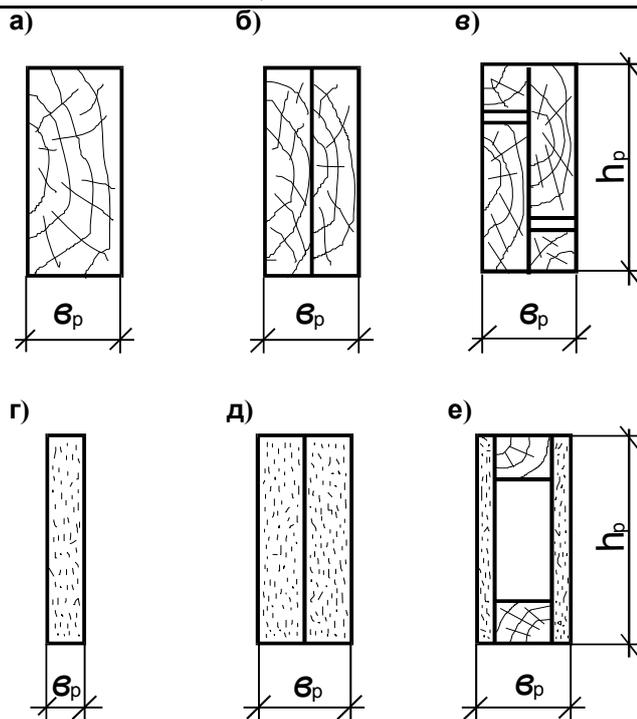


Рис. 2. Поперечные сечения несущих рёбер панелей:

а – цельнодеревянное; б – склеенное из двух досок; в – склеенное из четырех досок;  
г – из одного слоя ДСП; д – из двух слоев ДСП; е – комбинированное

В основу конструктивных расчётов панели положен принцип приведённых сечений, поскольку, как показали исследования [1], обшивки и рёбра работают совместно вплоть до разрушения панели. Приведённые геометрические характеристики рабочего сечения панели определяются как

$$F_{\text{пр}} = F_{\text{об}} + \frac{E_p}{E_{\text{об}}} F_p, \quad J_{\text{пр}} = J_{\text{об}} + \frac{E_p}{E_{\text{об}}} J_p, \quad S_{\text{пр}} = S_{\text{об}} + \frac{E_p}{E_{\text{об}}} S_p. \quad (1)$$

В формулах (1) геометрические характеристики приведены к материалу обшивки, т.е. к древесностружечной плите. Если необходимо привести их к материалу ребра, например к древесине, то следует воспользоваться следующими формулами:

$$F_{\text{пр}} = F_p + \frac{E_{\text{об}}}{E_p} F_{\text{об}}, \quad J_{\text{пр}} = J_p + \frac{E_{\text{об}}}{E_p} J_{\text{об}}, \quad S_{\text{пр}} = S_p + \frac{E_{\text{об}}}{E_p} S_{\text{об}}. \quad (2)$$

Поскольку основной величиной при проверке прочности и жёсткости панелей, работающих на изгиб, является приведённый момент инерции, приведём формулу для его подсчёта к более удобному виду, в которой видна была бы доля участия обшивок и рёбер в работе панели.

Запишем формулу (2) для подсчёта момента инерции в виде

$$J_{\text{пр}} = J_p \left( 1 + \frac{E_{\text{об}}}{E_p} \frac{J_{\text{об}}}{J_p} \right). \quad (3)$$

Для сечения (см. рис. 1) при одинаковых модулях упругости древесностружечной плиты при растяжении, сжатии и при полном включении обшивок в работу [1] формулу (3) приведём к виду

$$J_{\text{пр}} = J_p (1 + k), \quad (4)$$

$$k = \frac{E_{\text{об}}}{E_p} \frac{J_{\text{об}}}{J_p} = \frac{E_{\text{об}}}{E_p} \frac{2b\delta(h_p + \delta)^2 12}{4nb_p h_p^3} = \frac{E_{\text{об}}}{E_p} \frac{3F_{\text{об}}}{F_p} \left( 1 + \frac{\delta}{h_p} \right), \quad (5)$$

где  $n$  – количество рёбер;  $F_p$  – суммарная площадь всех рёбер;  $F_{об}$  – суммарная площадь двух обшивок;  $k$  – коэффициент, учитывающий долю участия обшивок в восприятии нормальных напряжений.

Зная величины расчетных усилий (изгибающих моментов) и геометрические характеристики поперечных сечений панелей, проверочные расчёты выполняют по формулам:

- прочность обшивок

$$\sigma_{об} = \frac{M}{J_{пр}} \frac{h}{2} \frac{E_{об}}{E_p} = \frac{M}{W_{пр}} \frac{E_{об}}{E_p} \leq R_c^{об} (R_p^{об}); \quad (6)$$

- прочность ребер

$$\sigma_p = \frac{M}{J_{пр}} \frac{h_p}{2} \leq R_u. \quad (7)$$

Помимо прочности по нормальным напряжениям необходимо проверить рёбра на скалывание по формуле

$$\tau = \frac{Q}{J_{пр}} \frac{S_{пр}^{nc}}{\sum b_p} \leq R_{ск}, \quad (8)$$

где  $S_{пр}^{nc}$  – приведённый статический момент полусечения панели относительно нейтральной оси.

Требуемая жёсткость панели проверяется условием

$$\frac{f}{l} \leq \left[ \frac{f}{l} \right], \quad (9)$$

где  $f$  – максимальный прогиб панели от действия нормативной нагрузки.

При решении задач оптимального проектирования панелей нет необходимости для каждого варианта этих конструкций делать проверочные расчёты по всем формулам (6)–(9). С этой целью поставим обратную задачу. Найдём предельные изгибающие моменты, которые могут выдержать панели того или иного варианта при максимальном использовании прочностных свойств материала (древесина и древесностружечная плита). Для этого необходимо найти два значения предельного изгибающего момента  $M$  по формулам (6) и (7). В конечном счете за предельный момент принимается минимальное значение из двух полученных.

Однако поступим иначе. За предельный изгибающий момент будем принимать его величину, подсчитанную по формуле (7), т.е. исходя из предельной работы древесины. Формула (6) представляет собой условие требуемой прочности для материала обшивок, т.е. для древесностружечной плиты. Итак, из формулы (7) имеем

$$[M] = \frac{2R_u J_{пр}}{h_p} = \frac{2J_p R_u}{h_p} (1+k). \quad (10)$$

Формулой (10) можно пользоваться и для панелей клееных, у которых обшивки и рёбра работают совместно, и для панелей неклееных, у которых работают только одни рёбра, а обшивка выполняет функции ограждения. В последнем случае необходимо в формулу (10) подставить  $k = 0$ .

По формулам (2)–(5) были подсчитаны значения геометрических характеристик поперечных сечений панелей для отношения  $E_{об} / E_p = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$  и при разных размерах ребер и обшивок (ширина панели 2,4 м) [4].

Расчётные изгибающие моменты, возникающие в панелях в процессе их эксплуатации в зависимости от пролётов, отражены на рис. 3–6 в виде параболической линии. Значения максимальных изгибающих моментов, действующих в панели, подсчитаны при различных, но, вероятно, возможных нагрузках, действующих на панель пере-

крытия в системе полносборного дома, и при разных (фактических) соотношениях величин пролётов.

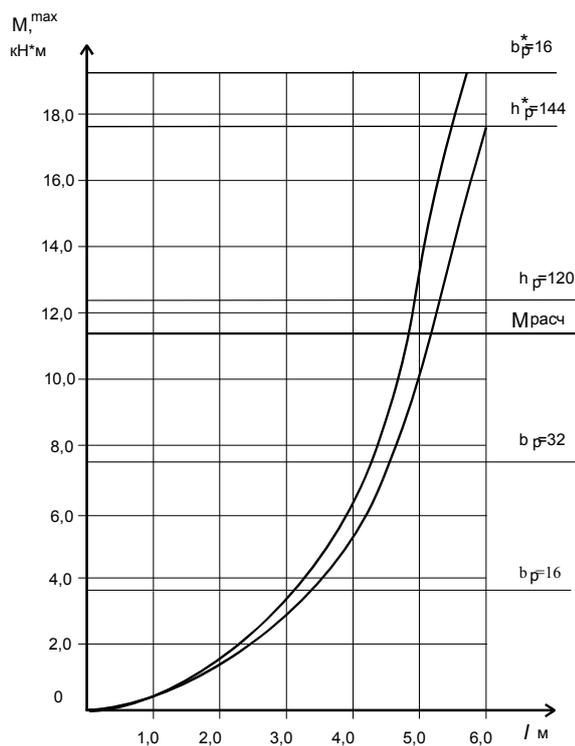


Рис. 3. Подбор рациональных размеров панелей перекрытия дома без мансарды:  
 $h_p$  – без учета работы обшивок;  $b_p^*$  – с ребрами из ДСП с учетом работы обшивок ( $h_p = 198$  мм);  
 $b_p$  – с ребрами из ДСП без учета работы обшивок ( $h_p = 198$  мм)

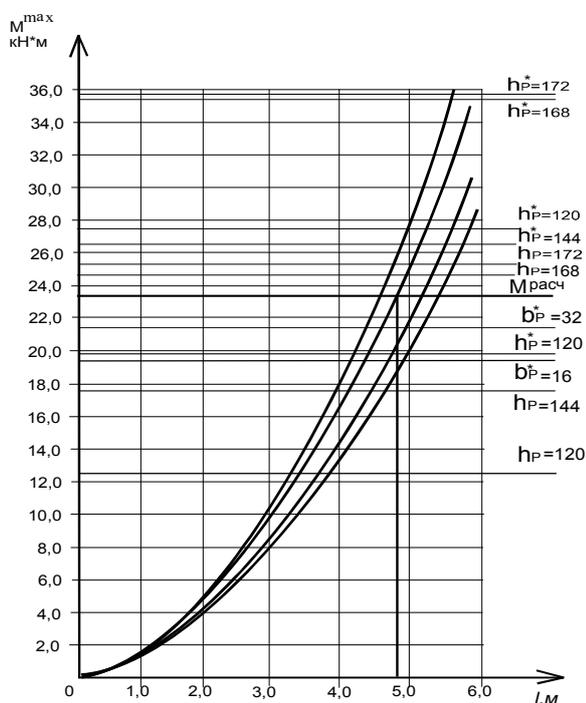


Рис. 4. Подбор рациональных размеров панелей перекрытия дома с мансардой  
 (I снеговой район):  
 $h_p^*$  – с учетом работы обшивок (при  $E_{об}/E_{др} = 0,1$ );  $h_p$  – без учета работы обшивок  
 (при  $E_{об}/E_{др} = 0,1$ );  $h_p^{**}$  – с учетом работы обшивок (при  $E_{об}/E_{др} = 0,2$ );  
 $b_p^*$  – с ребрами из ДСП ( $h_p = 198$  мм)

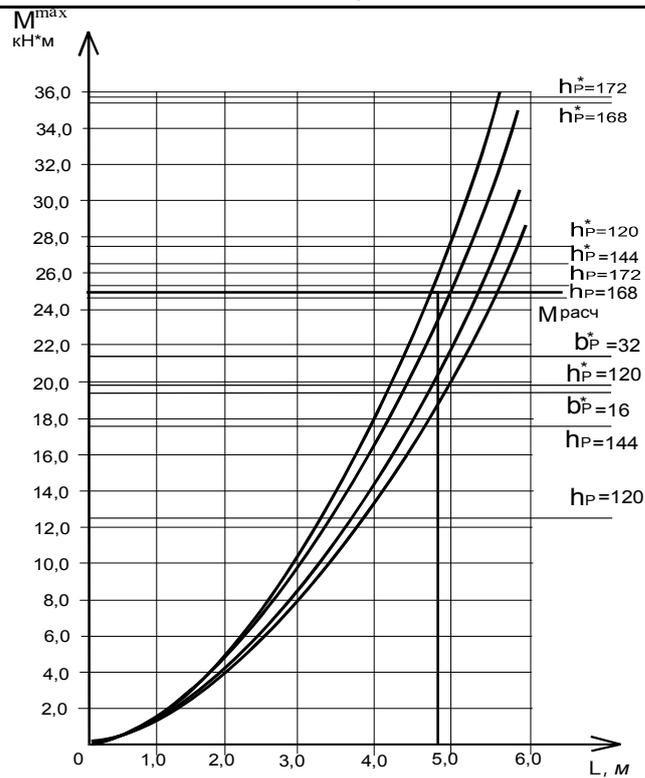


Рис. 5. Подбор рациональных размеров панелей перекрытия дома с мансардой (III снеговой район):

$h_p^*$  – с учетом работы обшивок (при  $E_{ос}/E_{др} = 0,1$ );  $h_p$  – без учета работы обшивок (при  $E_{ос}/E_{др} = 0,1$ );  
 $h_p^{**}$  – с учетом работы обшивок (при  $E_{ос}/E_{др} = 0,2$ );  $b_p^*$  – с ребрами из ДСП ( $h_p = 198$  мм)

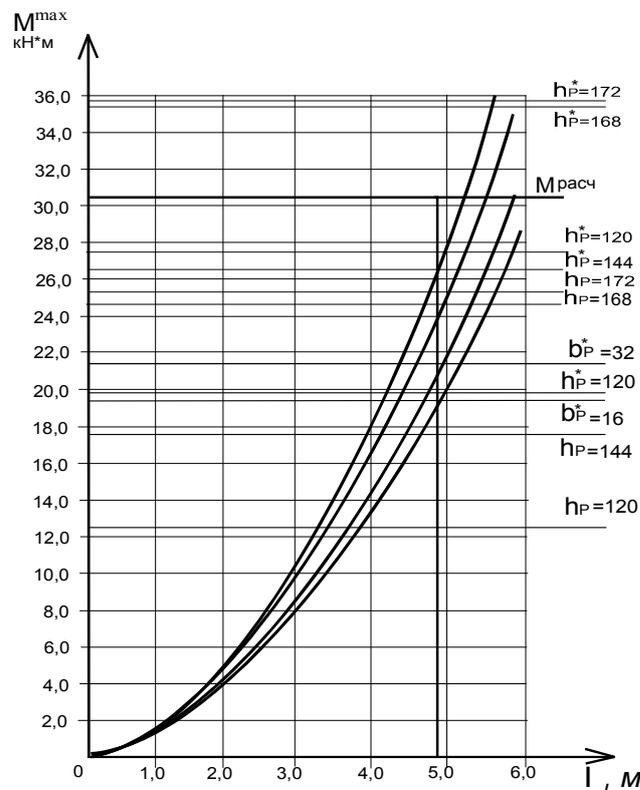


Рис. 6. Подбора рациональных размеров панелей перекрытия дома с мансардой (V снеговой район):

$h_p^*$  – с учетом работы обшивок (при  $E_{ос}/E_{др} = 0,1$ );  $h_p$  – без учета работы обшивок (при  $E_{ос}/E_{др} = 0,1$ );  
 $h_p^{**}$  – с учетом работы обшивок (при  $E_{ос}/E_{др} = 0,2$ );  $b_p^*$  – с ребрами из ДСП ( $h_p = 198$  мм)

## Выводы.

1. Предложен метод подбора сечения панели при заданных прочностных свойствах материалов обшивок и рёбер и известных способах их соединения между собой по заданным величинам предельных изгибающих моментов и величин изгибающих моментов, возникающих в панелях в процессе эксплуатации.

2. Не исключается возможность решения задачи прогнозирования прочностных характеристик материалов панели; возможен подбор типа панели из условия безопасности перекрытия пролета с выбором размеров элементов.

## Список литературы

1. Вдовин, В.М. Несущие панели с применением древесностружечных плит для малоэтажного домостроения: монография / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 144 с.

2. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. – М., 2011.

3. Garkina, I.A. Mathematical Methods of System Analysis in Construction Materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 245(2017) 062014 doi:10.1088/1757-899X/245/6/062014/

4. Вдовин, В.М. Индустриальные панели перекрытий для полносборных деревянных домов (оптимизация и поиск рациональных конструкций): монография / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов. – М.: ФГУП ВНИИТПИ. № 11835. Вып.1. 2001. – 90 с.

## References

1. Vdovin, V.M. The bearing panels with use of chipboard for low-rise housing: monograph / V.M. Vdovin, V.N. Karpov. – Penza: PGUAC, 2014. – 144 p.

2. SP 64.13330.2011. Wooden structures. The updated edition of SNiP II-25-80. – M., 2011.

3. Garkina, I.A. Mathematical Methods of System Analysis in Construction Materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 245(2017) 062014 doi:10.1088/1757-899X/245/6/062014/

4. Vdovin, V.M. Industrial floor panels for full-assembled wooden houses (optimization and search of rational structures): monograph / V.M. Vdovin, V.N. Karpov. – M.: FSUE VNIINTPI. No. 11835. Vol. 1. 2001. – 90 p.

УДК 624.01

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

*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 Vjacheslav Mikhajlovich**,  
Candidate of Sciences, Professor of the  
department "Building constructions"  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

## ЖЕСТКИЙ ОПОРНЫЙ УЗЕЛ КЛЕЕНОЙ ДЕРЕВЯННОЙ СТОЙКИ

В.М. Вдовин

Предлагается жесткий опорный узел клееной опорной стойки, отличающийся от применяемых узлов повышенной жесткостью и отсутствием податливости. Последнее достигается использованием клеенных стальных шайб, которые монолитно вклеиваются в деревянную колонну перед сборкой узла. Усилия в узле передаются деревянной колонне через клеенные шайбы, что способствует повышению несущей способности и жесткости всего узла. Приводится методика расчета предлагаемой конструкции узла.

*Ключевые слова:* деревянная колонна, опорный узел, клеенная шайба, металлическая траверса

## RIGID SUPPORT UNIT OF GLUED WOODEN RACK

V.M. Vdovin

A rigid support unit of a glued loading column is proposed, which differs from the used ones by increased rigidity and lack of compliance. It is achieved by using glued steel washers, which are integrally glued into a wooden column before assembling. The efforts in the unit are transmitted to the wooden column through glued washers, which contributes to the increase of the bearing capacity and stiffness of the whole unit. The method of calculating the proposed unit design is given.

*Keywords:* wooden column, support unit, glued washer, metal traverse

В каркасных зданиях обязательным условием должно быть наличие жесткого узла соединения колонн с фундаментами для обеспечения геометрической неизменяемости несущего каркаса при шарнирном соединении ригеля со стойками. Такое требование является особенно необходимым, если каркас выполнен из деревянных конструкций, поскольку какой бы ригель (балка, ферма, арка) ни применялся, в таком каркасе соединение его со стойками шарнирное.

Создание жесткого узла опирания деревянной стойки на фундамент многие годы было проблематичным ввиду податливости механических связей (болтов, нагелей), без которых трудно было обойтись при создании жестких узлов. Лишь появление клеевых соединений позволило решать эту задачу.

На рис. 1 приведены два варианта жестких опорных узлов деревянных колонн, которые рекомендуются в современных литературных источниках

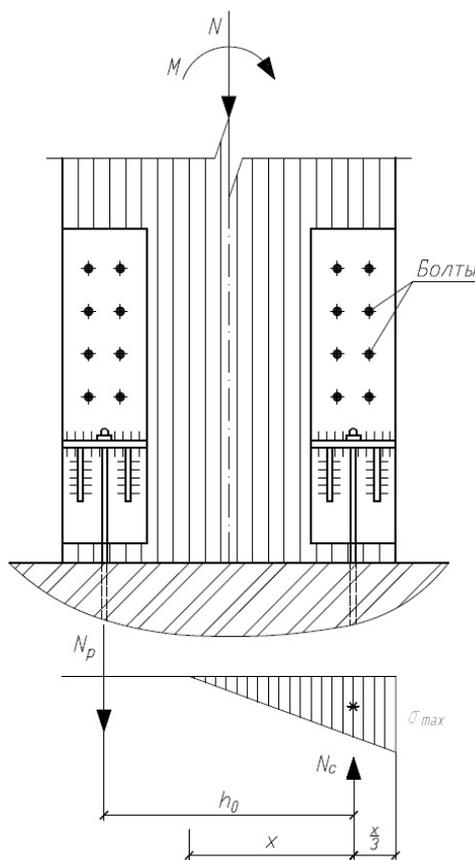
На рис. 1а показан наиболее доступный опорный жесткий узел колонны. Он основан на том, что с одной стороны пара сил, создаваемых изгибающим моментом ( $M$ ), воспринимается анкерным болтом (растягивающая сила), а с другой стороны сжимающая сила является равнодействующей сминающих напряжений, действующих по торцу колонны. Напряжения смятия распределяются по торцу колонны в виде треугольника, создавая плечо пары сил, равное  $h_0 = h - \frac{1}{3}x$ , где  $x$  – длина участка

действующих сжимающих напряжений. Для восприятия растягивающей силы от анкерных болтов в узле использованы сварные металлические траверсы, которые прикрепляются к колонне болтами. Количество болтов ( $n$ ) должно быть

$$n \geq \frac{N_p}{[T_6]},$$

где  $N_p$  – растягивающая сила в анкере;  $[T_6]$  – несущая способность болта.

а)



б)

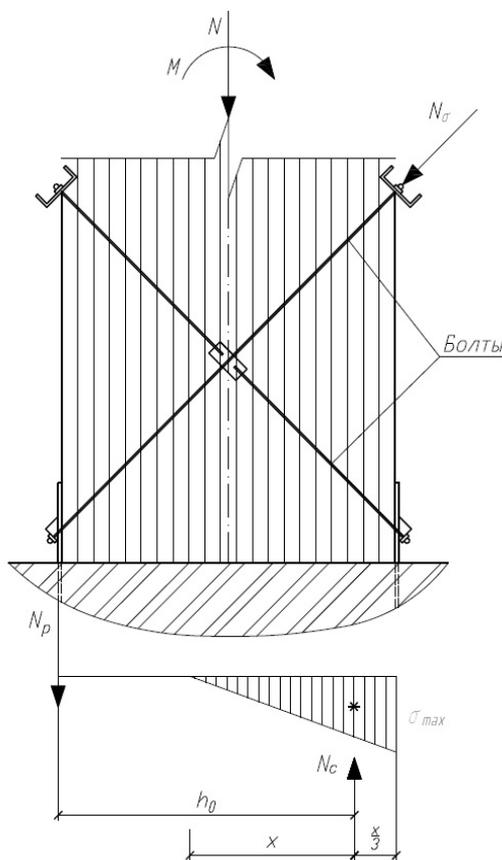


Рис. 1. Жесткие узлы опирания колонны на фундамент

Подобное конструктивное решение жесткого узла имеет определенные недостатки, а именно:

- Для восприятия растягивающего усилия использованы болты, которые обладают податливостью, а следовательно, узел не является абсолютно жестким. В точных расчетах его нужно считать как упругоподатливым.
- Проверку прочности торца колонны на смятие древесины необходимо проводить по максимальным сминающим напряжениям, которые имеют место только в крайнем волокне торца колонны.
- Величина пары сил зависит от плеча  $h_0$ , величина которого меньше, чем вся высота сечения ( $h$ ).
- К недостаткам узла следует отнести также то, что для крепления траверсы требуется достаточно большое количество болтов ввиду ограниченности их несущей способности, что увеличивает расход металла на траверсы.

Узел на рис. 2б устраняет некоторые недостатки узла на рис. 2а. В узле уширяется нижняя часть колонны путем приклеивания дополнительных досок, что приводит к увеличению плеча  $h_0$ , а следовательно, и к уменьшению сил  $N_c$  и  $N_p$ . Для восприятия усилий  $N_c$  и  $N_p$  ставятся крестообразные болты, которые соответствующим

образом включают в работу дополнительно приклеенные к колонне доски, вызывая работу их на скалывание с прижимом. Такая работа для древесины является более благоприятной, нежели просто скалывание и скалывание с обрывом. Несмотря на это, данный узел нельзя назвать совершенным, поскольку он более многоделен и вызывает затруднения установки цокольных стеновых панелей, опорами для которых служат колонны.

На рис. 2 предлагается конструкция жесткого узла сопряжения стойки с фундаментом, внешне схожая с узлом, показанным на рис. 1а. Для восприятия изгибающего момента в узле, так же, как и в узле 1а, предусматривается стальная сварная траверса. К отличительным особенностям предлагаемого узла относится то, что передача усилий от металлической траверсы древесине колонны осуществляется через вклеенные стальные шайбы. Эффект предлагаемого решения жесткого узла определяется тем, что шайбы монолитно вклеиваются в древесину и передают усилия от траверсы преимущественно через напряжения смятия, которые перераспределяются в древесине благодаря монолитности на большую площадь, чем сама шайба. Это приводит к снижению локальных напряжений и, как следствие, к увеличению несущей способности и жесткости узла. Подобное решение стало возможным благодаря проведенным исследованиям [1].

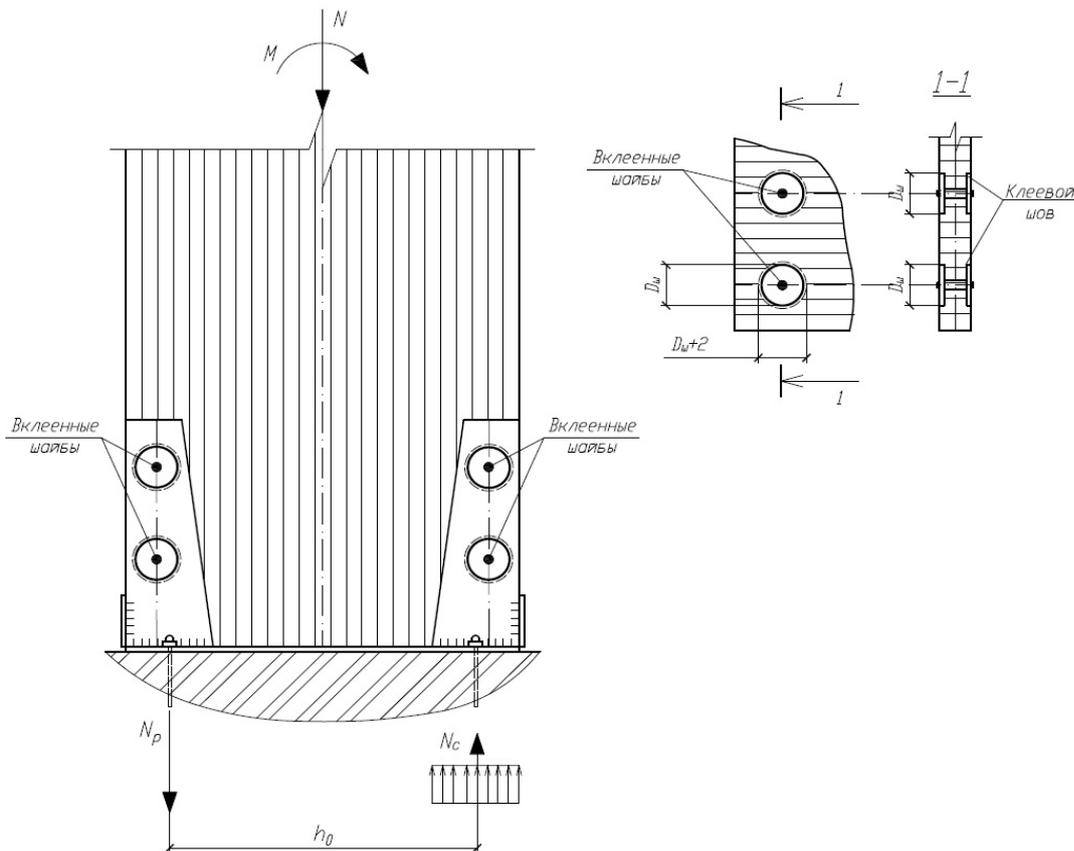


Рис. 2. Предлагаемый жесткий узел опирания колонны с вклеенными шайбами

При расчете предлагаемого опорного узла необходимо вначале определить максимальные сжимающие ( $N_c$ ) и растягивающие ( $N_p$ ) усилия как в сжато-изогнутом элементе:

$$N_c = -\frac{N_1}{2} - \frac{M}{h_0},$$

$$N_p = -\frac{N_2}{2} + \frac{M}{h_0},$$

где  $h_0$  – плечо сил  $N_c$  и  $N_p$  (см. рис. 2);  $M$  – изгибающий момент в опорном узле стойки;  $N_1$  – максимальная продольная сила в стойке, подсчитанная от действия всех нагрузок (включая снеговые);  $N_2$  – продольная сила, подсчитанная без учета снеговой нагрузки.

Сжимающую силу  $N_c$  можно передать на опорный пяточок, подобрав его размер по условию прочности на смятие торца стойки. Однако предпочтительно силу  $N_c$  передать через клеенные шайбы. В этом случае согласно «принципу дробности» сила  $N_c$  будет распределяться на несколько шайб, вызывая работу древесины на смятие под несколькими шайбами. Передача усилий  $N_p$  и  $N_c$  через клеенные шайбы увеличивает плечо этих сил ( $h_0$ ), что приводит к некоторому уменьшению этих сил по сравнению с узлом на рис. 1а.

На действие сил  $N_p$  и  $N_c$  подбирают необходимое количество шайб по формуле:

$$n_1 \geq \frac{N_p}{[T_{ш}]},$$

$$n_2 \geq \frac{N_c}{T_{ш}},$$

где  $[T_{ш}]$  – несущая способность клеенной шайбы, принимается по таблице, исходя из диаметра  $D_{ш}$  и толщины  $t_{ш}$  шайбы.

Таблица составлена по результатам исследования [1].

№ п/п	Диаметр $D_{ш}$ , мм	$[T_{ш}]$ (кН) при толщине $t_{ш}$ , мм		
		6	8	10
1	60	37,7	44,03	50,30
2	75	41,73	48,10	54,85
3	100	44,39	52,25	59,95

Таким образом, используя клеенные металлические шайбы при расчете жесткого узла опирания клеёной деревянной колонны на фундамент, можно не только избежать податливости болтовых или нагельных соединений и добиться определенной экономии металла за счет уменьшения размеров сварных металлических траверс, но и иметь более надежную работу жесткого узла.

#### Список итературы

1. Вдовин, В.М. Вклеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций: монография / В.М. Вдовин, М.В. Аriskин, Д.Д. Дудорова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 148 с.

#### References

1. Vdovin, V.M. Glued metal washers in the joints of wooden structures: monograph / V.M. Vdovin, M.V. Ariskin, D.D. Dudorova. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2012. – 148 p.

УДК 692.522.3

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

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

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

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

**Резаева Татьяна Евгеньевна**,  
студент  
E-mail: epon1911@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

**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

**Rezaeva Tatyana Evgenievna**,  
Student  
E-mail: epon1911@mail.ru

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ СТОПОВКИ И КРЕПЛЕНИЯ ПУСТОТНЫХ ПЛИТ БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ

И.С. Гучкин, Н.Н. Ласьков, Т.А. Резаева

Рассматриваются конструкция и способ проектирования строповочного устройства, предназначенного для подъема и монтажа пустотных плит безопалубочного формования. Анализируется напряженное состояние строповочного стержня и полки, расположенной в зоне активного с ним взаимодействия при подъеме плиты в условиях завода-изготовителя и на строительной площадке. Приводится алгоритм расчета прочности строповочного устройства, включая расчеты строповочного стержня на изгиб, а также полки, расположенной над стержнем, на продавливание и отрыв. Учитываются анкеровка арматуры и прочность нормального сечения плиты при подъеме краном. Даются рекомендации по монтажу и испытанию строповочного устройства в составе монолитного тела плиты.

*Ключевые слова:* пустотная плита, безопалубочное формование, строповочное устройство, прочность, расчет, технология изготовления, рекомендации

## DEVICE FOR SLINGING AND FASTENING OF HOLLOW PLATES OF FORMWORK-FREE MOLDING

I.S. Guchkin, N.N. Laskov, T.E. Rezaeva

The design and method of design of the slinging device intended for lifting and installation of hollow plates of formwork molding are investigated. The stress state of the slinging rod and the shelf located in the zone of active interaction with it during the lifting and installation of the plate in the conditions of the manufacturer and on the construction site is analyzed. An algorithm for calculating the strength of the slinging device including the calculations of the slinging rod on the bend as well as the shelf located above the rod on the punching and separation. The anchorage of the reinforcement and the strength of the normal section of the plate when lifting the crane are taken into account. Recommendations on installation and testing of the slinging device as a part of a monolithic body of a plate are given.

*Keywords:* hollow-core plate, formless molding, tailing lug, strength, calculation, fabrication technology, recommendations

Пустотные плиты безпалубочного формования высокотехнологичны при изготовлении [1] и менее металлоемки в сравнении с традиционными плитами. Однако у них имеются недостатки, которые сдерживают их широкое применение в строительстве, а именно:

– в плитах отсутствуют монтажные петли (стержни), из-за чего невозможен их монтаж краном, не оборудованным траверсой с клещевыми захватами, и затруднена анкеровка в стенах зданий;

– на боковой поверхности плит отсутствует рифление (вмятины), и это значительно ослабляет их совместную работу в составе перекрытий многоэтажных зданий. По этой причине не рекомендуется использование плит в зданиях со стальным каркасом.

Авторами разработано строповочное устройство (и способ изготовления), заменяющее традиционные монтажные петли и позволяющее обеспечить совместную работу плит в составе перекрытия здания.

Строповочное устройство представлено арматурными стержнями и приваренными к их торцам пластинами (второй вариант), закладываемыми в свежееотформованное тело плиты, с последующим вскрытием полки в зоне размещения. Фрагмент плана плиты и координаты строповочных стержней показаны на рис. 1.

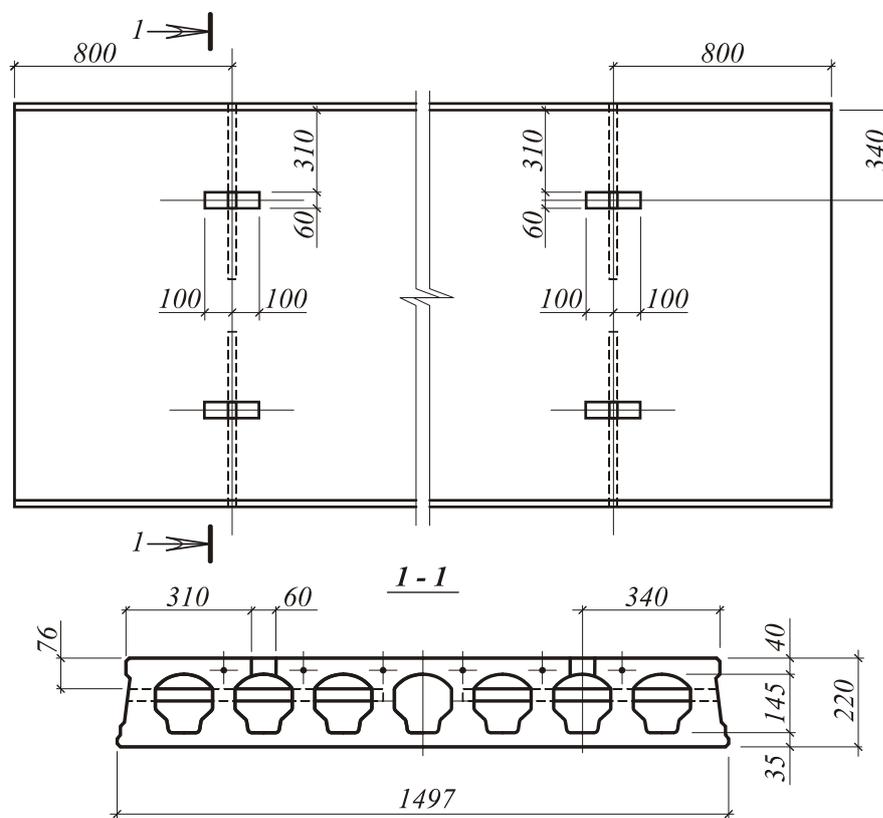


Рис. 1. Фрагмент плана плиты.

Координаты размещения строповочных стержней

Проектирование строповочного устройства состоит из нескольких этапов:

- расчет прочности строповочного стержня на изгиб;
- расчет прочности полки над строповочным стержнем на продавливание;
- расчет прочности полки над строповочным стержнем на отрыв;
- расчет длины анкеровки арматуры плиты, расположенной над строповочным стержнем;

– проверка прочности плиты при подъеме краном за строповочные стержни.

Проверке на прочность подлежало устройство, предназначенное для подъема наиболее тяжелых плит длиной от 9 до 10,8(м) и шириной 1,5 м, включая плиты марок ПБ 2.2-90-15; ПБ 2.2-96-15; ПБ 2.2-102-15; ПБ 2.2-108-15.

*Исходные данные:*

Бетон тяжелый класса В40, прочность на момент обжатия предварительно напряженной арматурой  $R_{bn} = 32$  МПа,  $R_b = 14,5$  МПа,  $R_{bt} = 1,05$  МПа.

Предварительно напряженная арматура в верхней полке 6 Ø 5ВрII (Вр1400),  $R_s = 1045$  МПа (1170 МПа) [2].

Нормативная нагрузка на строповочный стержень

$$N_n = \frac{1}{3} P,$$

где  $P$  – вес плиты в кН.

Коэффициент динамичности  $k_g = 1,4$ .

Расчетная нагрузка на строповочный стержень  $N = N_n \cdot k_g$ .

Строповочные стержни приняты из арматуры классов А240,  $R_s = 215$  МПа и А300,  $R_s = 270$  МПа.

*Расчет прочности строповочного стержня на изгиб*

Расчет прочности стержня выполнялся в соответствии с актуализированной редакцией свода правил СП 52-101-2003 [3, 4].

За расчетный пролет стержня принято расстояние в свету между продольными ребрами  $l = 140$  мм.

Расчетные формулы для определения диаметра строповочного стержня:

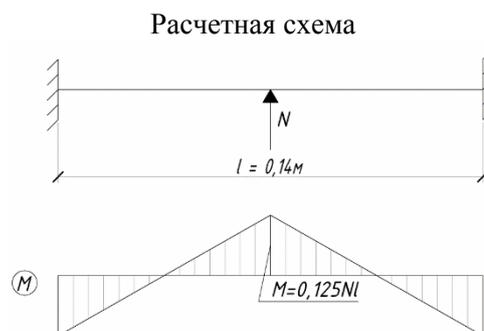
изгибающий момент:  $M = 0,125 N l$

требуемый момент сопротивления:  $W_x = M / R_s$ ;

требуемый диаметр строповочного стержня:

$$d = \sqrt[3]{32 W_x / \pi}.$$

Результаты расчета и требуемые диаметры строповочных стержней при использовании арматуры классов А240, А300 даны в табл. 1.



Т а б л и ц а 1

Расчетные параметры строповочных стержней

№ п/п	Марка плиты	Расчетная нагрузка на стержень $N$ , кН	Изгибающий момент $M$ , кН·см	Требуемый момент сопротивления $W_x$ , см <sup>3</sup>		Требуемый диаметр $d$ , см	
				А240	А300	А240	А300
1	ПБ2.2-108-15	26,27	45,97	2,1	1,67	2,78	2,57
2	ПБ2.2-102-15	24,87	43,52	1,99	1,58	2,73	2,52
3	ПБ2.2-96-15	23,33	40,83	1,86	1,48	2,67	2,47
4	ПБ2.2-90-15	21,93	38,38	1,75	1,4	2,62	2,43

*Расчет прочности полки над строповочным стержнем на продавливание*

Расчет производим на продавливающую силу от максимально нагруженного строповочного стержня, что соответствует плите марки ПБ 2.2-108-15.

Расчетная продавливающая сила

$$F = N/2 = 26,27/2 = 13,14 \text{ кН.}$$

Условие прочности полки на продавливание

$$F \leq F_b,$$

где  $F_b$  – продавливающая сила, воспринимаемая бетоном.

Расчетные данные:

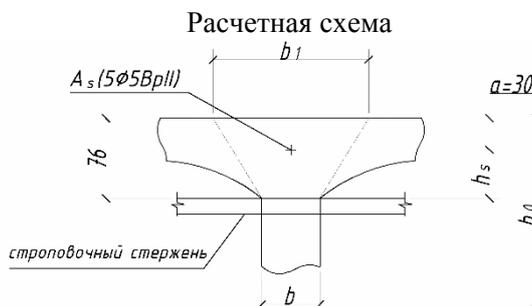
$$h_0 = 19 \text{ см}$$

$$h_s = 4,6 \text{ см}$$

$$b = 55 \text{ см}$$

$$b_1 = b + 2h_s = 5,5 + 2 \cdot 4,6 = 14,7$$

см



Суммарная площадь двух поверхностей продавливания

$$A_{\Pi} = (b_1 + b)h_s = (14,7 + 5,5)4,6 = 92,92 \text{ см}^2.$$

Продавливающая сила, воспринимаемая бетоном:

$$F_b = \alpha \cdot R_{bt} \cdot A_{\Pi} = 1 \cdot 1,05 \cdot 10^3 \cdot 92,92 \cdot 10^{-4} = 9,76 \text{ кН},$$

где  $\alpha=1$  – для тяжелого бетона.

Проверяем условие

$F \leq F_b$ ,  $13,14 > 9,76$ (кН) – условие не выполняется, следовательно, необходимо учесть в расчете арматуру, расположенную в зоне продавливания, а именно 1Ø5 ВрII (1Ø5 Вр1400).

Проверяем условие

$$F \leq F_b + 0,8R_s A_s,$$

$$13,14 < 9,76 + 0,8 \cdot 1045 \cdot 10^3 \cdot 0,196 \cdot 10^{-4}$$

$$13,14 < 26,16 \text{ (кН)} – \text{условие выполняется.}$$

*Расчет полки на отрыв в зоне расположения строповочного стержня*

Проверяем условие прочности по формуле

$$F \left( 1 - \frac{h_s}{h_0} \right) \leq 0,8R_s A_s.$$

$$13,14 \left( 1 - \frac{4,6}{19} \right) < 0,8 \cdot 1045 \cdot 10^3 \cdot 0,196 \cdot 10^{-4}$$

$$9,96 < 16,38 \text{ (кН)}$$

*Расчет длины анкеровки арматуры (Ø5ВрII) в бетоне*

Базовую длину анкеровки находим по формуле [2]

$$l_0 = \frac{R_s A_s}{R_{bond} u_s},$$

где  $u_s$  – периметр стержня,  $u_s = \pi d = 3,14 \cdot 0,5 = 1,57$  см;

$$R_{bond} = \eta_1 \eta_2 R_{bt} = 2 \cdot 1 \cdot 1045 = 2090 \text{ МПа};$$

здесь  $\eta_1 = 0,2$  – для холоднодеформированной арматуры периодического профиля;

$\eta_2 = 1$  – при диаметре арматуры менее 32 мм,

$$l_0 = \frac{1045 \cdot 0,196}{2090 \cdot 1,57} = 0,0624 \text{ м.}$$

Требуемая расчетная длина анкеровки [2]

$$l_{an} = \alpha l_0 \frac{A_{s.col}}{A_{s.ef}},$$

где  $\alpha = 1$  – для арматуры периодического профиля;  $A_{s.col}$ ,  $A_{s.ef}$  – площади сечения арматуры, соответственно, требуемая по расчету и фактическая. При  $A_{s.col} = A_{s.ef}$   $l_{an} = l_0 = 0,0624$  м.

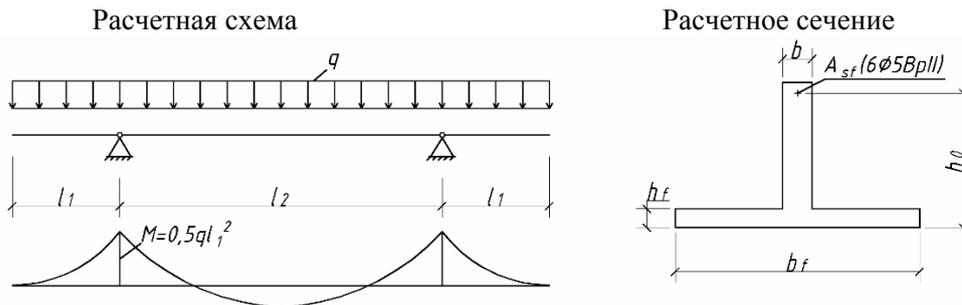
Принимаем положение строповочного стержня на расстоянии 80 см от торца плиты.

#### Проверка прочности плиты при подъеме краном за строповочные стержни

Проверку производим на примере расчета плиты марки ПБ 2.2-108-15 длиной  $l = 10,8$  м, весом  $P = 56,3$  кН.

Расчетная равномерно распределенная погонная нагрузка с учетом коэффициента динамичности  $K_g = 1,4$  составит:

$$q = \frac{P}{l} \cdot K_g = \frac{56,3}{10,8} \cdot 1,4 = 7,3 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$



#### Расчетные параметры плиты

$b = 5,5$  см;  $b_f = 149$  см;  $h_f = 3,5$  см;  $l_1 = 0,8$  м;  $A_{sf} = 1,18$  см<sup>2</sup>;  $h_0 = 19$  см.

Изгибающий момент

$$M = 0,5ql_1^2 = 0,5 \cdot 7,31 \cdot 0,8^2 = 2,34 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Находим положение нейтральной оси из условия

$$M \leq R_b b_f h_f (h_0 - 0,5h_f)$$

$$2,34 < 14,5 \cdot 10^3 \cdot 1,49 \cdot 0,035 (0,19 - 0,5 \cdot 0,035);$$

$2,34 < 130,1$  (кН·м) – условие выполняется, т.е. нейтральная ось проходит в полке.

#### Находим коэффициенты

$$\alpha_0 = \frac{M}{R_b b_f h_0^2} = \frac{2,34}{14,5 \cdot 10^3 \cdot 1,49 \cdot 0,19^2} = 0,003.$$

По [5, прил. 5]  $\nu = 0,995$ .

Требуемая площадь сечения арматуры

$$A_{sl} = M / R_s \cdot h_0 \cdot \nu = 2,34 / 1045 \cdot 10^3 \cdot 0,19 \cdot 0,995 \cdot 10^{-8} = 0,12 \text{ см}^2.$$

Фактическая площадь сечения арматуры

$$A_{sf} > A_{sl}, 1,18 > 0,12 \text{ (см}^2\text{)},$$

прочность сечения достаточная.

Проверку прочности нормального сечения плиты в середине пролета не производим, так как она гарантируется прочностью плиты при эксплуатационной нагрузке, которая существенно превышает нагрузку от собственного веса.

Нормативная нагрузка на строповочные стержни и рекомендуемые на основании расчета диаметры стержней даны в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Нормативная нагрузка на строповочный стержень и диаметры строповочных стержней

№ п/п	Марка плиты	Масса плиты, т	Нормативная нагрузка на стержень, тс	Назначенный диаметр стержня, мм	
				кл. А240	кл. А300
1	ПБ2.2-108-15	5,63	1,88	28	25
2	ПБ2.2-102-15	5,33	1,78	28	25
3	ПБ2.2-96-15	5,00	1,67	28	25
4	ПБ2.2-90-15	4,70	1,56	28	25

Из сопоставления данных табл. 1 и 2 следует, что назначенные диаметры строповочных стержней с небольшим запасом превышают требуемые (расчетные) и это гарантирует их прочность при подъеме плит краном обычным способом.

При использовании плит в многоэтажных каркасных зданиях к торцам строповочных стержней (второй вариант) заранее приваривают стальные пластины, которые в дальнейшем используют для сварного соединения смежных плит в составе междуэтажных перекрытий. Эскизы узла сварного соединения плит и конструкции строповочного стержня даны на рис. 2.

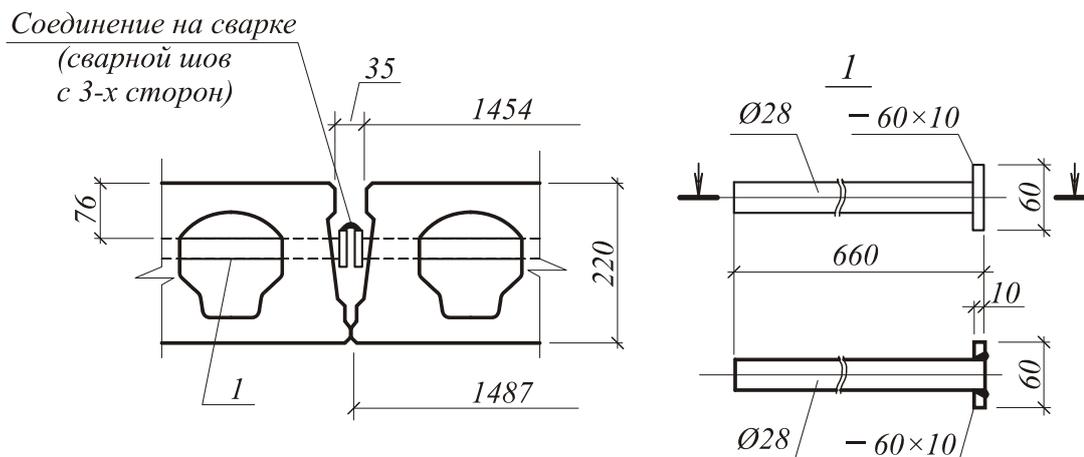


Рис. 2. Конструкция сварного соединения плит  
(1 – строповочный стержень)

### Выводы

1. Строповочное устройство, включая сопрягающие элементы плиты, имеет достаточную прочность и надежность и может использоваться в пустотных плитах марки ПБ2.2 длиной 9...10,8 м, выполненных по безопалубочной технологии изготовления.

2. Конструкция строповочного устройства позволяет обеспечить совместную работу плит в составе перекрытия и их заанкеривание в стенах зданий.

3. Плиты, оборудованные строповочным устройством, можно применять в зданиях со стальным каркасом.

### Рекомендации

1. Плиты изготавливать из тяжелого бетона класса В40 по прочности на сжатие.

2. Нормируемая прочность бетона к моменту разрезки монолита на изделия и их подъема краном должна составлять не менее 80 % от класса бетона по прочности на сжатие.
3. Допускается замена арматуры классов А240, А300 соответственно на арматуру А1, Ас-11.
4. Для арматуры классов А240(А1) применять сталь марок ВСтЗсп2 и ВСтЗсп2, а для арматуры классов А300(Ас-11) – сталь марки 10ГТ.
5. Строповочные стержни вставлять в свежееотформованное тело плиты в шпур (скважины) диаметром на 4...5 мм меньше диаметра стержня. Шпуры выполнять с помощью заостренного стержня, шлямбура (трубы) или путем сверления.
6. Длину строповочных стержней, без пластины, принять 630 мм, а с пластиной – 650 мм.
7. Строповочное устройство в составе плиты испытывать на прочность.

#### Список литературы

1. Danilov, A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 5–8. – P. 219–225.
2. Пособие по проектированию предварительно напряженных железобетонных конструкций из тяжелого бетона (к СП 52-102-2004). – М., 2005.
3. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры: свод правил. – М., 2004
4. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры (к СП 52-101-2003). – М., 2005.
5. Гучкин, И.С. Эксплуатация и реконструкция сооружений / И.С.Гучкин, Н.Н.Ласьков. – Пенза, 2016. – 192 с.

#### References

1. Danilov, A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 5–8. – P. 219–225.
2. Manual for the design of prestressed reinforced concrete structures of heavy concrete (SP 52-102-2004). – М., 2005.
3. SP 52-101-2003. Concrete and reinforced concrete structures without prestressing of reinforcement: Set of rules. – М., 2004.
4. Manual for the design of prestressed reinforced concrete structures of heavy concrete (SP 52-102-2004). – М., 2005.
5. Guckin, I. S. Operation and reconstruction of buildings / I. S. Guckin, N. N. Loskov // Penza, 2016. – 192 p.

УДК 692.82:62

*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

**Макарова Людмила Викторовна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: Mak.78\_08@inbox.ru

**Тарасов Роман Викторович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: rwtarasow@rambler.ru.

**Безрукова Марина Сергеевна**,  
магистрант 2 курса обучения направления  
подготовки 27.03.01 Стандартизация и  
метрология  
E-mail: marina260710@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

**Makarova Ludmila Viktorovna**,  
Candidate of Sciences, Assistant Professor  
of the department «Management of quality and  
the technology of the construction production»  
E-mail: Mak.78\_08@inbox.ru

**Tarasov Roman Viktorovich**,  
Candidate of Sciences, Assistant Professor  
of the department «Management of quality and  
the technology of the construction production»  
E-mail: rwtarasow@rambler.ru.

**Bezrukova Marina Sergeevna**,  
master 2 courses of the direction of  
preparation 27.03.01 Standardization and  
metrology  
E-mail: marina260710@mail.ru.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РЕАЛИЗАЦИИ КОРРЕКТИРУЮЩИХ И ПРЕДУПРЕЖДАЮЩИХ ДЕЙСТВИЙ ПРИ МОНТАЖЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕТАЛЛОПЛАСТИКОВЫХ ОКОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов, М.С. Безрукова

Разработка и внедрение систем менеджмента качества на предприятиях строительной индустрии дает возможность не только повысить привлекательность строительной продукции для потребителя, но и эффективно управлять продукцией на всех этапах ее жизненного цикла. Внедрение системы менеджмента качества подразумевает описание деятельности предприятия как совокупности взаимосвязанных процессов в соответствии с требованиями международных стандартов серии ISO9000. Особое место в совокупности процессов системы менеджмента качества занимают корректирующие и предупреждающие действия, позволяющие значительно снизить риск выпуска дефектной продукции. Представлены результаты анализа основных видов дефектов, возникающих в процессе монтажа оконных конструкций, предложена система корректирующих и предупреждающих действий. Проведена оценка эффективности корректирующих и предупреждающих действий с последующей разработкой рекомендаций руководству предприятия.

*Ключевые слова: оконные конструкции, корректирующие действия, предупреждающие действия, эффективность*

## EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE IMPLEMENTATION PROCESS OF CORRECTIVE AND PREVENTIVE ACTIONS WHEN MOUNTING AND OPERATION OF METALPLASTIC WINDOW STRUCTURES

L.V. Makarova, R.V. Tarasov, M.S. Bezrukova

The development and implementation of quality management systems in the construction industry provides an opportunity not only to increase the attractiveness of construction products for consumers but also to effectively manage products at all stages of its life cycle. The introduction of a quality management system involves the description of the enterprise's activities as a set of interrelated

processes in accordance with the requirements of the international standards of the ISO9000 series. A special place in the totality of the quality system processes is occupied by corrective and preventive actions, which significantly reduce the risk of producing defective products. The article analyzes the main types of defects arising in the process of installation of window structures, suggests a system of corrective and preventive actions. The effectiveness of corrective and preventive actions was assessed with the development of subsequent recommendations to the management of the enterprise.

*Keywords: window constructions, corrective actions, preventive actions, effectiveness of measures*

Долгосрочные перспективы развития предприятий строительной индустрии должны быть основаны на концепции постоянного совершенствования качества продукции с позиции обеспечения максимальной удовлетворенности потребителя [1]. Задача повышения качества продукции требует применения современных методов контроля и управления качеством продукции [2].

В мировой и отечественной практике хорошо зарекомендовали себя современные системы менеджмента качества. Наибольшее распространение получила система менеджмента качества, основанная на требованиях международных стандартов серии ИСО 9000.

Система менеджмента качества представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов жизненного цикла продукции с определением необходимых ресурсов, ответственных должностных лиц и необходимой степени документированности процессов.

Особое место в совокупности процессов СМК занимают корректирующие и предупреждающие действия, позволяющие снизить риск получения потребителем дефектной продукции [3, 4]. Общий алгоритм управления системой корректирующих и предупреждающих действий представлен на рис. 1.

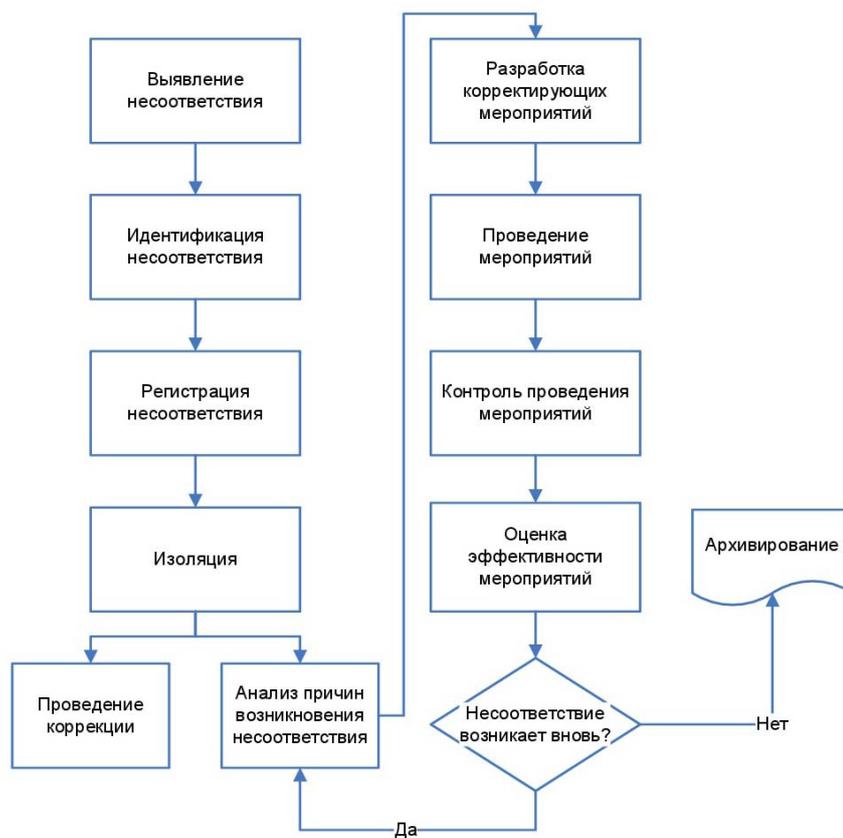


Рис. 1. Этапы организации и выполнения корректирующих и предупреждающих действий

Организация системы корректирующих и предупреждающих действий на предприятии преследует цель снижения уровня дефектности. Проблемы возникновения дефектов могут повторяться в нескольких случаях:

- если не была устранена коренная причина проблемы;
- корректирующие действия не смогли устранить выявленные причины возникновения дефекта.

В данных условиях для решения проблемы появления дефектной продукции необходимо установить основные причины ее возникновения. Коренной причиной называется первоначальное событие, которое инициирует причинно-следственные связи, приводящие к появлению несоответствия. Корректирующие действия разрабатываются после проведения анализа коренных причин [3].

Оконная компания «ФЭНСТЕР» является официальным представителем крупнейших производителей металлопластиковых конструкций г. Саратова, г. Ульяновска и г. Липецка, таких, как ООО «Окна Саратова», ООО «ОКОННЫЙ ЦЕНТР», ООО «ШМИТС РУС», ООО ОК «ШТЕРН». У оконной компании «ФЭНСТЕР» насчитывается более 10 профильных систем для производства окон и дверей из ПВХ и алюминия.

Анализ договоров, заключенных в 2018 году ООО ОК «ФЭНСТЕР», позволил выявить основные виды дефектов, а также предложить комплекс корректирующих и предупреждающих действий по их устранению (рис. 2).

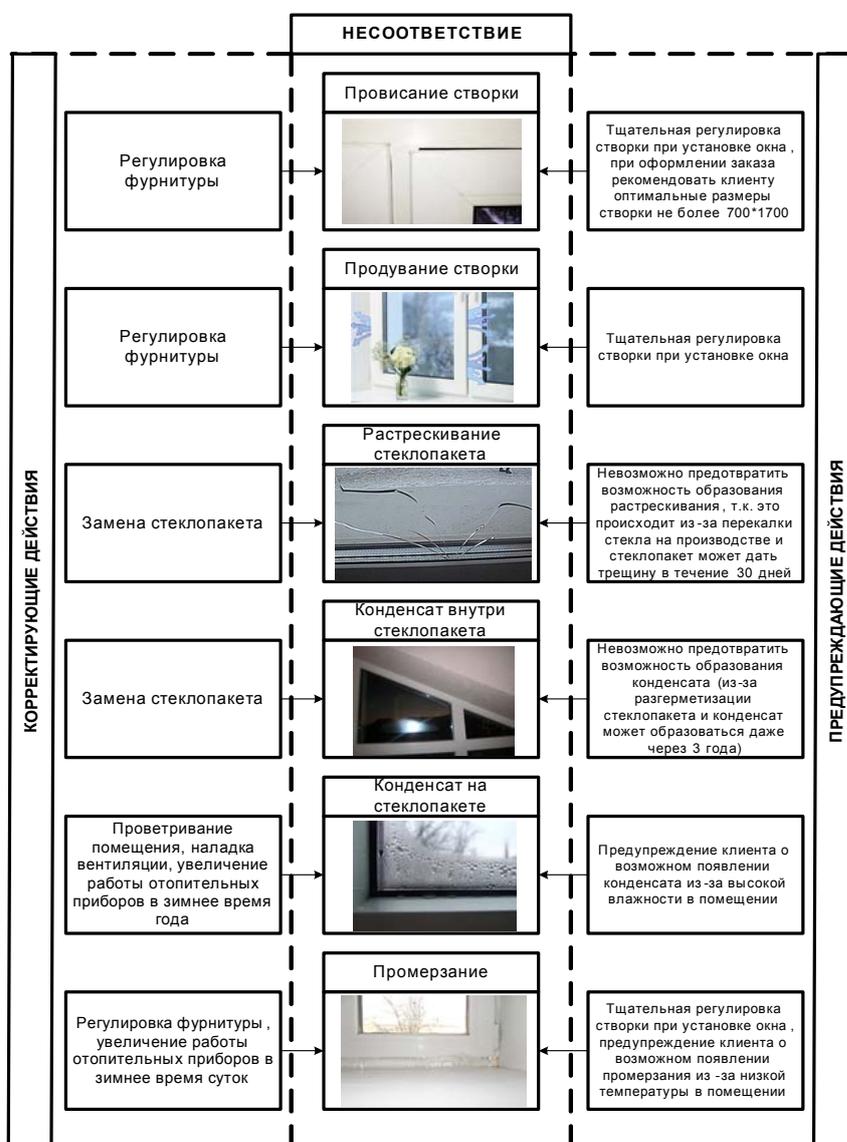


Рис. 2. Виды несоответствий и комплекс корректирующих и предупреждающих действий (начало)

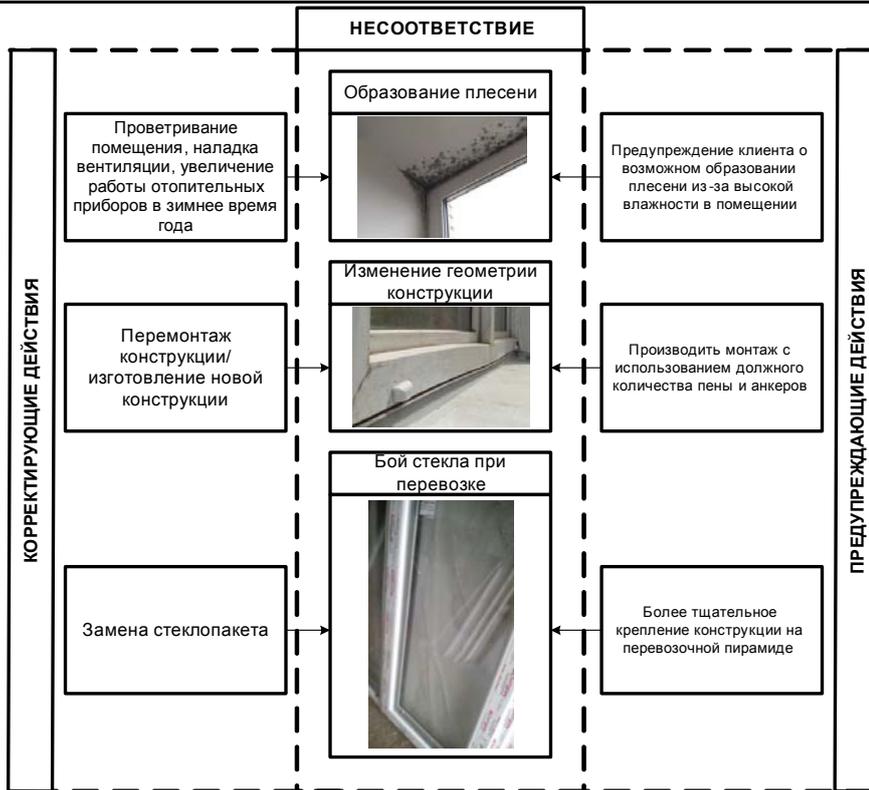


Рис. 2. Виды несоответствий и комплекс корректирующих и предупреждающих действий (окончание)

После установления причин возникновения дефектов, а также реализации корректирующих и предупреждающих действий необходимо оценить эффективность данного рода мероприятий. Основные характеристики и параметры модели для оценки результативности и эффективности КД и ПД представлены на рис. 3, 4.

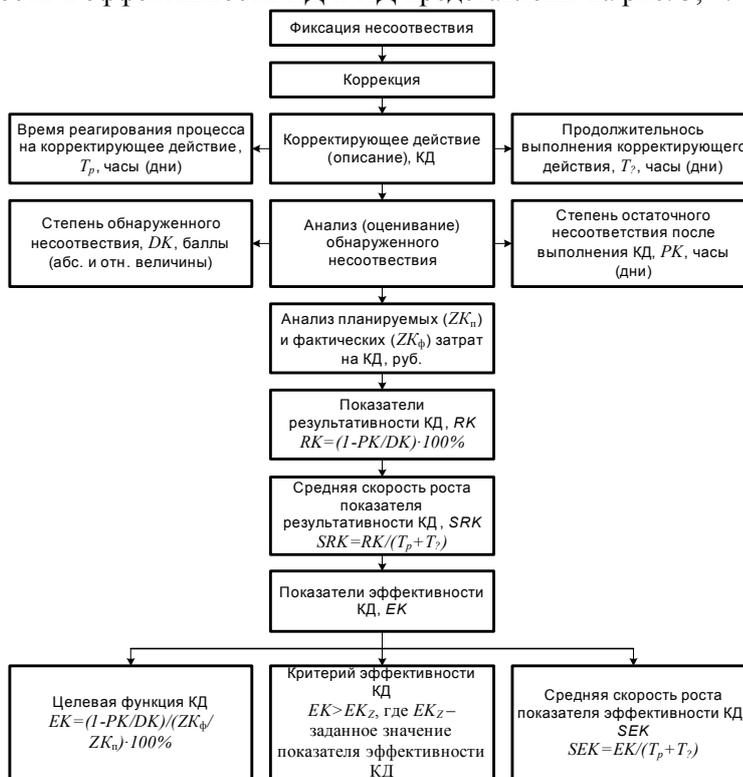


Рис. 3. Алгоритм оценки результативности и эффективности корректирующих действий [3]

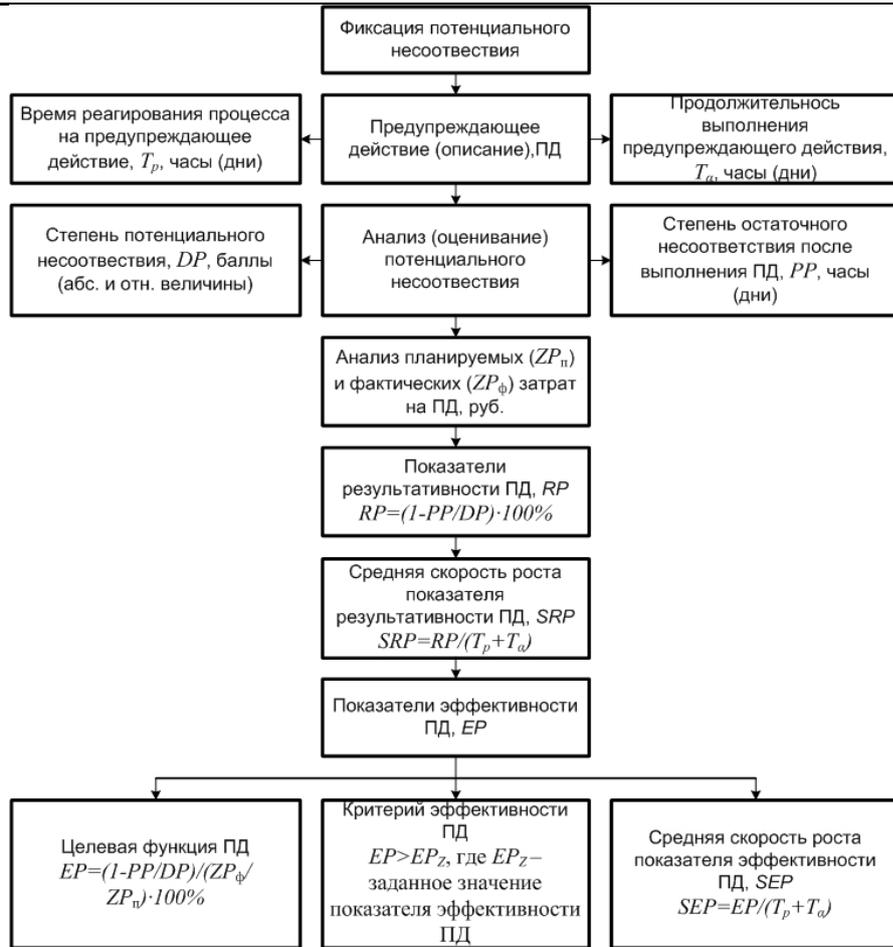


Рис. 4. Алгоритм оценки результативности и эффективности предупреждающих действий [3]

Пример расчета показателей результативности и эффективности корректирующих и предупреждающих действий, необходимых для предотвращения боя стекла при перевозке, представлен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Расчет показателей результативности и эффективности корректирующих и предупреждающих действий для несоответствия «бой стекла при перевозке»

№ п/п	Характеристика и параметры несоответствия	Определение характеристик и параметров
1	2	3
1	Бизнес-процесс	Установка металлопластиковых оконных конструкций на объекте заказчика
2	Владелец процесса	Менеджер по продажам
3	Целевая функция процесса	Установка металлопластиковых оконных конструкций, изготовленных по запрошенным параметрам потребителя
4	Исполнитель	Монтажная бригада
5	Входные данные	Замер, произведенный на объекте заказчика
6	Выходные данные	Металлопластиковая оконная конструкция, в комплект которой могут входить стеклопакет, фурнитура, подоконник, отлив, откосы, в зависимости от заказа потребителя
7	Ресурсы	Монтажная пена, метизы, бензин, время, зарплата монтажной бригады и др.
8	Параметры состояния механизма реализации процесса	Степень профессионализма монтажной бригады

1	2	3
9	Параметры процесса	Длительность установки, сезон, срок изготовления металлопластиковой оконной конструкции
10	Параметры продукции (промежуточные)	Качество сборки металлопластиковой оконной конструкции
11	Управляющие воздействия	Указания менеджера по телефону
12	Нормативная база	ГОСТ 30971-2012 «Швы монтажные узлов примыканий оконных блоков к стеновым проемам. Общие технические условия», ГОСТ 30674-99 «Блоки оконные из поливинилхлоридных профилей. Технические условия»
13	Возмущения	Растрескивание стеклопакета, изменение геометрии конструкции и др.
14	Помехи	Неподходящие погодные условия, загруженность производства
15	Форс-мажор	Пожар, стихийные бедствия, война, военные действия всех видов, замена текущего законодательства и др.
16	Показатели удовлетворенности потребителя	Соответствие установленным срокам установки, соответствие металлопластиковой оконной конструкции установленным требованиям, стоимость и др.
17	Несоответствие	Повреждение металлопластиковой конструкции при доставке
18	Содержание коррекции и КД	Ремонт или замена поврежденных элементов
19	Время реагирования процесса на КД, $T_p$	0,5 ч
20	Длительность выполнения КД, $T_a$	1 ч
21	Степень обнаруженного несоответствия (величина отклонения), $DK$	5 (По шкале от 1 до 5)
22	Степень остаточного несоответствия после выполнения КД, $PK$	1
23	Планируемые затраты на КД, $ZK_n$	1500 руб.
24	Фактические затраты на КД, $ZK_f$	2000 руб.
25	Показатели результативности КД, $RK$	80 %
26	Средняя скорость роста показателя результативности КД, $SRK$	$100/(1+0,5) \approx 67$ %/ч
27	Показатели эффективности КД (значение целевой функции КД), $EK$	$100/(2000/1500) \approx 75$ %
28	Критерий эффективности КД	$EK > 70$ % (Устанавливается владельцем процесса)
29	Средняя скорость роста показателя эффективности КД, $SEK$	50 %/ч
30	Потенциальное несоответствие	Возможное нарушение качества эксплуатации металлопластиковой оконной конструкции
31	ПД	Рекомендации для клиента о наблюдении появления несоответствия эксплуатации для последующего выезда специалиста
32	Время реагирования процесса на ПД, $T_p$	0,5 ч ( на поиск свободной монтажной бригады для исправления несоответствия)

1	2	3
33	Длительность выполнения ПД, $T_a$	1 ч (на исправление несоответствия)
34	Степень потенциального несоответствия, $DP$	Вероятность 5 %, что несоответствие возникнет при замене поврежденных элементов (экспертная оценка)
35	Степень потенциального несоответствия после выполнения ПД, $PP$	0 (экспертная оценка)
36	Планируемые затраты на ПД, $ZP_n$	700 руб.
37	Фактические затраты на ПД, $ZP_\phi$	1000 руб.
38	Показатель результативности ПД, $RP$	100 %
39	Средняя скорость роста показателя результативности ПД, $SRP$	$100/(1+0,5) \approx 67 \%$
40	Показатель эффективности ПД (значение целевой функции ПД), $EP$	$(1-0/5)/(1000/700)100 \approx 70 \%$
41	Критерий эффективности ПД	$EP > 65 \%$ (Устанавливается владельцем процесса)
42	Средняя скорость роста показателя эффективности ПД	$SEP \approx 47 \%$

Применительно к основным видам несоответствий (см. рис. 2) был произведен расчет средней скорости роста показателя эффективности корректирующих и предупреждающих действий (рис. 5).

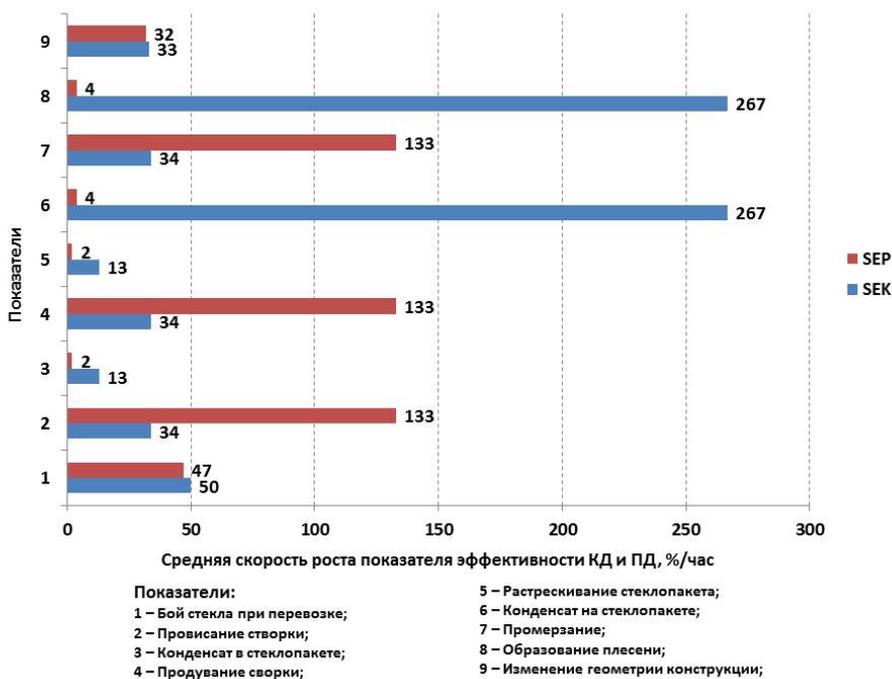


Рис. 5. Диаграмма средней скорости роста показателя эффективности КД и ПД

Установлено, что проведение корректирующих действий максимально эффективно в случае устранения таких недостатков, как конденсат на стеклопакете и образование плесени. Это связано с тем, что данные несоответствия зависят в большей

степени от условий эксплуатации оконной конструкции и практически не зависят от качества установки металлопластиковой оконной конструкции. Для устранения таких дефектов, как провисание створки, продувание створки и промерзание, наиболее эффективными являются предупреждающие действия. Реализация данных мероприятий позволит значительно сэкономить бюджет организации.

Данный подход к оценке эффективности корректирующих и предупреждающих действий в рамках действующей системы менеджмента качества позволит наладить эффективную систему распределения ресурсов внутри организации с учетом обеспечения высокого качества услуги по монтажу металлопластиковых оконных конструкций.

#### Список литературы

1. Иванов, В.А. Постоянное улучшение и его место в СМК организации / В.А. Иванов, В.М. Шилов, А.В. Оборин // Методы менеджмента качества. – 2004. – № 4. – С. 41–45.
2. Тарасов, Р.В. Управление качеством продукции промышленных предприятий: монография / Р.В. Тарасов, Л.В. Макарова. – Пенза: ПГУАС, 2017. – 168 с.
3. Никитин, В.А. Оценивание результативности и эффективности корректирующих и предупреждающих действий / В.А. Никитин // Методы менеджмента качества. – 2003. – №7. – С. 49 – 52.
4. Никитин, В.А. Управление качеством на базе стандартов ИСО серии 9000:2000 / В.А. Никитин. – СПб.: Питер, 2002. – 272 с.

#### References

1. Ivanov, V.A. Continuous improvement and its place in the QMS organization / V.A. Ivanov, V.M. Shilov, A.V. Oborin // Quality Management Methods. – 2004. – № 4. – P. 41–45.
2. Tarasov, R.V. Product quality management of industrial enterprises: monograph / R.V. Tarasov, L.V. Makarova. – Penza: PGUAS, 2017. – 168 p.
3. Nikitin, V.A. Evaluation of the effectiveness and efficiency of corrective and preventive actions / V.A. Nikitin // Methods of quality management. – 2003. – №7. – P. 49–52.
4. Nikitin, V.A. Quality management on the basis of ISO standards in 9000:2000 Series / V.A. Nikitin. – SPb.: Peter, 2002. – 272 p.

УДК 69.059.2

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

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

**Артюшин Дмитрий Викторович**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Коновалов Павел Владимирович**,  
магистрант

**Праслов Матвей Александрович**,  
магистрант

Penza State University of Architecture  
and Construction

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

**Grechishkin Alexander Viktorovich**,  
Candidate of Sciences, Head of the department  
«Urban development and architecture»  
E-mail: gsia@pguas.ru

**Artyushin Dmitriy Viktorovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Building constructions»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Konovalov Pavel Vladimirovich**,  
Undergraduate

**Praslov Matvey Aleksandrovich**,  
Undergraduate

## ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СООРУЖЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ

А.В. Гречишкин, Д.В. Артюшин, П.В. Коновалов, М.А. Праслов

На основе накопленного опыта обследования строительных конструкций рассматриваются и анализируются причины, приводящие к образованию дефектов основных конструктивных элементов электрических подстанций. Отмечается специфика эксплуатации железобетонных конструкций подстанций в полях постоянных и переменных токов. Предлагаются практические решения, обеспечивающие дальнейшую безопасную эксплуатацию основных конструктивных элементов.

*Ключевые слова:* электрические подстанции, конструктивные элементы, обследование, повреждения, диагностика, безопасная эксплуатация

## DIAGNOSTICS OF TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL SUBSTATIONS CONSTRUCTIONS

A.V. Grechishkin, D.V. Artyushin, P.V. Konovalov, M.A. Praslov

On the basis of the accumulated experience of the inspection of building constructions, the main reasons leading to the formation of defects of the main structural elements of electrical substations are examined and analyzed. The specifics of operation of reinforced concrete structures of substations in the field of direct and alternating currents are noted. Practical solutions are proposed to ensure further safe operation of the main structural elements.

*Keywords:* electrical substation, structural element, damage, diagnostics, safe operation

Современные электрические подстанции массово вводились в эксплуатацию в 70–80<sup>х</sup> годах прошлого столетия. Усредненный нормативный срок службы основных конструктивных элементов этих объектов составляет 40 лет. В настоящее время вследствие длительной эксплуатации наблюдаются деструктивные процессы в строительных конструкциях, связанные с воздействием грунтово-климатических факторов внешней среды, влиянием вибраций и ветровой нагрузки, специфическими электрофизическими процессами, снижающими их несущую способность.

Нормативный срок службы и безопасной эксплуатации основных конструктивных элементов большинства существующих электрических подстанций истек. В связи с чем возникает серьезная проблема: с одной стороны, большой объем объектов, требующих незамедлительной реконструкции, а с другой – отсутствие необходимого финансирования.

В связи с этим актуальной задачей является своевременная оценка технического состояния строительных конструкций и определение очередности работ по ремонту, реконструкции или замене конструктивных элементов.

Специалистами ПГУАС проведены обследования технического состояния основных конструктивных элементов сооружений электрических подстанций ПС 110/35/10 кВ, ПС 110/35/6 кВ филиалов ПАО «МРСК Волги-Пензаэнерго».

Электрические подстанции представляют собой открытые площадки (рис. 1), огороженные по периметру, в их состав входят следующие основные сооружения и конструктивные элементы: открытые распределительные устройства (ОРУ-110, ОРУ-35 кВ); комплектные распределительные устройства наружной установки (КРУН-10 кВ) с фундаментами из незаглубленных железобетонных лежней либо заглубленных железобетонных стоек квадратного сечения; порталы, состоящие в основном из железобетонных стоек квадратного, прямоугольного, двутаврового или кольцевого сечения высотой  $8\div 11$  м, соединенных в плоские рамы с помощью металлических или железобетонных перемычек; унифицированные стойки опор (УСО), выполненные из сборного железобетона с металлическим обрамлением на оголовках; силовые трансформаторы с фундаментами из сборных железобетонных плит и металлических балок; маслоприемники трансформаторов незаглубленной конструкции с железобетонными бортами, образующими маслоуловительный контур; железобетонные кабельные каналы, состоящие из технологических лотков, покрытых плитами; молниеотводы – из стержневых молниеприемников, установленных на отдельно стоящих железобетонных конических (цилиндрических) стойках кольцевого сечения; радиомачты – из отдельно стоящих железобетонных конических или цилиндрических стоек кольцевого сечения высотой  $10\div 25$  м; прожекторные мачты в виде отдельно стоящих железобетонных конических (цилиндрических) стоек кольцевого сечения или металлических пространственных сквозных четырехгранных конструкций из стальных уголков высотой  $20\div 22$  м; маслоуловители объемом  $5\div 25$  м<sup>3</sup>.

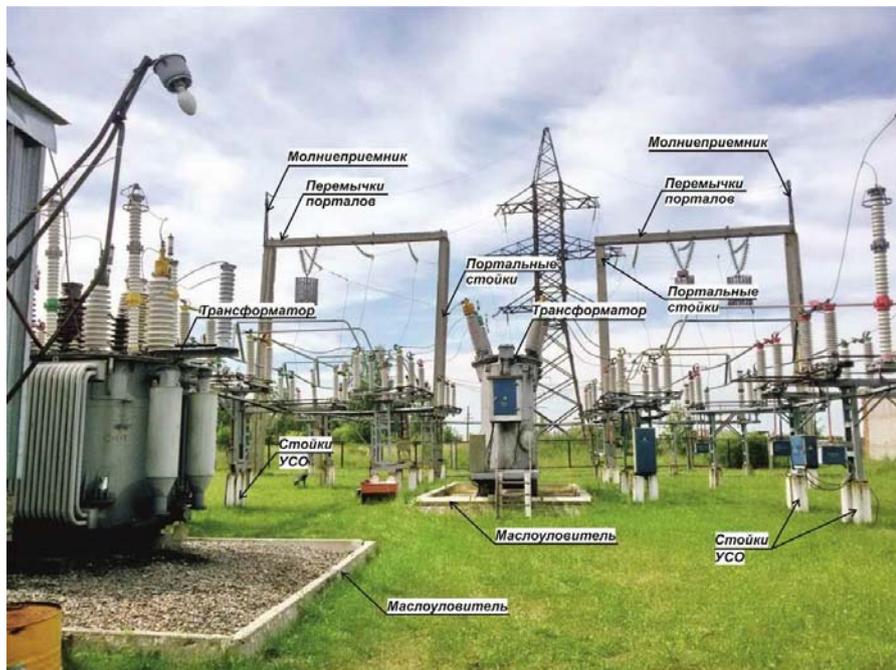


Рис. 1. Общий вид электрической подстанции

Техническое обследование электрических подстанций производилось инструментально-визуальным методом с использованием современных приборов и диагностического оборудования в соответствии с «Правилами обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений» (СП 13-102-2003\*), «Правилами обследования и мониторинга технического состояния...» (ГОСТ Р 53778-2010), [1, 2] и «Рекомендациями по оценке надежности строительных конструкций по внешним признакам». Обследованием было установлено, что в результате длительной эксплуатации

конструктивные элементы сооружений получили повреждения различной степени, влияющие на их прочность и эксплуатационные качества. Основные результаты обследования, дефекты и повреждения, а также мероприятия по восстановлению основных конструктивных элементов сведены в таблицу.

Основные виды повреждений конструктивных элементов электрических подстанций

№ п/п	Наименование узла, элемента	Описание повреждения	Мероприятия по повышению уровня промышленной безопасности сооружения
1	2	3	4
1	<p><u>Порталы (стойки и перемычки)</u></p> 	<p>1.1. Трещины, сколы бетона, разрушения защитного слоя бетона, обнажение и коррозия арматуры железобетонных стоек</p> <p>1.2. Поверхностная коррозия металлических перемычек</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• При отслоении бетона в местах глубоких трещин удалить участки повреждённого бетона, очистить обнажившуюся арматуру от коррозии металлической щеткой, произвести ее антикоррозионную обработку и восстановить защитный слой мелкозернистым бетоном класса В20 с добавлением латекса (до 5 %). Имеющиеся неглубокие трещины затереть цементным тестом (раствором) с добавлением латекса (до 5 %)</li> <li>• Выполнить антикоррозионную обработку преобразователем ржавчины (модификатором) и покраску металлических перемычек грунтовкой ФЛ-03К (ГОСТ 9109-81) и эмалью АС-182 (ГОСТ 19024-79*)</li> </ul>
2	<p><u>Стойки под оборудование (УСО)</u></p> 	<p>2.1. Сколы и отслоения защитного слоя бетона, трещины, обнажения и коррозия арматуры железобетонных стоек</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Удалить поврежденный бетон, очистить обнажившуюся арматуру от коррозии металлической щеткой, произвести ее антикоррозионную обработку и восстановить защитный слой мелкозернистым бетоном класса В20 с добавлением латекса (до 5 %). Имеющиеся неглубокие трещины затереть цементным тестом (раствором) с добавлением латекса (до 5 %)</li> </ul>

Продолжение таблицы

1	2	3	4
3	<p><u>Кабельные каналы</u></p> 	<p>3.1. Локальные повреждения и разрушения поверхности железобетонных технологических лотков и плит их покрытия 3.2. Частичное отсутствие плит покрытия лотков</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Омонолитить поврежденные участки лотков и плит (либо заменить отдельные плиты покрытия новыми) мелкозернистым бетоном класса В20, предварительно удалив поврежденный бетон, очистив арматуру от коррозии и выполнив ее антикоррозионную обработку. Неглубокие трещины затереть цементным тестом (раствором) с добавлением латекса (до 5%)</li> <li>• Смонтировать отсутствующие плиты покрытия кабельных лотков</li> </ul>
4	<p><u>Молниезащиты и радиомачты</u></p> 	<p>4.1. Трещины на поверхности железобетонных стоек</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Затереть трещины цементным тестом (раствором) с добавлением латекса (до 5%)</li> </ul>
5	<p><u>Прожекторные мачты</u></p> 	<p>5.1. Трещины, поверхностные разрушения и сколы бетона с обнажением и коррозией арматуры фундаментов опор мачт 5.2. Неполностью затянуты отдельные гайки анкерных болтов 5.3. Поверхностная коррозия опорных плит, анкерных болтов, элементов опорных узлов и надземной части мачт</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Удалить участки поврежденного бетона, очистить обнажившуюся арматуру фундаментов от коррозии металлической щеткой, произвести ее антикоррозионную обработку и восстановить защитный слой мелкозернистым бетоном класса В20 с добавлением латекса (до 5%). Трещины затереть цементным тестом (раствором) с добавлением латекса (до 5%). Разрушенные оголовки фундаментов омонолитить в опалубке мелкозернистым бетоном класса В20</li> <li>• Затянуть гайки на всех анкерных болтах усилием, соответствующим моменту не менее 50 кг·м</li> </ul>

1	2	3	4
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Выполнить антикоррозионную обработку преобразователем ржавчины (модификатором) и покраску элементов надземной части мачт (включая опорные плиты, анкерные болты и элементы опорных узлов) грунтовкой ФЛ-03К (ГОСТ 9109-81) и эмалью АС-182 (ГОСТ 19024-79*)</li> </ul>
6	<p><u>Маслоприемники трансформаторов</u></p> 	<p>6.1. Локальные повреждения и разрушения участков бортов, обнажение и коррозия арматуры, сквозные трещины и зазоры в швах</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Очистить обнажившуюся арматуру бортов от коррозии металлической щеткой, произвести ее антикоррозионную обработку и восстановить защитный слой мелкозернистым бетоном класса В20 с добавлением латекса (до 5 %). Омонолитить поврежденные участки бортов, сквозные трещины и зазоры заполнить безусадочным раствором</li> </ul>
7	<p><u>КРУН-10 кВ (фундаменты)</u></p> 	<p>7.1. Локальные отслоения защитного слоя, обнажение и коррозия арматуры фундаментных лежней 7.2. Трещины, разрушения защитного слоя бетона оголовков фундаментных стоек, обнажение и коррозия арматуры стоек</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Удалить поврежденный бетон, очистить обнажившуюся арматуру от коррозии металлической щеткой, произвести ее антикоррозионную обработку и восстановить защитный слой мелкозернистым бетоном класса В20 с добавлением латекса (до 5 %)</li> <li>• Глубоко поврежденные оголовки стоек омонолитить в опалубке мелкозернистым бетоном класса В20. Имеющиеся неглубокие трещины затереть цементным тестом (раствором) с добавлением латекса (до 5 %)</li> </ul>

Анализируя результаты обследования конструктивных элементов электрических подстанций, можно сделать выводы об их техническом состоянии и степени повреждения:

- Выявленные *дефекты*, как правило, являются следствием *нормального развития и накопления возрастных дефектов* строительных конструкций. Подавляющая часть обследованных конструкций (опор, стоек, мачт и т.п.) имеет достаточный ресурс по прочности и несущей способности, а обнаруженные дефекты могут быть устранены в ходе текущих ремонтов [3].

• Кроме того, следует отметить, что на характер повреждений железобетонных конструкций подстанций значительное влияние оказывают поля постоянных и переменных токов, приводящие к возникновению электрокоррозии железобетона. Эксплуатационные исследования состояния конструкций показывают, что переменные токи утечки и высоковольтное напряжение являются коррозионно опасными для бетона и арматуры. Прохождение электрического тока через железобетонные конструкции нарушает их структуру и провоцирует изменения физико-химических свойств, что в конечном счете негативно сказывается как на самом бетоне, так и на стальной арматуре. Учитывая специфику эксплуатации железобетонных конструкций подстанций в полях постоянных и переменных токов, для их защиты от электрокоррозии, исходя из практического опыта, можно рекомендовать следующие мероприятия [4]: применение бетона с высокой водонепроницаемостью (не ниже W6); отказ от понижающих электросопротивление добавок; исключение из состава бетона хлористых солей; назначение толщины защитного слоя бетона от поверхности изделия до арматуры не менее 20 мм; ужесточение требований к раскрытию трещин (для предварительно напряженных конструкций они должны быть не шире 0,1 мм, для обычных – не шире 0,2 мм); применение протекторной и катодной защиты; использование вместо стальной арматуры композитной полимерной (например, стеклопластиковой, базальтопластиковой или другой неметаллической арматуры по ГОСТ 31938-2012), обладающей высоким электросопротивлением.

• Вместе с тем часть обследованных железобетонных конструкций подстанций (отдельные порталные стойки, стойки УСО, рис. 2) из-за многочисленных повреждений и дефектов в виде широко раскрытых трещин, глубоких отслоений и разрушений бетона, его низкой фактической прочности (бетон соответствует классу В3,5÷В5), а также обнажений и коррозии арматуры находится в недопустимом для дальнейшей эксплуатации состоянии. Такие конструктивные элементы необходимо усиливать по специально разработанному проектному решению либо заменять новыми.

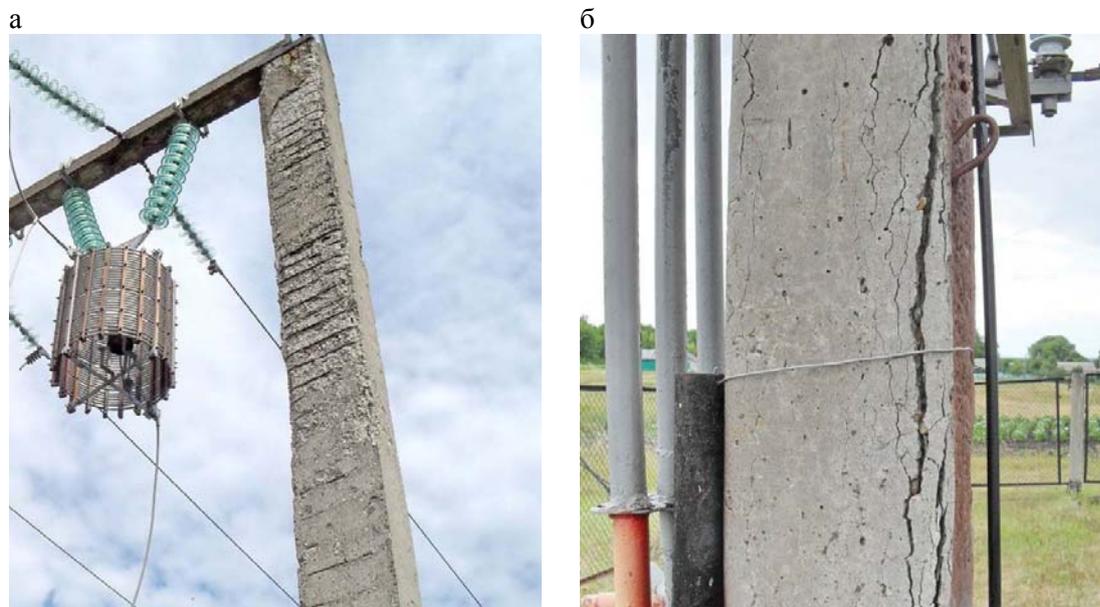


Рис. 2. Глубокие отслоения и разрушения бетона, коррозия арматуры:  
а – порталной стойки; б – стойки УСО

Проведенная диагностика технического состояния конструктивных элементов электрических подстанций может служить надежным инструментом оценки остаточного эксплуатационного ресурса сооружений электросетевых объектов. Ее применение позволяет определить конструкции, нуждающиеся в ремонте или требующие усиления (либо замены), и минимизировать затраты на проведение ремонтно-восстановительных работ основных конструктивных элементов электрических подстанций.

**Выводы**

1. Обобщены и проанализированы основные причины, приводящие к образованию дефектов и повреждений конструктивных элементов электрических подстанций.
2. Выявлено, что при оценке причин возникновения и характера повреждений основных элементов подстанций необходимо учитывать специфику эксплуатации конструкций подстанций в полях постоянных и переменных токов, приводящих к электрокоррозии железобетона.
3. Для обеспечения дальнейшей безопасной эксплуатации основных конструктивных элементов электрических подстанций предложено проводить диагностику их технического состояния, позволяющую точно классифицировать конструкции по остаточным эксплуатационным характеристикам с определением очередности работ по текущему ремонту, усилению или замене наиболее проблемных из них.

## Список литературы

1. СП 13-102-2003\*. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. – М.: Госстрой России, 2011.
2. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М.: Стандартинформ, 2010.
3. Муленкова, В.И. Расчет и конструирование усиления железобетонных и каменных конструкций / В.И. Муленкова, Д.В. Артюшин. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 118 с.
4. ГОСТ 31384-2017. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2017.

## References

1. SP 13-102-2003\*. Rules for inspection of supporting building structures of buildings and structures. – M.: Gosstroy of Russia, 2011.
2. GOST R 53778-2010. Buildings and facilities. Rules of inspection and monitoring of technical condition. – M.: Standardinform, 2010.
3. Mulenkova, V.I. Calculation and design of strengthening of reinforced concrete and masonry structures / V.I. Mulenkova, D.V. Artyushin. – Penza: PGUAS, 2014. – 118 p.
4. GOST 31384-2017. Protection of concrete and reinforced concrete structures against corrosion. General technical requirements. – M.: Standardinform, 2017.

УДК 69.059.032

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

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

**Нежданов Кирилл Константинович,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Строительные конструкции»

**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

**Nezhdanov Kirill Konstantinovich,**  
Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Building constructions»

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НЕРАЗРЕЗНОЙ ПОДКРАНОВОЙ БАЛКИ

К.К. Нежданов, И.Н. Гарькин

Исследуется напряжённое состояние 7-пролетной неразрезной стальной подкрановой балки от действия мостового крана грузоподъемностью 160 т с тяжелым режимом работы. Дается анализ изменения пролетного и опорного моментов в зависимости от изменения длины и жесткости надопорной вставки на основе экспериментальных исследований. Определены оптимальные параметры жесткой вставки.

*Ключевые слова:* неразрезная многопролетная подкрановая балка, напряженное состояние, пролетный и опорный моменты, жесткая вставка, оптимизация

## STUDY OF STRESS STATE OF CONTINUOUS CRANE GIRDER

K.K. Nezhdanov, I.N. Garkin

Stress state of a 7-span continuous steel crane girder from the action of a bridge crane weighing 160 tons with heavy duty is investigated. An analysis is given of the change in the span and support moments depending on the change in magnitude and stiffness above the support insert based on experimental studies. The most optimal length of the rigid insert is suggested.

*Keywords:* continuous multi-span crane girder, stress state, change of span and reference moment, rigid insert, optimal length

Как показывает опыт эксплуатации производственных зданий, наиболее повреждаемой частью каркаса являются подкрановые конструкции, и прежде всего сварные балки. Проблема усталостной повреждаемости возникла уже более 45 лет назад и сразу привлекла внимание ученых благодаря связанным с ней материальным потерям. За это время были рекомендованы различные способы увеличения ресурса подкрановых конструкций. Классификация решений представлена на рис. 1.

В классификационной схеме указываются два основных пути решения задачи по повышению долговечности:

- разработка новых конструктивных решений с увеличенным ресурсом;
- увеличение ресурса конструкций, находящихся в эксплуатации.

Первый из путей направлен на перспективу и позволит в будущем закрыть проблему усталостного разрушения подкрановых конструкций. Важность этого трудно переоценить, так как в настоящее время в эксплуатации находится множество подкрановых балок для тяжелого режима работы мостовых кранов. И если даже предположить, что новая конструктивная форма, отвечающая требованиям надежности,

долговечности, будет найдена, то сразу заменить все балки не представляется возможным. Таким образом, остаётся актуальным увеличение ресурса эксплуатируемых балок, а также разработка новых конструктивных форм.

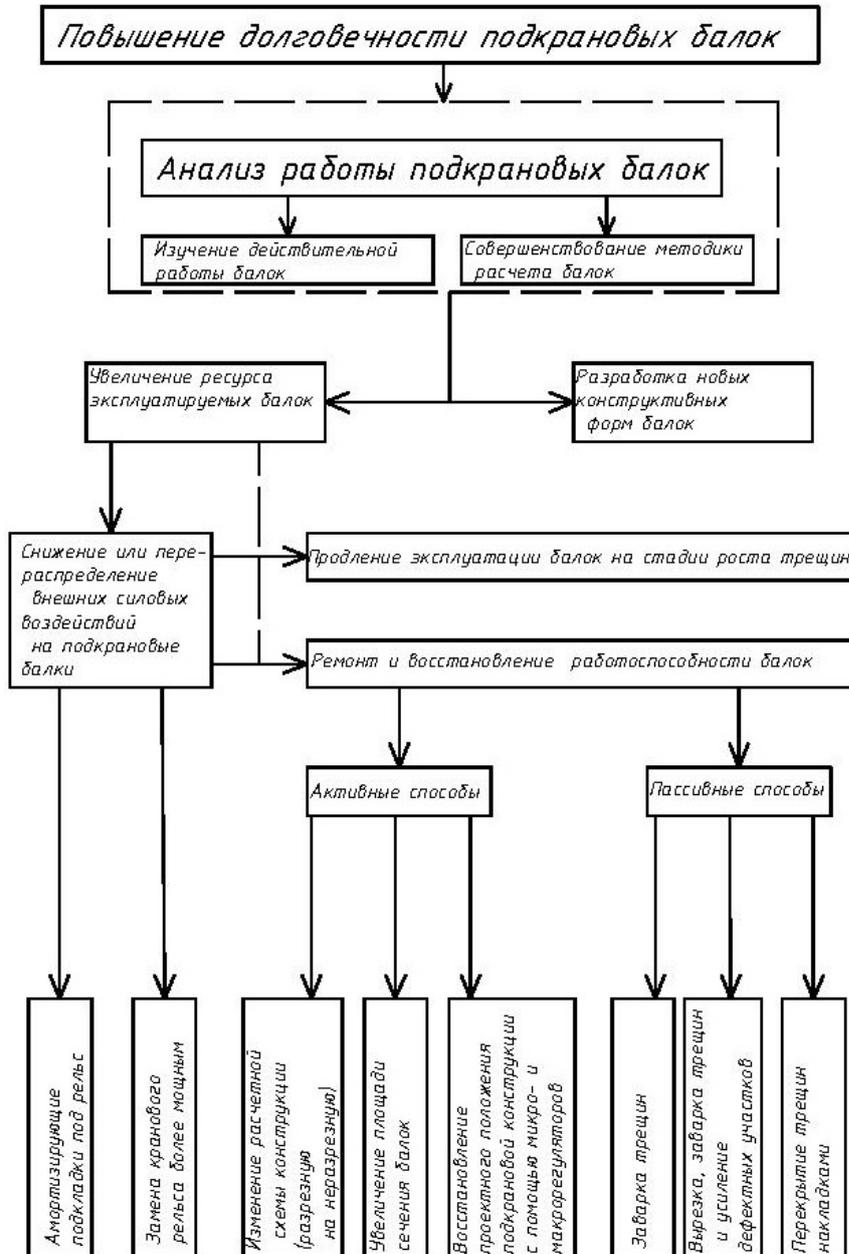


Рис. 1. Классификационная схема путей повышения долговечности подкрановых балок

Важной задачей при конструировании подкрановых балок является снижение пролетного изгибающего момента, что позволяет применять в конструкциях балок прокатные профили [1, 2]. Этого можно добиться, используя принцип концентрации материала (подбор выгодного сочетания жесткостей). Оказалось целесообразным увеличение жесткости надопорной части балки. Ниже приведены результаты изменения напряженного состояния в неразрезной семипролетной подкрановой балке при изменении жесткости надопорных частей балки и при изменении величин длин жестких вставок.

При расчете на подвижную крановую нагрузку максимально возможного пролетного и опорного моментов в 7-пролетной неразрезной подкрановой балке с разными пролетами и жесткостями надопорных вставок выяснилось, что правило Винклера не

действует (наибольший изгибающий момент в подкрановой балке от заданной системы сил возникает, когда равнодействующая всех сил, находящихся на балке, и ближайшая к ней сила равноудалены от середины пролета балки; при этом наибольший изгибающий момент  $M_{\text{таx}}$  будет находиться под силой, ближайшей к середине пролета балки). Опорные моменты не равны нулю; сила, под которой возникает наибольший изгибающий пролетный момент, смещается [3]. Одним из способов определения максимального пролетного момента является метод пошагового сравнения, в котором два сближенных крана пошагово передвигаются по балке; сравниваются моменты под колесами крана с предыдущими значениями моментов; определяется координата положения кранов, при которой возникает наибольший изгибающий момент.

При заданных геометрических параметрах и жесткостных характеристиках исследуемой конструкции (рис. 2, 3) нами были определены расчётные величины крановой нагрузки (табл. 1).

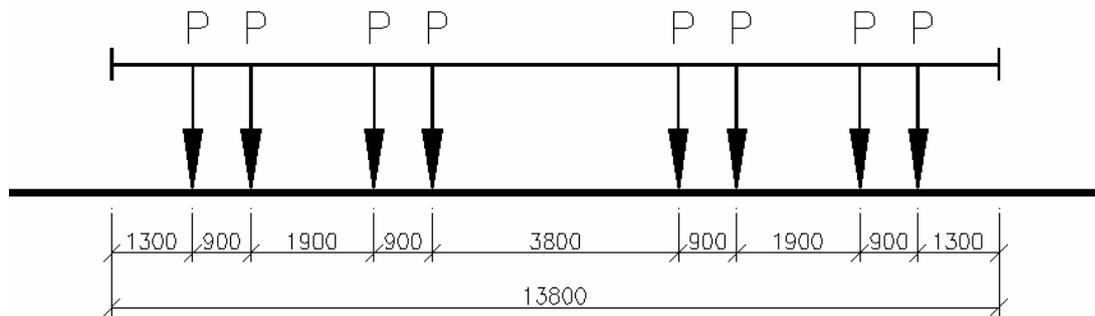


Рис. 2. Расчетная схема мостового крана грузоподъемностью 160 т

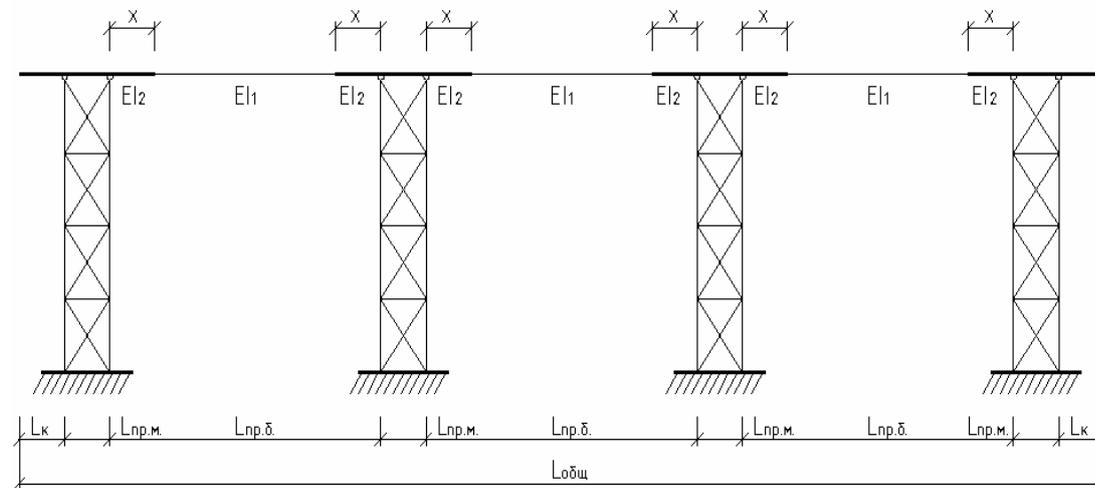


Рис. 3. Геометрические характеристики неразрезной подкрановой балки

Т а б л и ц а 1

Сосредоточенные силы, передающиеся на балку

Сила, передающаяся от колеса крана на балку	Норматив. сила, гН	Коэффициенты				Расчетная сила, гН
		надежн.	динамичн.	сочетания	массы m	
Вертикальная P	3500	1,1	1,1	0,95	1,03	4145
Горизонтальная T	700	1,1	1,1	0,95	-	805

При расчётах крановая нагрузка принималась в соответствии с ГОСТ и определялась от двух сближенных кранов. Габариты исследуемой конструкции:  $L_B = 24$  м;  $L_{ПР.М} = 4$  м;  $L_K = 4$  м;  $L_{общ} = 96$  м.

Для анализа напряженного состояния неразрезной 7-пролетной балки производился контроль изменений моментов при изменении величины жесткости вставки (табл. 2–5; рис. 4, 5).

Т а б л и ц а 2

Значения максимальных опорных и пролетных моментов  
при длине жесткой вставки 2 м

Жесткая вставка длиной 2м			
$EI_2/EI_1$	$M_{ОП, ПРАВ},$ гН·м	$M_{ПР, МАХ},$ гН·м	$M_{ОП, ЛЕВ},$ гН·м
1,0	-102924	71352	-103794
1,5	-110996	63601	-111254
2,0	-115275	59154	-115755
2,5	-118259	56346	-118471
3,0	-120354	54350	-120367
3,5	-121905	52875	-121767
4,0	-123100	51739	-122844
4,5	-124048	50838	-123698
5,0	-124819	50105	-124392
5,5	-125459	49498	-124967
6,0	-125997	48986	-125452
6,5	-126457	48550	-125865
7,0	-126854	48172	-126223
7,5	-127201	47843	-126534
8,0	-127506	47553	-126809
8,5	-127777	47296	-127052
9,0	-128018	47067	-127270
9,5	-128235	46861	-127465
10,0	-128431	46674	-127642

Т а б л и ц а 3

Значения максимальных опорных и пролетных моментов  
при длине жесткой вставки 3 м

Жесткая вставка длиной 3 м			
$EI_2/EI_1$	$M_{ОП, ПРАВ},$ гН·м	$M_{ПР, МАХ},$ гН·м	$M_{ОП, ЛЕВ},$ гН·м
1	2	3	4
1,0	-102924	71352	-103794
1,5	-112786	61399	-114032
2,0	-118542	55218	-120204
2,5	-122739	50995	-124457
3,0	-125784	47922	-127556
3,5	-128095	45587	-129916
4,0	-129908	43751	-131774
4,5	-131367	42271	-133276
5,0	-132567	41052	-134515
5,5	-133570	40030	-135556
6,0	-134422	39161	-136442
6,5	-135153	38413	-137206
7,0	-135788	37763	-137872
7,5	-136345	37193	-138457
8,0	-136837	36688	-138975

1	2	3	4
8,5	-137274	36238	-139438
9,0	-137665	35835	-139863
9,5	-138018	35471	-140228
10,0	-134026	40477	-134191

Т а б л и ц а 4

Значения максимальных опорных и пролетных моментов  
при длине жесткой вставки 4 м

Жесткая вставка длиной 4м			
$EI_2/EI_1$	$M_{\text{ОП, ПРАВ,}}$ гН·м	$M_{\text{ПР, МАХ,}}$ гН·м	$M_{\text{ОП, ЛЕВ,}}$ гН·м
1,0	-102924	71352	-103794
1,5	-112786	61399	-114032
2,0	-118542	55218	-120204
2,5	-122739	50995	-124457
3,0	-125784	47922	-127556
3,5	-128095	45587	-129916
4,0	-129908	43751	-131774
4,5	-131367	42271	-133276
5,0	-132567	41052	-134515
5,5	-133570	40030	-135556
6,0	-134422	39161	-136442
6,5	-135153	38413	-137206
7,0	-135788	37763	-137872
7,5	-136345	37193	-138457
8,0	-136837	36688	-138975
8,5	-137274	36238	-139438
9,0	-137665	35835	-139863
9,5	-138018	35471	-140228
10,0	-138337	35141	-140568

Т а б л и ц а 5

Значения максимальных опорных и пролетных моментов  
при длине жесткой вставки 5 м

Жесткая вставка длиной 5м			
$EI_2/EI_1$	$M_{\text{ОП, ПРАВ,}}$ гН·м	$M_{\text{ПР, МАХ,}}$ гН·м	$M_{\text{ОП, ЛЕВ,}}$ гН·м
1	2	3	4
1,0	-102924	71352	-103794
1,5	-112905	61120	-114277
2,0	-119404	54413	-126252
2,5	-124017	49677	-126252
3,0	-127383	46155	-129932
3,5	-129967	43433	-132795
4,0	-132009	41266	-135089
4,5	-133661	39500	-136971
5,0	-135025	38603	-138544
5,5	-136167	36795	-139879
6,0	-137139	35736	-141027
6,5	-137974	34820	-142025
7,0	-138699	34020	-142902
7,5	-139334	33315	-143678
8,0	-139895	32689	-144370

1	2	3	4
8,5	-140393	32130	-144991
9,0	-140839	31627	-145552
9,5	-141240	31172	-146061
10,0	-141603	30759	-146525

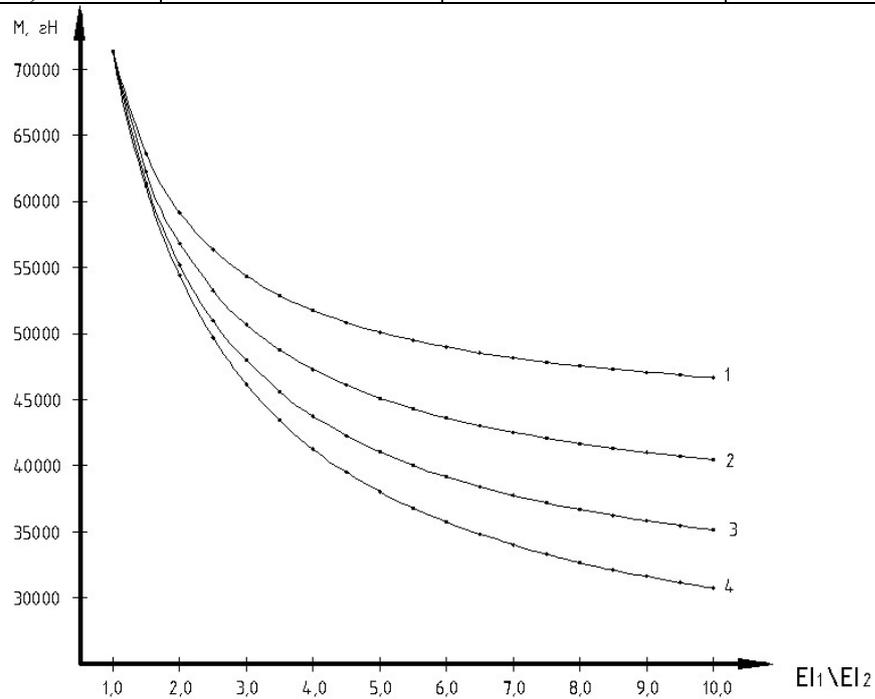


Рис. 4. Изменение пролетного момента в зависимости от изменения длины и жесткости надпорной вставки:

1 – длина жесткой вставки 2 м; 2 – длина жесткой вставки 3 м; 3 – длина жесткой вставки 4 м; 4 – длина жесткой вставки 5 м

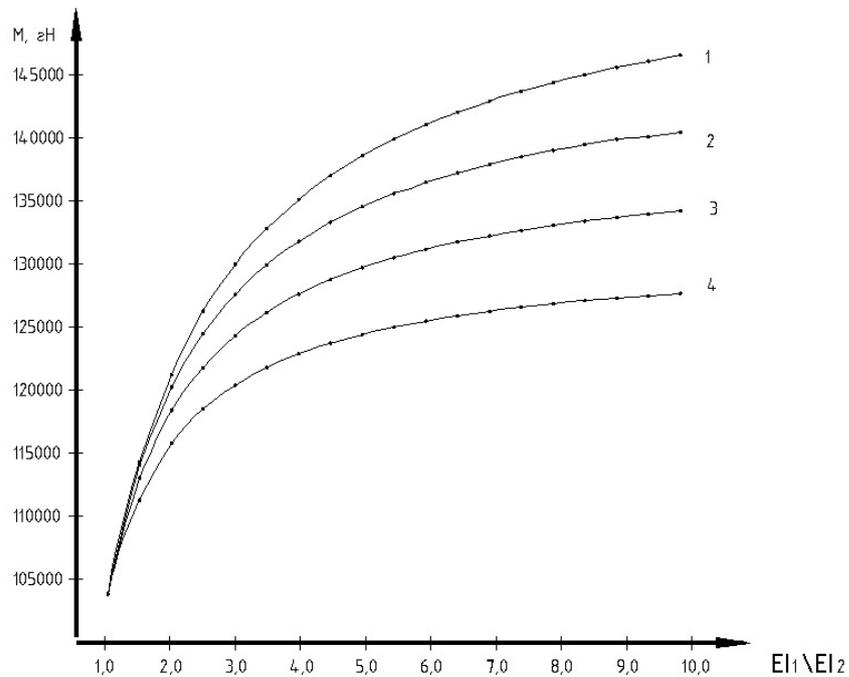


Рис. 5. Изменение опорного момента в зависимости от изменения длины и жесткости надпорной вставки:

1 – длина жесткой вставки 5 м; 2 – длина жесткой вставки 4 м; 3 – длина жесткой вставки 3 м; 4 – длина жесткой вставки 2 м

Анализ изменения пролетного момента в зависимости от изменения длины и жесткости надопорной вставки (см. рис. 4) и изменения опорного момента в зависимости от изменения длины и жесткости надопорной вставки (см. рис. 5) показал (предпосылки для возможности расчета (подбора) оптимального сечения подкрановой балки) [4]:

- при увеличении жесткости надопорной жесткой вставки происходят уменьшение значения пролетного момента и возрастание значения опорного момента; интенсивное изменение пролетного момента наблюдается при соотношении жесткостей жесткой вставки и подкрановой балки ( $\frac{EI_1}{EI_2}$ ) от 1 до 6; при большем значении соотношения изменение становится незначительным и приводит к нерациональному перерасходу материала;

- изменение значений пролетного и опорного моментов зависит от изменения длины жесткой надопорной вставки: при увеличении длины жесткой вставки происходит уменьшение пролетного момента и увеличение опорного; рациональной длиной жесткой вставки является длина, составляющая 1/6 от величины пролета подкрановой конструкции.

- с точки зрения концентрации материала рациональными являются соотношение жесткостей  $\frac{EI_1}{EI_2} = 4$ , длина вставки 4 м.

#### Список литературы

1. 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.
2. Гарькин, И.Н. Экспериментальное определение выносливости составных неразрезных подкрановых балок / И.Н. Гарькин // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2017. – № 2 (5). – С. 28–33.
3. Сабуров, В.Ф. Использование моделей упругого основания для анализа распределения локальных напряжений в стенке стальных составных балок / В.Ф. Сабуров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2014. – № 4, Т. 14. – С. 15–20.
4. Гарькин, И.Н. Теоретические исследования составных неразрезных подкрановых балок / И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 2 (35). – С.100–104.

#### References

1. Nezhdanov, K.K. Advantages of using continuous crane structures / K.K. Nezhdanov, I.N. Garkin // PGUAS Bulletin: construction, science and education. – 2018. – № 1. – P. 9–16.
2. Garkin, I.N. Experimental determination of the endurance of composite continuous crane girders / I.N. Garkin // Bulletin of PGUAS: construction, science and education. – 2017. – № 2 (5). – P. 28–33.
3. Saburov, V.F. Using models of elastic foundation to analyze the distribution of local stresses in the wall of steel composite beams / V.F. Saburov // Bulletin of the South Ural State University. Series: Building and Architecture. – 2014. – № 4, vol. 14. – P. 15–20.
4. Garkin, I.N. Theoretical studies of composite continuous crane girders / I.N. Garkin // Regional architecture and construction. – 2018. – № 2 (35). – P. 100–104.

УДК 69.059.032

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

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

**Нежданов Кирилл Константинович,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Строительные конструкции»

**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

**Nezhdanov Kirill Konstantinovich,**  
Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Building constructions»

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

## ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОЛОНН КАК ТРУБОБЕТОННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОВАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

К.К. Нежданов, И.Н. Гарькин

Рассмотрено повышение несущей способности колонн при их восстановлении на основе представления в виде трубобетонного стержня овального сечения. Показана возможность повышения моментов инерции овального сечения колонны при кручении более чем в 2 раза. Приведены результаты апробации на примере восстановления несущей способности колонн на одном из предприятий г. Пензы.

*Ключевые слова:* усиление колонн, овальное сечение, трубобетонный стержень, строительные конструкции, здания и сооружения.

## INCREASING THE BEARING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS

K.K. Nezhdanov, I.N. Garkin

Method is proposed for restoring and increasing the bearing capacity of columns by transforming them into a concrete pipe rod of oval cross section. On the basis of mathematical dependencies increasing the moments of inertia during torsion up to 2 times is shown. The results of testing on the example of the restoration of bearing capacity of columns at the enterprise of Penza are shown.

*Keywords:* column reinforcement, oval section, pipe-concrete rod, building structures, buildings and structures

Одной из наиболее актуальных проблем при реконструкции зданий и сооружений является повышение долговечности, надёжности и восстановление утративших несущую способность конструкций зданий без остановки производственного процесса.

Представляем один из способов для восстановления несущей способности железобетонных колонн превращением их в трубобетонные. Данный метод был разработан и запатентован [1].

Железобетонные конструкции подвержены коррозии бетона и арматуры. Особенно опасна коррозия арматуры внутри сечения колонны или балки. Продукты коррозии имеют объем в несколько раз больший, чем первоначальный объем стали. Поэтому внутри железобетонного сечения создается внутреннее давление, легко раскалывающее бетон. Это приводит к отслоению и обрушению защитного слоя. На ТЭЦ-1 г. Пензы, имеющей железобетонные колонны сечением 1400×700 мм с защитным слоем 75 мм, наблюдалось резкое снижение несущей способности при обрушении защитного слоя бетона. Площадь сечения колонны равна  $A=140 \times 70=9800 \text{ см}^2$  (100 %). После обруше-

ния защитного слоя имеем площадь сечения:  $A = (140-2-7,5) \times (75-2-7,5) = 7500 \text{ см}^2$  (76,5 %).

Уменьшение площади сечения составило 24,5 %. Снижение несущей способности всей колонны значительно больше, в результате коррозии площадь сечения арматуры уменьшилась на 20...25 %.

После деформирования цилиндрической в сечении трубы и придания её сечению эллиптической формы происходит значительное увеличение момента сопротивления  $W_x$  относительно главной горизонтальной оси  $X$  сечения. Поэтому для усиления повреждённой коррозией бетона и арматуры колонны применим обойму из стальной овальной трубы.

Используя же новый метод превращения железобетонных колонн в трубобетонные, можно восстановить несущую способность каркаса здания без остановки производственного процесса в нём.

Рассмотрим преимущества овального сечения перед круглым, исходя из проверки прочности балки по изгибающему моменту  $M$ .

Сечение балки подбирают по максимальному изгибающему моменту  $M$  в ней. Проверку прочности балки в этом сечении производят по формуле

$$\sigma = \frac{M}{W_x} \leq \gamma R_y. \quad (1)$$

Эффективность конкретного профиля сечения характеризует радиус ядра сечения:

$$\rho = \frac{W_x}{A}, \quad (2)$$

где  $A$  – площадь профиля сечения.

Сравнивая сортаменты двутавровых профилей цилиндрических труб [2], легко заметить, что при одинаковой материалоемкости цилиндрические трубы обладают меньшими моментами сопротивления и меньшими радиусами ядра сечения, чем двутавры.

Для цилиндрической трубы 3 (см. рисунок) радиус ядра сечения

$$\rho = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64 \cdot D \cdot A}, \quad (3)$$

$$A = \pi \cdot d_{\text{cp}} \cdot t = \frac{\pi}{4} [(d+t)^2 - (d-t)^2], \quad (4)$$

$$\rho = \frac{\frac{\pi}{64} [(d_{\text{cp}} + t)^4 - (d_{\text{cp}} - t)^4] \cdot 2}{\frac{\pi}{4} [(d_{\text{cp}} + t)^2 - (d_{\text{cp}} - t)^2] \cdot D} = \frac{(d_{\text{cp}} + t)^2 + (d_{\text{cp}} - t)^2}{8 \cdot D}, \quad (5)$$

$$\rho = \frac{d_{\text{cp}}^2 + t^2}{4 \cdot D} = \frac{(D-t)^2 + t^2}{4 \cdot D}, \quad (6)$$

$$\varnothing 102 \cdot 0,8 \text{ см} \quad \rho = \frac{(102-0,8)^2 + 0,8^2}{4(102-0,8)} = 12,65 \cdot 2 = 25,13 \text{ см},$$

или

$$J_x = A \cdot r^2 = 254 \cdot 35,8^2 = 325536,6 \text{ см}^4,$$

$$W_x = \frac{2 \cdot J_x}{D} = 6383 \text{ см}^3,$$

$$\rho = \frac{6383}{254} = 25,13 \text{ см.}$$

$n = \frac{2h}{b}$  соответствует максимальному моменту сопротивления, определяемому из

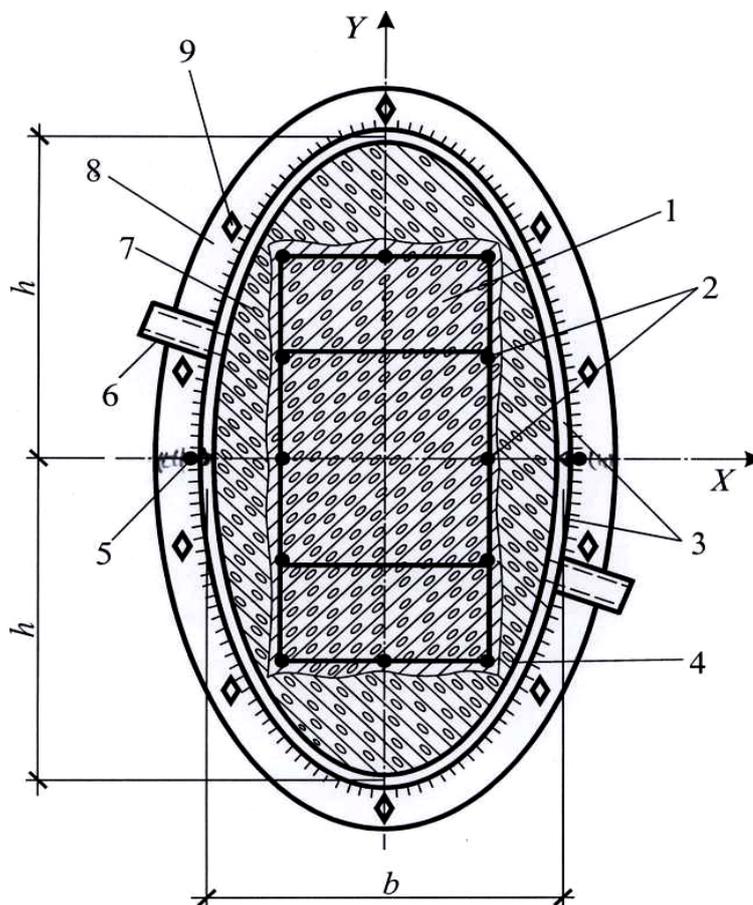
кубического уравнения:

$$n^3 - 3n^2 + \frac{3n}{1 + \left(\frac{3A}{4t^2}\right)^2} + \frac{1}{1 + \left(\frac{3A}{4t^2}\right)^2} = 0, \quad (7)$$

где  $h$  – высота арки от главной оси  $X$  до профиля сечения срединной линии;  $b$  – ширина арки по срединной линии;  $t$  – толщина стенки, обжимаемой валками трубы;  $A$  – площадь овального сечения;

и главному моменту инерции:

$$J_x = \frac{6A}{35} \left( 2h^2 + \frac{5}{6}t^2 \right).$$



Сечение повреждённой железобетонной колонны, усиленное стальной овальной обоймой:  
 1 – железобетонная колонна; 2 – продольная рабочая арматура; 3 – стальная овальная обойма;  
 4 – взаимно зеркальные лотки; 5 – стыковой шов; 6 – патрубки; 7 – лотки; 8 – фланцы;  
 9 – отверстия для болтов

Введём следующие обозначения:

$h$  – высота каждой из арок от главной оси  $X$  до средней линии;  $b$  – ширина как прямой, так и зеркальной арки;  $t$  – толщина арки;  $h+t/2$  – максимальная высота арки;  $b+t$  – максимальная ширина арки;  $2(h-t)$  – максимальный размер полости овала по вер-

тикали;  $b-t$  – максимальная ширина полости по горизонтали;  $n = \frac{2h}{b}$  – относительная высота сечения.

Площадь овального сечения из взаимно зеркальных арок остаётся постоянной – const

$$A = \frac{4}{3} \left[ (b+t) \left( h + \frac{t}{2} \right) - (b-t) \left( h - \frac{t}{2} \right) \right] = \frac{8}{3} t \left( h + \frac{b}{2} \right), \quad (8)$$

отсюда

$$b = \frac{3 \cdot A}{4 \cdot t} - 2 \cdot h.$$

Обозначим относительную высоту овального профиля, то есть отношение большего диаметра по средней линии к меньшему диаметру

$$n = \frac{2 \cdot h}{b} \Rightarrow b = \frac{2 \cdot h}{n}, \quad (9)$$

тогда  $A = \frac{8}{3} t \left( h + \frac{h}{n} \right) \Rightarrow A = \frac{8}{3} t \cdot h \left( 1 + \frac{1}{n} \right) \Rightarrow$

$$h = \frac{3}{8} \cdot \frac{A}{t \left( 1 + \frac{1}{n} \right)}; \quad (10)$$

$$b = \frac{3}{4} \cdot \frac{A}{t \cdot n \left( 1 + \frac{1}{n} \right)}. \quad (11)$$

Главный момент инерции  $J_x$  овального профиля относительно оси  $X$ :

$$J_x = \frac{2 \cdot 16}{105} \left[ (b+t) \left( h + \frac{t}{2} \right)^3 - (b-t) \left( h - \frac{t}{2} \right)^3 \right].$$

$$J_x = \frac{64 \cdot t}{105} \left[ \frac{3}{2} h^2 \cdot b + \frac{b \cdot t^2}{8} + h^3 + \frac{3}{4} t^2 \cdot h \right]. \quad (12)$$

Момент сопротивления овального профиля на уровне средней линии:

$$W_x = \frac{64 \cdot t}{105} \left[ \frac{3}{2} h \cdot b + \frac{b \cdot t^2}{8 \cdot h} + h^2 + \frac{3}{4} t^2 \right].$$

Подставим (9) в (11):

$$W_x = \frac{64 \cdot t}{105} \left\{ -2h^2 + \frac{9}{8} \cdot \frac{A}{t} h - \frac{t^2}{4} + \frac{3}{4} t^2 + \frac{3}{32} \cdot \frac{A \cdot t}{h} \right\} \quad (13)$$

Найдём экстремум момента сопротивления  $W_x$  в зависимости от высоты арки  $h$  при постоянной площади сечения  $A = \text{const}$

$$\frac{dW_x}{dh} = \frac{64 \cdot t}{105} \left[ -4h + \frac{9}{8} \cdot \frac{A}{t} - \frac{3}{32} \cdot \frac{A \cdot t}{h^2} \right] = 0.$$

Для нахождения высоты арки  $h$ , при которой момент сопротивления достигает экстремума, получим уравнение третьей степени, которое легко решается:

$$h^3 - \frac{9}{32} \cdot \frac{A}{t} h^2 + \frac{3}{128} A \cdot t = 0. \quad (14)$$

После подстановки (10) и (11) в (8) получим значение момента сопротивления  $W_x$  нового овального профиля в зависимости от его относительной высоты  $n = \frac{2 \cdot h}{b}$ . Площадь сечения  $A - \text{const}$ .

$$W_x = \frac{64 \cdot t}{105} \left( -\frac{9 \cdot A^2}{32 \cdot t^2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^2} + \frac{27 \cdot A^2}{64 \cdot t^2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)} + \frac{t^2}{2} + \frac{t^2}{4} \left(1 + \frac{1}{n}\right) \right) \quad (15)$$

Взяв производную от (15)  $\frac{dW_x}{dn} = 0$ , получим уравнение третьей степени для определения относительной высоты профиля  $n = \frac{2 \cdot h}{b}$ , при которой его момент сопротивления  $W_x$  достигает максимума:

$$n^3 - 3n^2 + \frac{3}{\left(\frac{3}{4} \cdot \frac{A}{t^2}\right)^2 + 1} \cdot n + \frac{1}{\left(\frac{3}{4} \cdot \frac{A}{t^2}\right)^2 + 1} = 0 \quad (16)$$

Например, для трубы диаметром 1420 мм,  $A = 443 \text{ см}^2$ ,  $t = 1 \text{ см}$   
 $n^3 - 3n^2 + 2,7176114 \cdot 10^{-5} \cdot n + 9,0587045 \cdot 10^{-6} = 0$ ,  
 $n = 2,99999$ .

Для тонкостенных профилей получаем максимум момента сопротивления  $W_x$  при  $n = 3$  из (10):

$$h = \frac{9}{32} \cdot \frac{A}{t}, \quad b = \frac{2h}{3}. \quad (17)$$

Главный момент инерции  $J_x$  овального профиля равен:

$$J_x = \frac{6}{35} A \left( 2h^2 + \frac{5}{6} t^2 \right). \quad (18)$$

Его максимальный момент сопротивления

$$W_x = \frac{J_x}{h + 0,5t}. \quad (19)$$

#### Выводы:

- превращение колонн в трубобетонные, восстановление несущей способности каркаса сооружения выполняют без остановки производственного процесса в цехе;
- несущая способность трубобетонных колонн каркаса увеличена в 2-3 раза по сравнению с первоначальной, бетон в стальной овальной обойме имеет большой момент инерции  $J_x$  и момент сопротивления  $W_x$  относительно оси  $X$ ;

• трудоёмкость выполнения работ по усилению конструкций значительно снижена, так как трудоёмкие процессы по изготовлению опалубки, армированию и бетонированию на высоте исключены.

Данный метод может быть применён практически в любых промышленных зданиях и сооружениях, его эффективность была доказана на практике, во время реконструкции одной из ТЭЦ г. Пензы.

#### Список литературы

1. Пат.2274719 РФ Способ усиления железобетонной колонны, утратившей несущую способность: Е 04G 23/02 / Нежданов К.К., Туманов В.А., Нежданов А.К., Туманов А.В.//зарег.20.04.2006 г. Бюл. №11.
2. Кудзис, А.П. Железобетонные и каменные конструкции: в 2-х ч. Ч 1. Материалы, конструирование, теория и расчет / А.П. Кудзис. – М.: Высш. шк., 1988. – 287 с.
3. Гарькин, И.Н. Экспертиза промышленной безопасности: обследование зданий с крановыми нагрузками / И.Н. Гарькин, И.А. Гарькина // Современные наукоемкие технологии. – № 5. – 2018. – С. 41–45.
4. Гарькин, И.Н. Анализ причин обрушения мачты сотовой связи в Пензенской области / И.Н. Гарькин, Н.В. Агафонкина // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2016. – №3. – С.49–56.
5. Клюев, С.В. Пределы идентификации природных и инженерных конструкций / С.В. Клюев, А.В. Клюев // Фундаментальные исследования. – 2007. – №12–2. – С.68–70.

#### References

1. Pat. 2274719 RF A method of strengthening a reinforced concrete column, which has lost its carrying capacity: E 04G 23/02 / Nezhdanov K.K., Tumanov V.A., Nezhdanov A.K., Tumanov A.V. // reg.20.04.2006. Bul.№11.
2. Kujzis, A.P. Reinforced concrete and stone structures: in 2 p. P. 1. Materials, design, theory and calculation / A.P. Kujzis. – M.: Higher. school, 1988. – 287 p.
3. Garkin, I.N. Examination of industrial safety: inspection of buildings with crane loads / I.N. Garkin, I.A. Garkina // Modern high technologies. – № 5. – 2018. – P. 41–45.
4. Garkin, I.N. Analysis of the causes of the collapse of the cellular mast in the Penza region / I.N. Garkin, N.V. Agafonkina // Education and science in the modern world. Innovation. – 2016 –№3. – С.49–56.
5. Klyuev, S.V. The limits of identification of natural and engineering structures / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev // Fundamental research. – 2007. – №12–2. – P.68–70.

# ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

## ENGINEERING SYSTEMS

УДК 696.2

*Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина*

Россия, 410054, г. Саратов,  
ул. Политехническая, 77,  
тел.: (8452) 99-88-11; факс: (8452) 99-88-10

**Осипова Наталия Николаевна,**  
доктор технических наук, доцент,  
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение,  
вентиляция, водообеспечение и прикладная  
гидрогазодинамика»  
E-mail: osnat75@mail.ru

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

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

**Гришин Борис Михайлович,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Водоснабжение,  
водоотведение и гидротехника»  
E-mail: bgrishin@rambler.ru

**Родионов Юрий Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор,  
директор автомобильно-дорожного института  
E-mail: rodionov@pguas.ru

**Тараканов Олег Вячеславович,**  
доктор технических наук, профессор,  
декан факультета управления  
территориями  
E-mail: zigk@pguas.ru

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov*

Russia, 410054, Saratov, 77,  
Polytechnicheskaya St.  
tel.: (8452) 99-88-11; факс: (8452) 99-88-10

**Osipova Natalya Nikolaevna,**  
Doctor of Science, Associate Professor,  
Head of Department «Heat and Gas Supply,  
Ventilation, Water Supply and Applied  
Hydroaerodynamics»  
E-mail: osnat75@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

**Grishin Boris Mikhailovich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Water supply,  
sewerage and hydraulic engineering»  
E-mail: bgrishin@rambler.ru.

**Rodionov Yurii Vladimirovich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Director of Automobile Engineering Institute  
E-mail: rodionov@pguas.ru

**Tarakanov Oleg Vyacheslavovich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Dean of the faculty of territorial  
administration  
E-mail: zigk@pguas.ru

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КРИСТАЛЛОГИДРАТОВ В РЕГУЛЯТОРАХ ДАВЛЕНИЯ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ РЕЗЕРВУАРНЫХ УСТАНОВОК

Н.Н. Осипова, Б.М. Гришин, Ю.В. Родионов, О.В. Тараканов

Рассмотрены процессы теплообмена элементов системы газоснабжения с окружающей средой и определены температурные режимы их эксплуатации. На основе теоретических и экспериментальных исследований выявлены условия, обеспечивающие предупреждение образования кристаллогидратов в регуляторах давления при эксплуатации резервуарных установок с естественной регазификацией сжиженного углеводородного газа. Даны значения оптимальной толщины тепловой изоляции элементов системы газоснабжения, позволяющей сохранить перегрев паровой фазы сжиженного углеводородного газа до регулятора давления и исключить возможность образования гидратов.

*Ключевые слова: сжиженный углеводородный газ, система газоснабжения, резервуарная установка, гидратообразование, грунтовый теплообменник, регулятор давления*

# ENSURING THE CONDITIONS FOR THE PREVENTION OF CRYSTAL HYDRATES FORMATION IN PRESSURE REGULATORS OF GAS SUPPLY SYSTEMS ON THE BASIS OF TANK INSTALLATIONS

N.N. Osipova, B.M. Grishin, Yu.V. Rodionov, O.V. Tarakanov

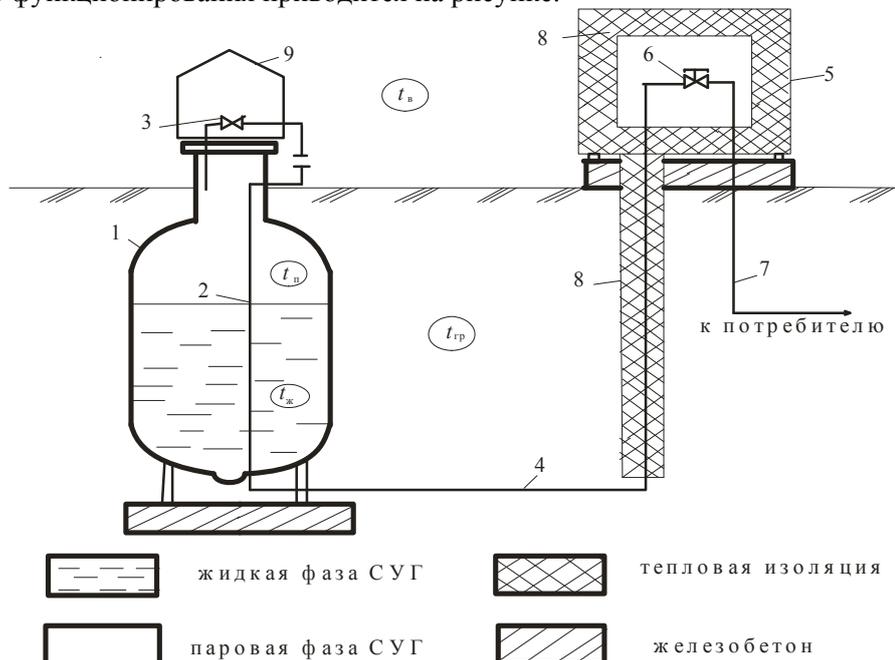
The processes of gas supply system elements heat exchange with the environment are considered and the temperature regimes of their operation are determined. Based on theoretical and experimental studies, conditions have been identified that ensure the prevention of the crystalline hydrates formation in pressure regulators during the operation of reservoir installations with natural regasification of liquefied petroleum gas. The values of the thermal insulation optimal thickness for the gas supply system elements are given in order to remain the superheat of the liquefied petroleum gas vapor phase before the pressure regulator and to exclude the possibility of hydrate formation.

*Keywords: liquefied petroleum gas, gas supply system, tank installation, hydrate formation, ground heat exchanger, pressure regulator*

## ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследований, представленные в [1, 2], свидетельствуют о том, что работа системы газоснабжения «подземный резервуар – газорегуляторная установка» без кристаллизации влаги обеспечивается при любом, в том числе и минимально возможном перегреве паровой фазы сжиженного газа, что создает объективные предпосылки к безгидратной эксплуатации применительно к резервуарным установкам с естественной регазификацией сжиженного углеводородного газа (СУГ).

Принципиальная схема системы газоснабжения, реализующей принципы безгидратного функционирования приводится на рисунке.



Принципиальная схема системы снабжения сжиженным газом от подземной резервуарной установки с перегревом паров в трубчатом грунтовом теплообменнике:

1 – подземный резервуар; 2 – трубопровод паровой фазы СУГ; 3 – вентиль; 4 – трубчатый грунтовый теплообменник; 5 – шкафной газорегуляторный пункт; 6 – регулятор давления; 7 – газопровод низкого давления; 8 – тепловая изоляция; 9 – резервуарная головка

Схема работает следующим образом. Паровая фаза СУГ отбирается из подземного резервуара 1 с помощью трубопровода паровой фазы 2 и подается в грунтовой теплообменник 4, выполненный из стальной трубы, проложенной по контуру котлована

резервуарной установки. Для защиты от коррозии трубопровод изолируется полимерной пленкой толщиной 2 мм. Для отключения грунтового теплообменника при проведении ремонтных работ используется вентиль 3, располагаемый в резервуарной головке 9. В грунтовом теплообменнике паровая фаза СУГ перегревается за счет естественной теплоты грунтового массива. Перегретые пары по восходящему участку грунтового теплообменника поступают в шкафной газорегуляторный пункт 5. Редуцирующий узел шкафного газорегуляторного пункта 6 комплектуется на базе газового оборудования типового газорегуляторного пункта ГРПШ-6, в который встроены предохранительный сбросной и запорный клапаны, а также фильтр. Пройдя узел редуцирования, паровая фаза СУГ поступает в трубопровод потребителя 7. Для уменьшения теплотерь, а следовательно, и для предотвращения охлаждения перегретого газа восходящий участок грунтового теплообменника, а также шкаф для узла редуцирования покрываются теплоизолирующим материалом 8.

Для адекватного выбора необходимой толщины изоляционного слоя необходимо провести исследование процессов теплообмена между грунтом и паровой фазой сжиженного газа в элементах предлагаемой схемы: подземном резервуаре, грунтовом теплообменнике, восходящем участке теплообменника и шкафном газорегуляторном пункте.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Задача теплового взаимодействия резервуара сжиженного углеводородного газа с грунтом формулируется в математической постановке в виде следующей системы уравнений:

- а) дифференциальные уравнения температурных полей:  
– в металлической стенке резервуара

$$\frac{\partial^2 t_{ст}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t_{ст}}{\partial r} + \frac{\partial^2 t_{ст}}{\partial y^2} = 0; \quad (1)$$

- в антикоррозийной изоляции резервуара

$$\frac{\partial^2 t_{и}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t_{и}}{\partial r} + \frac{\partial^2 t_{и}}{\partial y^2} = 0; \quad (2)$$

- в мерзлой зоне грунта

$$\frac{\partial^2 t_{м}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t_{м}}{\partial r} + \frac{\partial^2 t_{м}}{\partial y^2} = 0; \quad (3)$$

- в талой зоне грунта

$$\frac{\partial^2 t_{т}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t_{т}}{\partial r} + \frac{\partial^2 t_{т}}{\partial y^2} = 0; \quad (4)$$

- б) граничные условия:

- на внутренней поверхности резервуара, работающей в режиме кипения СУГ,  $F_{кип}$ :

$$\alpha_{кип} (t_{F_{кип}} - t_{ж}) = \lambda_{ст} \left. \frac{\partial t_{ст}}{\partial n} \right|_{n_{F_{кип}}}; \quad (5)$$

- на внутренней поверхности резервуара, работающей в режиме конденсации СУГ,  $F_{конд}$ :

$$\alpha_{конд} (t_{F_{конд}} - t_{п}) = \lambda_{ст} \left. \frac{\partial t_{ст}}{\partial n} \right|_{n_{F_{конд}}}; \quad (6)$$

– на поверхности грунта  $F_{гр}$ :

$$\lambda_m \left( \frac{\partial t_m}{\partial y} \right)_{y=0} = \frac{t_{пов} - t_b}{\frac{\delta_{сн}}{\lambda_{сн}} + \frac{1}{\alpha_b}}, \quad (7)$$

откуда толщина дополнительного слоя грунта, эквивалентная термическому сопротивлению снежного покрова и теплоотдаче в наружный воздух,

$$H_{доп} = \frac{\lambda_m}{\lambda_{сн}} \delta_{сн} + \frac{\lambda_m}{\alpha_o}; \quad (8)$$

– в грунтовом массиве при  $y \rightarrow \infty$ ;  $r \rightarrow \infty$

$$t(y) = t_e(y); \quad (9)$$

в) уравнения сопряжения:

– между металлической стенкой и антикоррозийной изоляцией резервуара

$$\lambda_{ст} \frac{\partial t_{ст}}{\partial n} \Big|_{n_{F_{ст}}} = \lambda_{и} \frac{\partial t_{и}}{\partial n} \Big|_{n_{F_{и}}}; \quad (10)$$

– между антикоррозийной изоляцией и мерзлым грунтом

$$\lambda_{и} \frac{\partial t_{и}}{\partial n} \Big|_{n_{F_{и}}} = \lambda_m \frac{\partial t_m}{\partial n} \Big|_{n_{F_m}}; \quad (11)$$

– между мерзлой и талой зонами грунтами

$$\lambda_m \frac{\partial t_m}{\partial n} \Big|_{n_{Ф}} = \lambda_T \frac{\partial t_T}{\partial n} \Big|_{n_{Ф}}; \quad (12)$$

г) уравнение теплового баланса резервуара

$$\int_{F_{кип}} \lambda_{ст} \frac{\partial t_{ст}}{\partial n} \Big|_{n_{F_{кип}}} = \int_{F_{конд}} \lambda_{ст} \frac{\partial t_{ст}}{\partial n} \Big|_{n_{F_{конд}}} + K(F_{нг} + F_{ф}) \cdot (t_{ж} - t_b). \quad (13)$$

В уравнениях (1)-(13) использованы следующие буквенные обозначения:

$t_m$ ,  $t_T$  – температура в мерзлой и талой зонах грунтах;  $t_{и}$ ,  $t_{ст}$  – температура антикоррозийной изоляции и металлической стенки резервуара;  $t_{F_{кип}}$  – температура на внутренней поверхности резервуара, работающей в режиме кипения СУГ;  $t_{F_{конд}}$  – температура на внутренней поверхности резервуара, работающей в режиме конденсации паров СУГ;  $t_{ж}$  – температура жидкой фазы СУГ;  $t_{пов}$  – температура поверхности грунтового массива;  $t_e(y)$  – естественное распределение температур в грунте;  $\alpha_{кип}$  – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности резервуара к жидкой фазе в режиме кипения СУГ;  $\alpha_{конд}$  – то же при конденсации паров СУГ;  $\alpha_b$  – коэффициент теплоотдачи от снежного покрова в воздух;  $\lambda_m$ ,  $\lambda_T$  – теплопроводность мерзлого и талого грунта;  $\lambda_{и}$ ,  $\lambda_{ст}$  – теплопроводность антикоррозийной изоляции и металлической стенки резервуара;  $\lambda_{сн}$  – теплопроводность снежного покрова;  $K$  – коэффициент теплопередачи наземного участка горловины и фланца;  $y$ ,  $r$  – координаты;  $n$  – нормаль к изометрической поверхности;  $\delta_{сн}$  – толщина снежного покрова;  $F_{гр}$  – поверхность грунта;  $F_{кип}$  – поверхность резервуара с кипением СУГ;  $F_{конд}$  – поверхность резервуара с конденсацией СУГ;  $F_{нг}$  – поверхность наземной части горловины;  $F_{ф}$  – поверхность фланца редуцирующей головки.

Результаты и реализации соответствующей математической модели представлены в публикациях [2, 3].

Исследование теплообмена паропровода сжиженного газа с грунтом проводилось с расчленением сложной теплотехнической задачи на четыре взаимосвязанные подзадачи в соответствии с представленной схемой резервуарной установки (см. рисунок):

- теплообмен на пароперегревательном участке подземного трубопровода;
- теплообмен на восходящем участке подземного трубопровода;
- теплообмен на восходящем участке надземного трубопровода;
- теплообмен в шкафном газорегуляторном пункте.

Для решения задач использовался конечно-разностный метод. Исходные предпосылки и алгоритмы решения представлены в публикациях [3, 4]. В целях численной реализации предложенных математических моделей были произведены соответствующие расчеты. В расчетах использовались следующие исходные данные:

- климатический район эксплуатации резервуарной установки – умеренно холодная зона;
- геометрический объем подземного резервуара сжиженного газа  $V=0,96 \text{ м}^3$ ;
- расход паровой фазы из резервуара  $G=1 \text{ кг/ч}$ ;
- теплоемкость паровой фазы  $c=0,47 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;
- техническая характеристика грунтового теплообменника – стальная бесшовная труба диаметром 26x3 мм с гидроизоляцией полимерной лентой толщиной 2 мм и теплопроводностью  $\lambda_{\text{из}}=0,174 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;
- глубина заложения пароперегревательного участка грунтового теплообменника  $h_{\text{гп}}=2,9 \text{ м}$ ;
- трубопровод пароперегревателя уложен по контуру котлована резервуарной установки с радиусом  $R_{\text{гп}}=1,9 \text{ м}$ ;
- материал тепловой изоляции восходящего участка грунтового теплообменника и шкафного ГРП – пенополиуретан теплопроводностью  $\lambda_{\text{из}}=0,019 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;
- наружный диаметр тепловой изоляции восходящего участка грунтового теплообменника  $d_{\text{впу,из}}=d_{\text{вну,из}}=0,1 \text{ м}$ ;
- наружный диаметр теплоизолированного шкафного ГРП  $D_{\text{нар}}=0,5 \text{ м}$ ;
- внутренний диаметр теплоизолированного шкафного ГРП  $D_{\text{вн}}=0,3 \text{ м}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты соответствующих расчетов представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Температурные режимы эксплуатации резервуарной установки сжиженного газа с перегревом паров в трубчатом грунтовом теплообменнике

Температура грунта на глубине заложения грунтового теплообменника, °С		Температура паровой фазы СУГ в элементах резервуарной установки, °С						
		подземный резервуар	пароперегреватель грунтового теплообменника		восходящий участок грунтового теплообменника		шкафной ГРП	
			на входе	на выходе	на входе	на выходе	на входе	перед регулятором давления газа
в естественном состоянии	с учетом теплового воздействия резервуара	-8,63	-8,63	+0,52	+0,52	-2,77	-2,77	-8,63

Как видно из табл. 1, прокладка грунтового теплообменника по контуру типового котлована резервуарной установки обеспечивает перегрев паровой фазы СУГ с минус 8,63°С до плюс 0,52°С, или на 9,15°С. Максимально возможный перегрев паров составляет 2,03-(-8,63)=10,66°С.

Таким образом, фактическая величина перегрева паров составляет 86 % от ее максимума. Дальнейшее возрастание степени перегрева требует существенного увеличения размеров котлована и длины пароперегревательного участка, что, в свою очередь, приводит к росту капитальных вложений в сооружение резервуарной установки и является экономически неоправданным.

Исследование процессов теплообмена между грунтом и паровой фазой сжиженного газа в подземном резервуаре, грунтовом теплообменнике, восходящем участке теплообменника и шкафном газорегуляторном пункте позволило обосновать перегрев паровой фазы сжиженного углеводородного газа и сформулировать предпосылки для выбора необходимой толщины изоляционного слоя вертикального (восходящего) участка трубчатого грунтового теплообменника и шкафного газорегуляторного пункта.

В качестве целевой функции задачи принимали капитальные вложения в сооружение теплоизолированных элементов паропровода СУГ по комплексу «восходящий участок грунтового теплообменника – шкафной ГРП»:

$$K = K_{\text{ву}} + K_{\text{шгрп}} = \min . \quad (14)$$

На основе выражения (14) была сформирована целевая функция задачи следующего вида:

$$K = f(\delta_{\text{ву,из}}; \delta_{\text{шгрп,из}}) = \min , \quad (15)$$

где  $\delta_{\text{ву,из}}$  – толщина тепловой изоляции на восходящем участке грунтового теплообменника, м;  $\delta_{\text{шгрп,из}}$  – толщина тепловой изоляции шкафа, м.

Управляющие параметры целевой функции были связаны между собой ограничением следующего вида:

$$\Delta t_{\text{п,ву}} = f(\delta_{\text{ву,из}}) ; \quad (16)$$

$$\Delta t_{\text{п,шгрп}} = f(\delta_{\text{шгрп,из}}) ; \quad (17)$$

в свою очередь,

$$\Delta t_{\text{п,ву}} + \Delta t_{\text{п,шгрп}} = t_{\text{п,шп}}^{\text{кон}} - t_{\text{п}} , \quad (18)$$

где  $\Delta t_{\text{п,ву}}; \Delta t_{\text{п,шгрп}}$  – перепад температур паровой фазы СУГ на восходящем участке грунтового теплообменника и в шкафном ГРП, °С;  $t_{\text{п,шп}}^{\text{кон}}$  – конечная температура паровой фазы на выходе из пароперегревательного участка грунтового теплообменника, °С;  $t_{\text{п}}$  – температура насыщенного пара на выходе из расходного резервуара, °С.

Целевая функция (15) и ограничения (16)-(18) формируют экономико-математическую модель задачи. Для нахождения минимума целевой функции был использован метод вариантных расчетов.

Задаваясь рядом значений  $\delta_{\text{ву,из}}$ , определяли наружный диаметр теплоизолированного трубопровода  $d_{\text{ву,из}}$ . В соответствии с математической моделью теплообмена на восходящем участке грунтового теплообменника определяли температуру паровой фазы СУГ на входе в шкафной газорегуляторный пункт  $t_{\text{п,шгрп}}^{\text{нач}} = t_{\text{п,вну}}^{\text{кон}}$ . Затем при заданном значении температуры на входе в регулятор давления  $t_{\text{п,шгрп}}^{\text{кон}} = t_{\text{п}}$  находили наружный диаметр теплоизолированного шкафа  $D_{\text{нар}}$  и необходимую толщину тепловой изоляции шкафа  $\delta_{\text{шгрп,из}}$ .

Варианту с минимальными капитальными вложениями  $K_{\min}$  соответствовали оптимальная толщина тепловой изоляции на восходящем участке грунтового теплообменника  $\delta_{\text{ву,из}}^{\text{opt}}$  и оптимальная толщина тепловой изоляции шкафного ГРП  $\delta_{\text{шгрп,из}}^{\text{opt}}$ .

В целях численной реализации предложенной математической модели были выполнены соответствующие расчеты. Определение оптимальных параметров тепловой изоляции проводилось для холодной, умеренно холодной и теплой климатических зон эксплуатации.

В расчетах использовались следующие исходные данные:

- геометрический объем подземного резервуара сжиженного газа  $V=0,96 \text{ м}^3$ ;
  - грунтовый теплообменник – стальная бесшовная труба диаметром 26×3 мм с гидроизоляцией полимерной лентой толщиной 2 мм и теплопроводностью  $\lambda_{\text{из}}=0,174 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;
  - глубина заложения пароперегревательного участка грунтового теплообменника  $h_{\text{пп}}=2,9 \text{ м}$ ;
  - трубопровод пароперегревателя уложен по контуру котлована резервуарной установки с радиусом  $R_{\text{пп}}=1,9 \text{ м}$ ;
  - материал тепловой изоляции восходящего участка грунтового теплообменника и шкафного газорегуляторного пункта – пенополиуретан теплопроводностью  $\lambda_{\text{из}}=0,019 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;
  - внутренний диаметр теплоизолированного шкафного газорегуляторного пункта  $D_{\text{вн}}=0,25 \text{ м}$ ;
  - температура паровой фазы в подземном резервуаре  $t_{\text{п}}=-8,63^\circ\text{C}$ ;
  - расход сжиженного газа  $G=1,0 \text{ кг/ч}$ ;
  - теплоемкость паровой фазы СУГ  $c=0,47 \text{ Вт}\cdot\text{ч/(кг}\cdot\text{К)}$ .
- Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Значения толщин тепловой изоляции элементов системы

Наименование участка	Толщина тепловой изоляции, м, при климатической зоне эксплуатации резервуарной установки			
	очень холодная	холодная	умеренно холодная	умеренно теплая
Восходящий участок грунтового теплообменника	0,074	0,07	0,065	0,063
Шкафной газорегуляторный пункт	0,099	0,090	0,084	0,082

При формировании систем газоснабжения на базе резервуарных установок с естественной регазификацией сжиженного углеводородного газа для предупреждения образования кристаллогидратов в регуляторах давления рекомендуется покрывать восходящий участок грунтового теплообменника и шкафной газорегуляторный пункт эффективной тепловой изоляцией с толщиной, определяемой по табл. 2, для обеспечения сохранения перегрева паровой фазы СУГ.

## ВЫВОДЫ

1. На основе анализа процессов теплообмена элементов системы газоснабжения с окружающей средой определены температурные режимы их эксплуатации, позволяющие установить максимально возможный перегрев паровой фазы, равный  $10,66^\circ\text{C}$ .

2. Приведены расчетные значения оптимальной толщины тепловой изоляции восходящего участка грунтового теплообменника и шкафного газорегуляторного пункта системы газоснабжения, обеспечивающие сохранение требуемого перегрева паровой фазы СУГ до регулятора давления для различных климатических зон эксплуатации резервуарной установки.

1. Максимов, С.А. Предупреждение гидратообразования в резервуарных установках с естественной регазификацией сжиженного газа / С.А. Максимов // Сб. тр. междунар. конф. «Научная дискуссия: инновации в современном мире». – М.: МГСУ, 2013. – С. 177–180.
2. Курицын, Б.Н. Исследование тепломассообмена в подземных резервуарах сжиженного газа / Б.Н. Курицын, С.С. Кузнецов // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. – Саратов: СГТУ им. Гагарина Ю.А., 2012. – №2. – С. 112–115.
3. Курицын, Б.Н. Математическое моделирование температурных режимов эксплуатации подземных резервуаров сжиженного газа с вертикальным размещением в грунте / Б.Н. Курицын, Н.Н. Осипова, С.А. Максимов // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения. – Саратов: СГТУ им. Гагарина Ю.А., 2010. – Т.1, №1(4) –С. 160–163.
4. Курицын, Б.Н. Исследование теплообмена при хранении и регазификации сжиженного углеводородного газа в подземных резервуарных установках / Б.Н. Курицын, Н.Н. Осипова, А.П. Усачев // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – №3(28). – С. 82–87.

## References

1. Maksimov, S.A. Prevention of hydrate formation in reservoir installations with natural regasification of liquefied gas / S.A. Maksimov // Sat. works of the Intern. conf. «Scientific discussion: innovation in the modern world». – M.: MGSU, 2013. – P. 177–180.
2. Kuritsyn, B.N. Study of heat and mass transfer in underground tanks of liquefied gas / B.N. Kuritsyn, S.S. Kuznetsov // Resource-efficient technologies in the building complex of the region. – Saratov: SSTU. Gagarin Yu.A., 2012. – №2. – P. 112–115.
3. Kuritsyn, B.N. Mathematical modeling of temperature conditions of operation of underground tanks of liquefied gas with vertical placement in the ground / B.N. Kuritsyn, N.N. Osipova, S.A. Maksimov // Scientific and technical problems of the improvement and development of gas energy systems. – Saratov: SSTU. Gagarin Yu.A., 2010. – Vol.1, №1 (4) – P. 160–63.
4. Kuritsyn, B.N. Study of heat transfer during storage and regasification of liquefied petroleum gas in underground tank installations / B.N. Kuritsyn, N.N. Osipova, A.P. Usachev // Bulletin of civil engineers. – 2011. – №3 (28). – P. 82–87.

УДК 54:628.31

*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

**Вилкова Наталья Георгиевна,**  
доктор химических наук, профессор  
кафедры «Физика и химия»  
E-mail: ngvilkova@mail.ru

*Пензенский государственный университет*

Россия, 440026, Пенза, ул. Красная, д.40,  
тел. (8412) 368209; факс (8412) 368400

**Мишина Светлана Ивановна,**  
кандидат химических наук, доцент  
кафедры «Химия и теория и методика  
обучения химии»  
E-mail: elancv@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

**Vilkova Natalya Georgievna,**  
Doctor of Chemical Sciences, Professor, of the  
department «Physics and Chemistry»  
E-mail: ngvilkova@mail.ru

*Penza State University*

Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.  
tel. (8412) 368209; fax (8412) 368400

**Mishina Svetlana Ivanovna,**  
Candidate of Chemical Sciences, Associate  
Professor of the department «Chemistry  
and Theory and Methodology Teaching  
Chemistry»  
E-mail: elancv@mail.ru

## ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ВЕЩЕСТВ РАЗЛИЧНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ МЕТОДОМ АДСОРБЦИОННОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ

Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина

Процессы с применением пен – флотация, пенная сепарация, концентрирование веществ – могут быть использованы при разработке комплексных технологий очистки промышленных сточных вод и для выделения чистых компонентов. Целью работы является изучение процесса адсорбционного выделения веществ различной химической природы (белков и солей высших жирных кислот) из промышленных сточных вод и разработка установки для повышения эффективности процесса.

Концентрирование веществ в пене проводят в периодическом режиме и при непрерывном ее получении и осушении с помощью фильтров (динамический режим). В первом случае пену получают в ячейках, дном которых являются пористые фильтры. После заполнения пеной пространство под фильтром присоединяют к сосуду с пониженным на величину  $\Delta P$  давлением. В динамическом режиме пену получают в термостабируемой ячейке при температуре 20-70°C пропуская сжатого воздуха через пористую перегородку в раствор пенообразователей. Для осушения движущейся пены используют патронные металлические или керамические фильтры различной пористости.

Для оценки степени извлечения вещества из исходного раствора пеной использовали коэффициент концентрирования  $R_F = \frac{C_F}{C}$ , который определяется суммарной концентрацией ПАВ в пене ( $C_F$ ) и исходной концентрацией вещества ( $C$ ) в растворе. Для пен высокой кратности (когда выполняется условие  $0,16 \cdot r^2 \cdot a_1 > 1,725 \cdot a_1^2 \cdot h$ , где  $r$  – радиус канала Плато – Гиббса;  $a_1$  – длина ребра пенной ячейки;  $h$  – толщина пленки) учитывали взаимосвязь коэффициента концентрирования  $R_F$  с основными параметрами пены (кратностью и дисперсностью). При концентрировании белка (периодический режим) степень концентрирования составляла 150. Степень концентрирования олеата натрия (динамический режим) была равна 114. Постепенное увеличение кратности с помощью нескольких фильтрующих элементов позволит повысить эффективность процесса.

*Ключевые слова:* пена, кратность, капиллярное давление, адсорбционное концентрирование

## CLEANING OF WASTE WATER FROM SUBSTANCES OF VARIOUS CHEMICAL NATURE BY ADSORPTION CONCENTRATION

N.G. Vilkoва, S.I. Mishina

Processes with the use of foams: flotation, foam separation, concentration of substances can be used in the development of complex technologies for the treatment of industrial wastewater and for the separation of pure components. The aim of the work is to study the process of adsorption separation of substances of different chemical nature from industrial wastewater and the development of installation to increase the efficiency of the process. Concentration of substances in the foam is carried out in a periodic mode and with its continuous production and drainage using filters (dynamic mode).

In the first case the foam is obtained in cells the bottom of which are porous filters. After filling with foam, the space under the filter is attached to a vessel with a pressure reduced by  $\Delta P$ . In the dynamic mode, the foam is obtained in a thermostatically controlled cell at a temperature of 20-70 ° C by passing compressed air through a porous plates into a solution of foaming agents. To drain moving foam, metal cartridge or ceramic filters with an average pore size of 60  $\mu\text{m}$  or 40  $\mu\text{m}$  are used. Concentration of substances in the foam is carried out in a batch mode and with its continuous preparation and drying with the help. To assess the degree of extraction of the substance from the initial solution, the foam used the concentration coefficient, which is determined by the total surfactant concentration in foam (CF) and initial concentration of the substance (C) in the solution. For high multiplicity foams (when the condition is satisfied, where  $r$  is the Plateau-Gibbs channel radius,  $a_l$  is the foam cell edge length,  $h$  is the film thickness), the relationship between the  $R_F$  concentration factor and the main foam parameters (expansion ratio and dispersion) was taken into account. At protein concentration (batch mode), the degree of concentration was 150. The degree of concentration of sodium oleate (dynamic mode) was equal to 114. A gradual increase in the multiplicity using several filter elements will increase the efficiency of the process.

*Keywords: foam, expansion ratio, capillary pressure, adsorption concentration.*

Процессы с применением пен – флотация, пенная сепарация, концентрирование веществ – могут быть использованы при разработке комплексных технологий очистки промышленных сточных вод и для выделения чистых компонентов.

Известно, что флотационное выделение минеральных частиц получило интенсивное развитие при детальном изучении стадий прилипания и закрепления частиц на газовом пузырьке с учетом сил взаимодействия в пленках на твердых подложках [1, 14]. Отметим, что в пенной флотации макроскопических частиц процесс обусловлен стадией трехфазного контакта вода – частица – газ. Поскольку нефтепродукты являются одними из наиболее распространенных антропогенных загрязнителей водоемов, то для очистки вод от таких загрязнений также широко применяются флотационные методы [2–6]. Проводилось изучение свойств пен, стабилизированных неионогенным (ТритонХ-100) и ионогенным ПАВ (додецилбензолсульфонатом натрия), в присутствии дизельного топлива и устойчивости пен при их контакте с органическим веществом [7–11]. Как было установлено, эффективность процесса определяется содержанием нефтепродукта в воде, устойчивостью образующихся дисперсных систем и свойствами химических веществ (ПАВ, коагулянтов), которые повышают качество очистки воды. Возможность флотационного разделения фаз эмульсий рассмотрена в [12]. Было установлено, что флотационная активность дисперсной фазы разбавленных прямых эмульсий возрастает при добавлении к ним небольших количеств четвертичных солей пиридина и хинолина, причем подобное действие оказывают некоторые высокомолекулярные ПАВ, содержащие аммонийные группы.

В производстве широкое применение находит также метод поверхностного концентрирования и разделения ПАВ в пене как молекулярно растворенных, так и частиц коллоидной степени дисперсности. Особенно большое значение имеет этот процесс для микробиологической и фармацевтической промышленности, для очистки воды от ПАВ и извлечения из нее необходимых компонентов. В частности, проблема очистки сточных вод молочных комбинатов указанным методом рассмотрена в [13]. Разработ-

ка оптимального режима выделения белка из сточной воды молочного комбината позволила увеличить концентрацию данного вещества в пенном продукте и повысить эффективность удаления азотсодержащих соединений из сточной воды. Известно, что концентрирование ПАВ в пене определяется диффузией и адсорбционной способностью вещества. На степень концентрирования вещества в пене также оказывают влияние устойчивость образуемой пены, химическая природа пенообразователей, температура процесса. Теории адсорбционного концентрирования веществ посвящен ряд обзоров и монографий [14–16]. Однако практическое извлечение белков из сточных вод указанным методом имеет определенные сложности. Установлено, например, что пена из растворов желатины (рН=6,8-7,0) без добавок поверхностно-активных веществ очень неустойчива по отношению к приложенному перепаду давления и интенсивно разрушается вблизи пористой перегородки, что приводит к мгновенному отделению («отслаиванию») пены от фильтра (без разрушения столба) даже при небольших перепадах давления, приложенных к жидкой фазе ( $\Delta P = 1-2$  кПа) [14]. Подобное явление ускоренного разрушения пен под действием приложенных к жидкой фазе давлений рассмотрено в [17–19]. Извлечение из растворов таких веществ возможно только с использованием добавок хороших пенообразователей (ионогенных и неионогенных ПАВ). В этом случае устойчивость пены, ее кратность и коэффициент концентрирования могут зависеть от соотношения концентраций белка и ПАВ в исходном растворе. Необходимо отметить также, что достижение максимальных значений коэффициента концентрирования вещества из индивидуального раствора и его смеси с другим ПАВ обусловлено различными причинами. В первом случае максимальное значение коэффициента концентрирования достигается при насыщении адсорбционного слоя. Во втором случае (при пенном извлечении из смеси с поверхностно-активным веществом) оптимальное соотношение компонентов, при котором достигается наибольший коэффициент концентрирования одного из них, определяется селективностью адсорбции и влиянием каждого из компонентов на устойчивость пены [14].

Были изучены закономерности адсорбционного концентрирования в пенах с высоким капиллярным давлением [20–26]. Известно, что для оценки степени извлечения вещества из исходного раствора пеной используют коэффициент концентрирования  $R_F = \frac{C_F}{C}$ , который определяется суммарной концентрацией ПАВ в пене ( $C_F$ ) и исходной концентрацией вещества ( $C$ ) в растворе. В пенах высокой кратности, когда объем жидкости в каналах значительно превышает объем жидкости в пенных пленках (или выполняется условие  $0,16 \cdot r^2 \cdot a_1 > 1,725 \cdot a_1^2 \cdot h$ , где  $r$  – радиус канала Плато – Гиббса;  $a_1$  – длина ребра пенной ячейки;  $h$  – толщина пленки), взаимосвязь коэффициента концентрирования  $R_F$  с основными параметрами пены определяется уравнением [14]:

$$R_F = \frac{C_F}{C} + \frac{\Gamma \cdot a^2}{0,077C \cdot r^2 \cdot a_1}, \quad (1)$$

где  $C_F$  – концентрация вещества в каналах и пленках (без учета адсорбционных слоев);  $\Gamma$  – адсорбция поверхностно-активного вещества (для солей высших жирных кислот  $\Gamma_{\max} = 3 \cdot 10^{-10}$  моль/см<sup>2</sup>).

Отметим, что значение  $\frac{C_F}{C}$  в устойчивой по отношению к внутреннему разрушению пене не превышает нескольких единиц.

Так как зависимость кратности от дисперсности пены (в предположении ее монодисперсной структуры) определяется уравнением  $n = \frac{4,8a^2}{r^2}$ , то можно получить

связь коэффициента концентрирования с такими технологическими параметрами пены, как кратность ( $n$ ) и дисперсность ( $a$ ):

$$R_F = \frac{C_F}{C} + \frac{\Gamma \cdot n}{0,37aC}. \quad (2)$$

При уменьшении объемной доли жидкости в пене в процессе ее осушения  $\frac{\Gamma \cdot n}{0,37 \cdot a \cdot C}$  значительно превышает  $\frac{C_F}{C}$ , и для оценки степени концентрирования можно использовать зависимость

$$R_F = \frac{\Gamma \cdot n}{0,37a \cdot C}. \quad (3)$$

В соответствии с приведенной зависимостью повышение кратности пены в процессе ее осушения с помощью специальных фильтров и уменьшение исходной степени дисперсности позволяют увеличить степень концентрирования вещества. Однако в работе [22] показано, что коэффициент концентрирования возрастает с уменьшением исходной дисперсности только при неизменной объемной доле жидкости в пене. Если с изменением дисперсности одновременно изменяется и объемная доля жидкости в пене, то с уменьшением дисперсности пены степень концентрирования может снижаться (в случае гравитационного синерезиса). В работах [25, 26] экспериментально установлено также, что объемная доля жидкости в генерируемой пене определяется как скоростью вовлечения жидкости в пену, так и скоростью синерезиса. Унос жидкой фазы с пеной будет уменьшаться при увеличении скорости синерезиса, которая зависит от объемной и поверхностной вязкости раствора пенообразователя, поверхностного натяжения раствора ПАВ, высоты столба пены, исходного размера диспергируемых пузырьков.

Анализ приведенных данных позволяет заключить, что применение указанного метода и повышение его эффективности для очистки сточных вод в различных технологических процессах представляют собой актуальную задачу.

В связи с этим целью работы являлось изучение процесса адсорбционного выделения веществ различной химической природы (белков и солей высших жирных кислот) из промышленных сточных вод.

### Методы исследования

Концентрирование веществ в пене можно проводить в периодическом режиме и при непрерывном получении пены и ее осушении с помощью фильтров.

В первом случае (периодический режим) пену получают в ячейках, дном которых являются стеклянные, керамические или металлические фильтры (пористый металл или сетка). После заполнения пеной пространство под фильтром присоединяют к сосуду с пониженным на величину  $\Delta P$  давлением, причем величина создаваемого в пене перепада давления не превышает максимального капиллярного давления пористого материала. Различные варианты таких ячеек приведены и описаны в [14, 27, 28].

Устройства для изучения процесса пенного концентрирования в движущейся пене (динамический режим) приведены в работах [13, 14, 17, 22]. Пену получают в термостатируемой ячейке при температуре 20-70°C пропусканием сжатого воздуха через пористую перегородку в раствор пенообразователей (белки, соли высших жирных кислот и др.). Для осушения пены используют патронные металлические или керамические фильтры со средним размером пор  $60 \cdot 10^{-4}$  см или  $40 \cdot 10^{-4}$  см. Процесс проводят при приложенном перепаде давления  $\Delta P = 1 - 5$  кПа. Одновременно контролируют капиллярное давление ( $P_\sigma$ ) в пене с помощью капиллярного микроманометра [14, 27] и оценивают кратность ( $n$ ) ( $n=1/\varphi$ , где  $\varphi$  – объемная доля жидкости в пене) в момент выхода пены из пеногенератора.

Дисперсность пены (а) определяют по величине экспериментально полученных значений кратности и максимального равновесного капиллярного давления  $P_{\sigma}$ .

*Концентрирование белков в пене. Периодический режим исследования*

Концентрирование белков в пене имеет определенные сложности. Как отмечалось ранее, пены из белка быстро разрушаются под действием приложенных перепадов давления. Установлено [17], что пена из 0,01; 0,02; 0,05 и 0,1 % растворов желатины (рН=6,8-7,0) очень неустойчива по отношению к приложенному перепаду давления и разрушается вблизи пористой перегородки, что приводит к мгновенному отделению («отслаиванию») пены от фильтра (без разрушения столба) даже при малых перепадах давления ( $\Delta P=1-2$  кПа). При этом добавление хлорида натрия к указанным растворам желатины не влияло на устойчивость пены. В области образования комплексов белок – ПАВ устойчивость пены повышалась как в нейтральной среде, так и в изоэлектрической точке. Взаимодействия в системе желатина – ПАВ подробно были рассмотрены в [29, 30].

Изучалось концентрирование желатины из ее водных растворов с ионогенным ПАВ и добавками хлорида натрия [17]. Низкие степени концентрирования ( $R_F$  не более 5) наблюдали в пенах из растворов как чистой желатины, так и с добавкой додецилсульфата натрия. В частности, в пене из 0,02 %-го раствора желатины при рН=7 и периодическом режиме исследования концентрация желатины превышала исходную приблизительно в 1,6 раза. Причиной является интенсивное разрушение пены в области пониженного давления. Хотя избыточное (по сравнению с концентрацией, соответствующей образованию комплексов) количество додецилсульфата натрия и повышало устойчивость пены, концентрация желатины в пене из 0,01 %-го раствора желатины +  $5 \cdot 10^{-4}$  моль/дм<sup>3</sup> DDSNa + 0,1 моль/дм<sup>3</sup> NaCl возрастала всего в 5 раз по сравнению с исходной. Вероятно, адсорбционные слои в этом случае состоят в основном из ионогенного ПАВ – лаурилсульфата натрия, а желатина находится в жидкой фазе пены (в каналах Плато – Гиббса), так что концентрирование белка в пене невелико.

Высокие кратность  $n=900$  и равновесное капиллярное давление  $P_{\sigma}=5$  кПа были установлены в пене из 0,02 %-го раствора желатины +  $4 \cdot 10^{-4}$  моль/дм<sup>3</sup> DDSNa + 0,4 моль/дм<sup>3</sup> NaCl при приложенном к пене перепаде давления, равном  $\Delta P=5$  кПа. Концентрация желатины в пене превышала исходную в 100 раз. При рН=4,9, соответствующем изоэлектрическому состоянию желатины, кратность пены достигала 2000, капиллярное давление в пене соответствовало приложенному ( $P_{\sigma}=5$  кПа), а концентрация желатины в пене повышалась и превышала исходную в 150 раз.

*Концентрирование белков в пене. Динамический режим исследования*

Процесс концентрирования белков из индивидуальных растворов и растворов, содержащих ПАВ, в движущейся пене при одновременном осушении под действием перепада давлений рассматривается в [13, 14, 17].

В опытах (табл. 1), где концентрирование проводили с осушением пены с помощью металлического патронного фильтра, приложенный к пене перепад давления составлял 1-2 кПа. При избытке желатины в исходном растворе (растворы 3-5, табл. 1 [17]) или избытке ПАВ концентрация белка в пене была невелика и превышала исходную только в 2-3 раза по причине разрушения пены уже во время ее образования в генераторе.

Осушение пены из 0,01 %-го раствора желатины с добавкой  $2 \cdot 10^{-3}$  моль/дм<sup>3</sup> DDSNa (при соотношении концентраций, соответствующем образованию комплексов (раствор 2, табл. 1 [17]) приводило к значительному увеличению концентрации желатины в пене.

Увеличение степени концентрирования желатины в отсутствие добавок ПАВ путем осушения пены под действием перепада давления в ее жидкой фазе оказалось невозможным вследствие интенсивного разрушения пены даже при больших концентрациях желатины и самых малых перепадах давления.

Степень концентрирования белка в пене.

№ п/п	Исходный раствор желатины (масс. %)	Концентрация DDSNa (моль/л)	Степень концентрирования, $R_F$
1	0,01	$2 \cdot 10^{-3}$	1,5
2	0,1	$2 \cdot 10^{-3}$	50
3	0,02	$4 \cdot 10^{-4}$	2
4	0,1	$10^{-3}$	2,5
5	0,02	$10^{-4}$	3

Подобные сложности возникали при исследовании концентрирования белка из молочной сыворотки в движущейся пене при ее осушении под действием перепада давления [13]. Степень концентрирования вещества из исходного раствора молочной сыворотки была низкой ( $R_F=3$ ). Добавление гидроксида кальция хотя и повышало устойчивость динамической пены, однако не приводило к увеличению степени концентрирования вещества в пенном продукте.

*Концентрирование солей высших жирных кислот в пене.*

*Динамический режим исследования*

Характеристики пенного концентрирования из модельного раствора 0,1 %  $C_{17}H_{33}COONa + 0,2$  моль/л  $Na_2CO_3$  при осушении фильтрующих элементов различной пористости представлены в табл. 2. В этом случае процесс концентрирования вещества происходит в движущейся пене (динамический режим). В процессе пенообразования концентрация ПАВ в исходном растворе изменялась от 0,1 % олеата натрия в начальный момент времени до 0,005-0,006 % на 30-й минуте. В момент времени  $\tau = 30$  мин кратность на выходе пены из генератора достигала максимального значения, равного 180, при этом в пене устанавливалось максимальное равновесное капиллярное давление  $P_{\sigma}$ , равное приложенному перепаду  $\Delta P = 1$  кПа. На рис. 1 представлено изменение степени концентрирования олеата натрия в пене на выходе ее из пеногенератора.

Т а б л и ц а 2

Характеристики процесса концентрирования вещества в пене из раствора 0,1 %  $C_{17}H_{33}COONa + 0,2$  моль/л  $Na_2CO_3$  в зависимости от пористости патронного фильтра

Исследуемый параметр	Пористость патронного фильтра, мкм	
	60	40
$\Delta P$ , кПа	1	2
Время жизни пены, мин	30	20
Остаточная концентрация олеата натрия, %	0,005	0,006
Кратность пены	180	350
Степень концентрирования	62,4	114,0

Расчет произведен по формуле (2) с учетом изменения кратности и дисперсности пены во времени. В этом случае максимальное значение коэффициента концентрирования составило 62,4.

Необходимо отметить, что степень концентрирования заметно возрастает при уменьшении размера ячеек патронного фильтра до  $40 \cdot 10^{-4}$  см. Осушение пены в этом случае приводит к установлению более высоких значений капиллярного давления и кратности ( $P_{\sigma}=2$  кПа,  $n=350$ ). Время жизни пены составляло 20 минут. Концентрация олеата натрия в исходном растворе  $C_0$  (к двадцатой минуте) понижалась до 0,006 %, а дисперсность была равна 0,0125 см. С учетом всех приведенных значений степень концентрирования, рассчитанная по формуле (2), возрастала и была равна 114. Отметим, что в отличие от концентрирования белков динамическим методом эффектив-

ность извлечения солей высших жирных кислот указанным способом обусловлена устойчивостью образующейся пены и возможностью достижения равновесных капиллярных давлений без интенсивного разрушения пенного столба в целом.

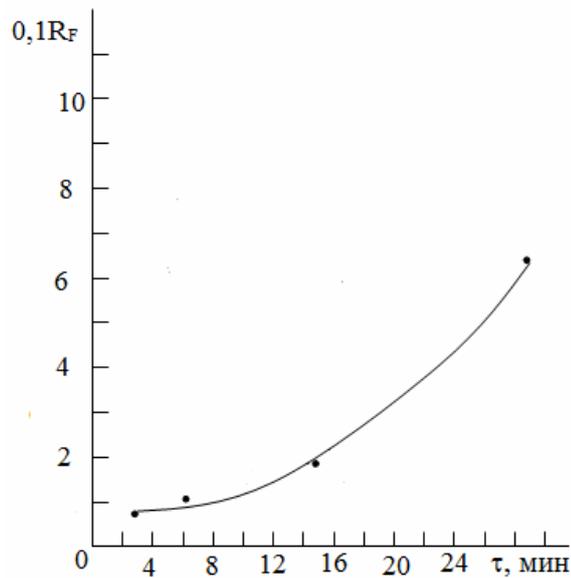


Рис. 1. Изменение степени концентрирования, рассчитанной по формуле (3), для пены из раствора 0,1 %  $C_{17}H_{33}COONa$  + 0,2 моль/л  $Na_2CO_3$  (pH=12)

Проведенные исследования позволяют представить вариант установки для эффективного выделения ценных компонентов из сточных вод (рис. 2), в которой пена осушается с помощью нескольких фильтров (возможно, различной пористости) и собирается в отдельный приемник, где разрушается механическим путем.

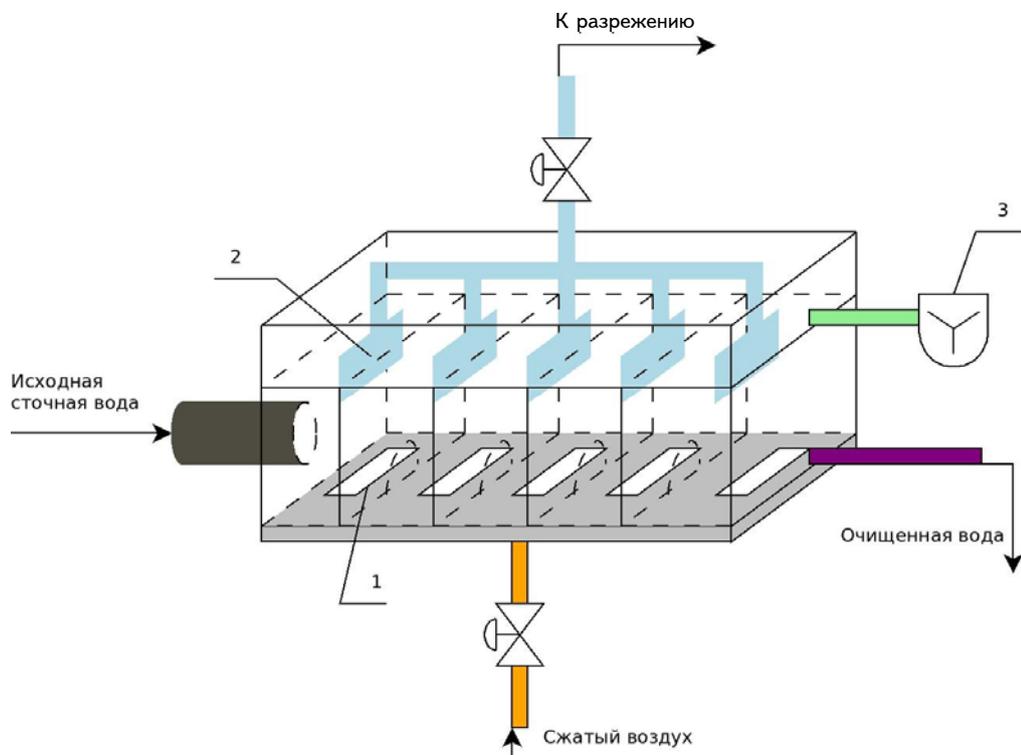


Рис. 2. Схема установки пенного концентрирования солей высших жирных кислот:  
1 – пористая перегородка; 2 – фильтры; 3 – пеносборник с мешалками

Таким образом, показана возможность выделения веществ различной химической природы методом пенного концентрирования. Выделение компонентов можно проводить как в периодическом режиме путем осушения под действием приложенных перепадов давления, так и в динамическом режиме. При этом эффективность процесса определяется устойчивостью образующейся пены и конструктивными особенностями технологического процесса (пористость фильтрующих элементов, скорость подачи газа и др.). Устойчивость пен из белка, как отмечалось, заметно повышается при добавлении ионогенных ПАВ, что создает возможность его концентрирования в пене. При этом большая степень извлечения  $R_F = 150$  может быть достигнута в периодическом режиме при создании высоких кратностей и капиллярного давления ( $n=2000$ ,  $P_\sigma=5$  кПа).

В динамическом режиме достигнута степень концентрирования олеата натрия из его модельного раствора  $R_F = 114$  при достижении кратности  $n = 350$  и равновесного капиллярного давления  $\Delta P = 2$  кПа. Очевидно, возможность получения большей степени концентрирования вещества в пене динамическим методом определяется прежде всего устойчивостью дисперсной системы к действию приложенных перепадов давления. Постепенное повышение кратности и капиллярного давления в пене с помощью нескольких фильтрующих элементов позволит значительно повысить эффективность процесса.

#### Список литературы

1. Щукин, Е.Д. Коллоидная химия / Е.Д. Щукин, А.В. Перцов, Е.А. Амелина. – М: Высшая школа, 2008. – 445 с.
2. Zhao, G. Stability mechanism of a novel three-Phase foam by adding dispersed particle gel / G. Zhao, C. Dai, D. Wen // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2016. – V. 497. – P. 214–224.
3. Lili, G. Separation of dispersed carbon nanotubes from water: effect of pH and surfactants on the aggregation at oil/ water interface / G. Lili, Y. Huayi, Z. Hua // *Separation and Purification Technology*. – 2014. – V. 129, N 29. – P. 113–120.
4. Karhu, M. Enhanced DAF in breaking up oil-in-water emulsions / M. Karhu, T. Leiviskä, J. Tanskanen // *Separation and Purification Technology*. – 2014. – V. 122. – P. 231–241.
5. Apichay, B. Cutting oil removal by continuous froth flotation with packing media under low interfacial tension conditions / B. Apichay, P. Orathai, N. Suchaya // *Separation and Purification Technology*. – 2013. – V. 107, N 2. – P. 118–128.
6. Suzuki, Y. Removal of Emulsified Oil from Water by Coagulation and Foam Separation / Y. Suzuki, T. Maruyama // *Separation Science and Technology*. – 2005. – V. 40, N 16. – P. 3407–3418.
7. Вилкова, Н.Г. Влияние свойств пен и пенных пленок на флотационное выделение органической жидкости / Н.Г. Вилкова // *Известия вузов. Поволжский регион. Естественные науки*. – 2016. – № 2. – С. 30–38.
8. Кругляков, П.М. Механизмы пеногасящего действия / П.М. Кругляков // *Успехи химии*. – 1994. – Т. 63, № 6. – С. 493–505.
9. Vilkova, N.G. Properties and stability of foams containing diesel fuel / N.G. Vilkova, Y.A. Gritzova // *Slovak international scientific journal*. – 2017. – N 6 (1). – P. 16–20.
10. Вилкова, Н.Г. Влияние дизельного топлива на устойчивость пен, формирующихся в сточных водах / Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина, Е.А. Шатина // *Региональная архитектура и строительство*. – 2018. – №3(36). – С. 172–178.
11. Вилкова, Н.Г. Устойчивость пен, содержащих дизельное топливо / Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина // *Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология»*. – 2018. – Т. 61 (6). – С. 49–52.
12. Скрылев, Л.Д. Интенсификация процесса флотационного разделения фаз разбавленных эмульсий с помощью поверхностно-активных веществ / Л.Д. Скрылев,

Р.Е. Савина, В.В. Свиридов // Журнал прикладной химии. – 1975. – № 6. – С. 1277–1289.

13. Вилкова, Н.Г. Очистка сточных вод молочных комбинатов методом адсорбционного концентрирования азотсодержащих веществ / Н.Г. Вилкова, О.В. Дорчина // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №2. – С. 128–132.

14. Кругляков, П.М. Пена и пенные пленки / П.М. Кругляков, Д.Р. Ексерова – М: Химия, 1990. – 426 с.

15. Тихомиров, В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения / В.К. Тихомиров. – М.: Химия, 1983. – 264 с.

16. Bikerman, J.J. Foams: theory and industrial applications / J.J. Bikerman. – New York: Heidelberg, Berlin: Springer – Verlag, 1973 – 338 p.

17. Vilkova, N.G. Foaming concentration of gelatine from it's solution containing sodium dodecyl sulfate / N.G. Vilkova, T.N. Khaskova, P.M. Kruglyakov // Colloid Journal. – 1995. – V. 57, N 6. – P. 741–744.

18. Фокина, Н.Г. Исследование разрушения столба пены при больших перепадах давления в ее жидкой фазе / Н.Г. Фокина, П.М. Кругляков // Труды Всесоюзного семинара по коллоидной химии и физико-химической механике пищевых и биоактивных дисперсных систем (1989-1990 гг.). – М.: Наука, 1991. – С. 71–82.

19. Кругляков, П.М. Влияние температуры на время жизни пены / П. М. Кругляков, Н.Г. Фокина, С.Н. Аленкина // Коллоидный журнал. – 1990. – Т.52. – С. 365–367.

20. Кругляков, П.М. Исследование адсорбционного концентрирования из раствора смеси ПАВ в пене с высоким капиллярным давлением / П.М. Кругляков, Н.В. Кочубей // Коллоидный журнал. – 1981. – Т. 43, № 4. – С. 766–769.

21. Кругляков, П.М. О верхней концентрационной границе выделения сульфатного мыла из черного щелока/ П.М. Кругляков, Н.Г. Вилкова, Т. Н. Хаскова // Гидролизная и лесохимическая промышленность. – 1989. – № 3. – С. 16.

22. Хаскова, Т. Н. Влияние разрушения пены на характеристики пенного концентрирования и очистки растворов от ПАВ / Т. Н. Хаскова, П. М. Кругляков // Коллоидный журнал. – 1992. – Т. 5, № 152. – С. 152-160.

23. Хаскова, Т.Н. Закономерности концентрирования и разделения поверхностно-активных веществ в пене / Т.Н. Хаскова, П.М. Кругляков // Успехи химии. – 1995. – Т. 64, № 3. – С. 251–264.

24. Kruglyakov, P.M. Adsorption accumulation and separation of dissolved substanses in dry foams / P.M. Kruglyakov// Current opinion in Colloid and Interface Science. – 2009. – V. 15, N 6. – P. 382–391.

25. Хаскова, Т.Н. Закономерности адсорбционного концентрирования ПАВ и уноса жидкости с пеной / Т.Н. Хаскова, П.М. Кругляков // Коллоидно-физические аспекты промышленных сточных вод. – Уфа, 1988. – С. 39–41.

26. Хаскова, Т.Н. Изучение условий пенообразования, определяющих остаточную концентрацию при адсорбционном извлечении ПАВ / Т.Н. Хаскова, В.Д. Мальков // Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции «Получение и применение пен». – Шебекино, 1989.

27. Вилкова, Н.Г. Пены и методы их получения / Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина. – Пенза: ПГУАС, 2018. – 158 с.

28. Нуштаева, А.В. Стабилизация пен и эмульсий неастворимыми порошками / А.В. Нуштаева, Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 131 с.

29. Измайлова, В.Н. Влияние углеводородных и фторосодержащих ПАВ на свойства желатины в объеме водной фазы и на границе с воздухом. / В.Н. Измайлова, С.Р. Деркач, К.В. Зотова // Коллоидный журнал. – 1993. – Т. 55, № 3. – С. 54–89.

30. Вюстнек, Р. Исследование поверхностных свойств адсорбционных слоев желатины с добавками ПАВ на границе раздела фаз воздух-раствор / Р. Вюстнек, Л. Цастров, Г. Кречмар // Коллоидный журнал. – 1985. – Т. 37, № 3. – С. 462–470.

1. Shukin, E.D. Colloid chemistry / E.D. Shukin, A.V. Percov, E. A. Amelina. – M: High school, 2008. – 445 p.
2. Zhao, G. Stability mechanism of a novel three-phase foam by adding dispersed particle gel / G. Zhao, C. Dai, D. Wen // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2016. – V. 497. – P. 214–224.
3. Lili, G. Separation of dispersed carbon nanotubes from water: effect of pH and surfactants on the aggregation at oil/ water interface / G. Lili, Y. Huayi, Z. Hua // *Separation and Purification Technology*. – 2014. – V. 129, N 29. – P. 113–120.
4. Karhu, M. Enhanced DAF in breaking up oil-in-water emulsions / M. Karhu, T. Leiviskä, J. Tanskanen // *Separation and Purification Technology*. – 2014. – V. 122. – P. 231–241.
5. Apichay, B. Cutting oil removal by continuous froth flotation with packing media under low interfacial tension conditions / B. Apichay, P. Orathai, N. Suchaya // *Separation and Purification Technology*. – 2013. – V. 107, N 2. – P. 118–128.
6. Suzuki, Y. Removal of Emulsified Oil from Water by Coagulation and Foam Separation / Y. Suzuki, T. Maruyama // *Separation Science and Technology*. – 2005. – V. 40, N 16. – P. 3407–3418.
7. Vilkova, N.G. The effect of the foams and foam films properties on flotation release of organic liquid / N.G. Vilkova // *News of Universities. Volga region. Natural Sciences*. – 2016. – N 2. – P. 30–38.
8. Kruglyakov, P.M. Mechanisms of the defoaming action / P.M. Kruglyakov // *Chemistry Advances*. – 1994. – V. 63, N 6. – P. 493–505.
9. Vilkova, N.G. Properties and stability of foams containing diesel fuel / N.G. Vilkova, Y.A. Gritzova // *Slovak international scientific journal*. – 2017. – N 6 (1). – P. 16–20.
10. Vilkova, N.G. The effect of the diesel fuel on the stability of the foam formed in wastewater / N.G. Vilkova, S.I. Mishina, E.A. Shatina // *Regional architecture and construction*. – 2018. – N3 (36). – P. 172–178.
11. Vilkova, N.G. The stability of the foam containing diesel fuel / N.G. Vilkova, S.I. Mishina // *News of universities. Series Chemistry and Chemical construction*. – 2018. – V. 61 (6). – P. 49–52.
12. Skryleev, L.D. Intensification of the process of flotation separation of the phases of diluted emulsions with surfactants / L.D. Skryleev, R.E. Savina, V. V. Sviridov // *Journal of applied chemistry*. – 1975. – N 6. – P. 1277–1289.
13. Vilkova, N.G. Wastewater treatment of dairy plants by the method of adsorption concentration of nitrogen-containing substances / N.G. Vilkova, O.V. Dorchina // *Regional architecture and construction*. – 2012. – N 2. – P. 128–132.
14. Kruglyakov, P.M. Foam and foam films / P.M. Kruglyakov, D.R. Exerova – M: Chemistry, 1990. – 426 p.
15. Tihomirov, V.K. Foams. Theory and practice of their formation and destruction / V.K. Tihomirov. – M.: Chemistry, 1983. – 264 p.
16. Bikerman, J.J. Foams: theory and industrial applications / J.J. Bikerman. – New York: Heidelberg, Berlin: Springer – Verlag, 1973 – 338 p.
17. Vilkova, N.G. Foaming concentration of gelatine from its solution containing sodium dodecyl sulfate / N.G. Vilkova, T.N. Khaskova, P. M. Kruglyakov // *Colloid Journal*. – 1995. – V. 57, N 6. – P. 741–744.
18. Fokina, N.G. Investigation of the foam column destruction at high pressure drop in its liquid phase / N.G. Fokina, P.M. Kruglyakov // *Proceeding of the All-Union workshop on colloid chemistry and physic-chemical mechanics of food and bioactive disperse systems (1989-1990)*. – M.: Science, 1991. – P. 71–82.
19. Kruglyakov, P.M. The influence of the temperature on the foam life time / P.M. Kruglyakov, N.G. Fokina, S.N. Alenkina // *Colloid journal*. – 1990. – V. 52. – P. 365–367.

20. Kruglyakov, P.M. The investigation of adsorption concentration from a solution of a mixture of surfactants in the foam with high capillary pressure / P.M. Kruglyakov, N.V. Kochubey // *Colloid journal*. – 1981. – V. 43, N 4. – P. 766–769.
21. Kruglyakov, P.M. About the higher limit of sulphate soap extraction from black leach / P.M. Kruglyakov, N.G. Vilkoval, T.N. Khaskoval // *Hydrolysis and wood chemical industry*. – 1989. – N 3. – P. 16.
22. Khaskoval, T.N. The effect of foam destruction on the characteristics of foam concentration and purification of solutions from surfactants / T.N. Khaskoval, P.M. Kruglyakov // *Colloid journal*. – 1992. – V. 5, N 152. – P. 152-160.
23. Khaskoval, T.N. Patterns of concentration and separation of surfactants in the foam / T.N. Khaskoval, P.M. Kruglyakov // *Successes of chemistry*. – 1995. – V. 64, N 3. – P. 251–264.
24. Kruglyakov, P.M. Adsorption accumulation and separation of dissolved substances in dry foams / P.M. Kruglyakov // *Current opinion in Colloid and Interface Science*. – 2009. – V. 15, N 6. – P. 382–391.
25. Khaskoval, T.N. Patterns of adsorption concentration of surfactants and liquid entrainment with foam / T.N. Khaskoval, P.M. Kruglyakov // *Colloid-physical aspects of industrial wastewater*. – Ufa, 1988. – P. 39–41.
26. Khaskoval, T.N. The study of the conditions of foaming, determining the residual concentration during adsorption extraction of surfactants / T.N. Khaskoval, V.D. Malkov // *Abstracts of reports of the IV All-union conference «Production and application of foams»*. – Shebekino, 1989.
27. Vilkoval, N.G. Foams and methods of their production / N.G. Vilkoval, S. I. Mishina. – Penza: PGUAS, 2018. – 158 p.
28. Nushtaeva, A.V. Stabilization of foam and emulsion with insoluble powders / A.V. Nushtaeva, N.G. Vilkoval, S.I. Mishina. – Penza: PGUAS, 2011. – 131 p.
29. Izmailova, V.N. The influence of hydrocarbon and fluorine-containing surfactants on the properties of gelatin in the volume of the aqueous phase and the boundary with air / V.N. Izmailova, S.R. Derkach, K.V. Zotova // *Colloid journal*. – 1993. – V. 55, N 3. – P. 54–89.
30. Vustnek, R. Investigation of the surface properties of the adsorption layers of gelatin with surfactant additives at the air-solution interface / R. Vustnek, L. Castrov, G. Krechmar // *Colloid journal*. – 1985. – V. 37, N 3. – P. 462–470.

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

**Князев Александр Анатольевич**,  
старший преподаватель кафедры  
«Инженерная экология»

*Пензенский государственный  
технологический университет*

Россия, 440039, г. Пенза,  
проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а / 11,  
тел. (8412) 49-54-41; факс (8412) 49-60-86

**Яхкин Михаил Ильич**,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник отдела  
научных исследований  
E-mail: yah@sura.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Andreev Sergey Yuryevich**,  
Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Water supply, sewerage  
and hydraulic engineering»  
E-mail:andreev3007@rambler.ru

**Knyazev Alexander Anatolyevich**,  
Senior Lecturer of the department of  
«Engineering Ecology»  
*Penza State Technological University*

Russia, 440039, Penza,  
1A / 11 Baidukova / Gagarin St.,  
tel. (8412) 49-54-41; fax (8412) 49-60-86

**Yakhkind Michael Il'ich**,  
Candidate of Sciences, Senior Researcher of  
Scientific Research department  
E-mail: yah@sura.ru

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

С.Ю. Андреев, М.И. Яхкин, А.А. Князев

Приведены результаты исследований изменения гидродинамических характеристик напорных осесимметричных трубопроводов, работающих в режиме гидравлически гладких труб, в переходной зоне и в области вполне шероховатых русел. Выполнен сравнительный анализ методик расчета распределения величин осредненных местных скоростей турбулентного потока жидкости в поперечном сечении трубопровода. Получена математическая зависимость, позволяющая определить величину осредненной местной скорости турбулентного потока жидкости в поперечном сечении напорного трубопровода, работающего в режиме гидравлически гладких труб, в переходной зоне и в области вполне шероховатых русел. Полученная математическая зависимость может быть использована при проектировании напорных сетей водопровода и канализаций.

*Ключевые слова: турбулентный поток; пограничный слой; ядро потока; местная скорость; касательное напряжение; относительная шероховатость*

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE METHODS FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE TURBULENT FLOW IN THE PRESSURE PIPE

S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, A.A. Knyazev

The results of theoretical studies of changes in the hydrodynamic characteristics of pressure axisymmetric pipelines operating in the mode of hydraulically smooth pipes in the transition zone and in the area of quite rough channels are presented. The comparative analysis of calculation methods of the distribution of the averaged local velocities of turbulent fluid flow in the cross section of the pipeline is performed. The mathematical dependence is obtained allowing to determine the averaged local velocity of turbulent fluid flow in the cross section of the pressure pipeline operating in the

mode of hydraulically smooth pipes, in the transition zone and in the area of quite rough channels. The resulting mathematical dependence can be used in the design of pressure networks of water supply and sewerage.

*Keywords: turbulent flow; boundary layer; core flow; local speed; shear stress; relative roughness*

Одной из основных задач, решаемых при гидравлическом расчете осесимметричных напорных трубопроводов (трубопроводов круглого сечения), используемых для перекачивания водопроводных и сточных вод на большие расстояния, является определение потерь давления на трение по длине потока.

Учитывая, что потери давления на трение в значительной степени определяются характером профиля осредненных местных скоростей  $\bar{u}_r$  в поперечном сечении потока, для определения потерь давления необходимо установить закономерности изменения этого профиля.

Начало фундаментальным теоретическим исследованиям закономерностей распределения местных скоростей в турбулентных потоках было положено Л. Прандтлем, который на основании представлений Т. Кармана, базирующихся на критериях гидравлического подобия, разработал полуэмпирическую теорию турбулентности.

Прандтль Л. использовал следующее уравнение для расчета касательного напряжения силы вязкого трения на расстоянии  $y$  от стенки трубы, предложенное ранее Ж. Буссинеском [1]:

$$\tau_y = \tau_B + \tau_T = \mu \frac{d\bar{u}}{dy} + A \frac{d\bar{u}}{dy} = (\mu + A) \frac{d\bar{u}}{dy} \text{ (Н/м}^2\text{)}, \quad (1)$$

где  $\tau_B$  – касательное напряжение, обусловленное действием сил вязкого трения;  $\tau_T$  – касательное напряжение, обусловленное турбулентным перемешиванием;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости жидкости (Па·с);  $A$  – динамический коэффициент турбулентной вязкости (Па·с);  $G_y = \frac{du}{dy}$  – градиент местной скорости (с<sup>-1</sup>).

При этом коэффициент  $A$  подобен  $\mu$ , но зависит в основном от интенсивности перемешивания, а не от свойств жидкости.

Прандтль разделил турбулентный поток жидкости на две области: ламинарный пограничный слой – область, где течение формируется под действием сил вязкого трения, и остальную часть (ядро потока) – область, где определяющее значение имеют турбулентные пульсации местных скоростей потока [1], что позволило ему сделать следующие допущения.

Первое допущение – в ядре потока динамический коэффициент вязкости  $\mu = 0$ , и силами вязкого трения можно пренебречь.

В этом случае формула (1) примет вид

$$\tau_y = A \frac{d\bar{u}}{dy} \text{ (Н/м}^2\text{)}. \quad (2)$$

Прандтль связывает величину турбулентной вязкости  $A$  с градиентом усредненной местной скорости  $\frac{d\bar{u}}{dy}$  с помощью введенного им понятия – длины пути перемешивания  $l$  (м).

$$A = \rho l^2 \frac{d\bar{u}}{dy} \text{ (Па·с)}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости (кг/м<sup>3</sup>).

Второе допущение – длина пути перемешивания  $l$  связана с расстоянием от стенки трубы  $y$  зависимостью

$$l = \chi \cdot y \text{ (м)}, \quad (4)$$

где  $\chi$  – универсальная постоянная (первая константа турбулентности).

При подстановке формул (3) и (4) в формулу (2) было получено

$$\tau_y = \rho \chi^2 y^2 \left( \frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2 \text{ (Н/м}^2\text{)}. \quad (5)$$

Третье допущение – что касательное напряжение во всем потоке имеет постоянное значение, т.е. касательное напряжение на расстоянии  $y$  от стенки трубы  $\tau_y$  равно касательному напряжению на стенке трубы  $\tau_*$ :

$$\tau_y = \tau_* = \nu_*^2 \rho \text{ (Н/м}^2\text{)}. \quad (6)$$

Из формул (5) и (6) получается дифференциальное уравнение распределения местных усредненных скоростей

$$\frac{d\bar{u}}{dy} = \frac{\nu_*}{\chi y}. \quad (7)$$

Интегрирование уравнения (7) позволяет получить зависимость

$$\bar{u}_y = \frac{\nu_*}{\chi} \ln y + C, \quad (8)$$

где  $C$  – константа интегрирования.

Из формулы (3) с учетом формул (4) и (7) можно записать

$$A = \rho \chi^2 y^2 \frac{d\bar{u}}{dy} = \rho \chi^2 y^2 \frac{\nu_*}{\chi y} = \rho \nu_* \chi y. \quad (9)$$

Учитывая результаты экспериментов, проведенных И. Никурадзе на трубах с искусственной равномерно-зернистой шероховатостью, Прандтль на основе формулы (8) получил следующие зависимости [1]:

для гидравлически гладких труб

$$\frac{\bar{u}_y}{\nu_*} = 5,75 \lg \frac{y \nu_*}{\nu} + 5,5; \quad (10)$$

для вполне шероховатых труб, работающих в области квадратичного закона сопротивления шероховатых русел (области автомодельности режима движения жидкости)

$$\frac{\bar{u}_y}{\nu_*} = 5,75 \lg \frac{y}{\Delta} + 8,48, \quad (11)$$

где  $\Delta$  – шероховатость поверхности русла потока (средняя высота выступов шероховатости) (м).

Прандтлем была предложена зависимость для определения коэффициента гидравлического трения при движении жидкости во вполне шероховатых трубах [1]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = C_1 \lg \frac{d}{\Delta} + C_2, \quad (12)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – коэффициенты, величина которых была установлена путем математической обработки опытных данных, полученных Никурадзе ( $C_1 = 2$ ,  $C_2 = 1,14$ ).

Из (12) с учетом значений  $C_1$  и  $C_2$  можно записать

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{d}{\Delta} + 1,14 = 2 \lg \frac{d}{\Delta} + 2 \lg 3,7 = 2 \lg 3,7 \frac{d}{\Delta}, \quad (13)$$

откуда была получена формула Прандтля – Никурадзе, позволяющая определять величины коэффициента гидравлического трения для вполне шероховатых труб:

$$\lambda_{KB} = \frac{0,25}{\left( \lg 3,7 \frac{d}{\Delta} \right)^2}. \quad (14)$$

Ландау Л.Д. предложил уточненную формулу для гидравлического расчета гладких труб [2]:

$$\frac{\bar{u}_y}{v_*} = 5,75 \lg \frac{yv_*}{\nu} + 5,1. \quad (15)$$

Полуэмпирическая теория турбулентного движения жидкости в трубах, разработанная Прандтлем и Карманом на основе экспериментальных исследований Никурадзе, имеет существенные дефекты.

С одной стороны, формулы Прандтля (10) и (11) не описывают наиболее важной, так называемой переходной, области между гидравлически гладким и вполне шероховатым трением, с другой стороны, они базируются на трех допущениях, отличающихся схематичным подходом и приводящих к существенным противоречиям.

Первое допущение Прандтля о том, что при выводе формулы градиента скорости в ядре потока (7) можно пренебречь действием сил вязкого трения и считать величину динамического коэффициента вязкости жидкости  $\mu$  равной нулю, не отвечает граничным условиям и расходится с опытными данными.

Известно, что величина градиента скорости в пристеночной области потока  $\frac{d\bar{u}}{dy}$  имеет конечное значение, определяемое величиной касательного напряжения у стенки трубы  $\tau_*$ . Формула Прандтля (7) приводит к некорректному выводу о том, что на стенке при  $y=0$  величина градиента скорости имеет бесконечно большое значение  $\left( \frac{d\bar{u}}{dy} = \infty \right)$ . На оси потока при  $y = r_0$  формула (7) также дает неверное значение

градиента скорости, отличающееся от нуля  $\left( \frac{d\bar{u}}{dy} = \frac{v_*}{\chi r_0} \neq 0 \right)$ .

В отличие от Прандтля, А.Д. Альтшуль предложил не пренебрегать силами вязкого трения в формуле (2), согласившись со вторым и третьим допущениями Прандтля. В этом случае формулу (1), учитывая формулу (6), можно представить в виде

$$\frac{\tau_y}{\rho} = \frac{\tau_*}{\rho} = \left( \frac{\mu}{\rho} + \frac{A}{\rho} \right) \frac{d\bar{u}}{dy} = (v + \psi) \frac{d\bar{u}}{dy} = v_*^2, \quad (16)$$

где  $v = \mu/\rho$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости ( $\text{м}^2/\text{с}$ );  $\psi = A/\rho$  – кинематический коэффициент турбулентной вязкости ( $\text{м}^2/\text{с}$ ).

Подставляя формулу (9) в формулу (16), имеем

$$v_*^2 = (v + \chi v_* y) \frac{d\bar{u}}{dy}, \quad (17)$$

откуда

$$\frac{d\bar{u}}{dy} = \frac{v_*^2}{v + \chi v_* y} = \frac{v_*^2}{v \left( 1 + \frac{\chi v_* y}{v} \right)}. \quad (18)$$

Интегрируя уравнение (18), можно получить уравнение, описывающее изменение местной скорости  $\bar{u}_y$  при удалении от стенки трубы на расстояние  $y$ :

$$\frac{\bar{u}_y}{v_*} = \frac{1}{\chi} \ln \left( 1 + \frac{\chi v_* y}{v} \right) + C. \quad (19)$$

Из уравнения (19) можно получить уравнение для скорости  $\bar{u}_{ст}$  в пристеночной области потока жидкости на уровне средней высоты выступов шероховатости  $\Delta$ .

$$\frac{\bar{u}_{ст}}{v_*} = \frac{1}{\chi} \ln \left( 1 + \frac{\chi v_* \Delta}{v} \right) + C. \quad (20)$$

Из (19) и (20) было получено

$$\frac{\bar{u}_y}{v_*} - \frac{\bar{u}_{ст}}{v_*} = \frac{1}{\chi} \ln \left( 1 + \frac{\chi v_* y}{v} \right) + C - \left[ \frac{1}{\chi} \ln \left( 1 + \frac{\chi v_* \Delta}{v} \right) + C \right] = \frac{1}{\chi} \ln \frac{1 + \frac{\chi v_* y}{v}}{1 + \frac{\chi v_* \Delta}{v}}. \quad (21)$$

Следуя Прандтлю, Альтшуль принял, что скорость  $\bar{u}_{ст}$  зависит только от величины касательного напряжения на стенке трубы, и выполняется равенство

$$\frac{\bar{u}_{ст}}{v_*} = \text{const} = 7,8, \quad (22)$$

тогда

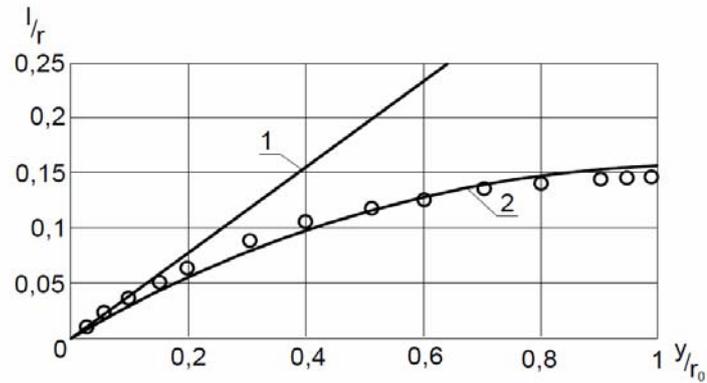
$$\bar{u}_y = v_* \left( \frac{1}{\chi} \ln \frac{1 + \frac{\chi v_* y}{v}}{1 + \frac{\chi v_* \Delta}{v}} + 7,8 \right). \quad (23)$$

Формула Альтшуля (23) в отличие от формулы Прандтля (10) позволяет получить непрерывную кривую распределения величин местной скорости вблизи стенки трубы.

При этом градиент скорости на стенке имеет конечное значение  $\frac{du}{dy} = \frac{v_*^2}{v}$ , и эта величина пропорциональна касательному напряжению сил вязкого трения у стенки  $\tau_* = v_*^2 \rho$ .

Формула (23) учитывает влияние на профиль распределения величин местных скоростей потока одновременно вязкости и шероховатости. Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют о том, что она позволяет получать корректные значения местных скоростей во всей области турбулентного движения, в том числе и в переходной области между гидравлически гладкими и вполне шероховатыми трубами.

В процессе дальнейшего развития представлений о турбулентном движении жидкости Альтшуль пришел к выводу о необходимости учитывать действительное, т.е. линейное, распределение величины касательного напряжения  $\tau$ , по сечению трубы и использовать более сложное выражение для длины пути перемешивания, чем формула Прандтля (4). В 1950 г. им была предложена параболическая зависимость для определения величины пути перемешивания, которая вполне удовлетворительно подтвердилась опытными данными (см. рисунок).



Распределение величины длины пути перемешивания  $l$ (м) по сечению трубы круглого сечения  
 1 – по Прандтлю (формула (4)); 2 – по формуле (24);  
 ○ – опытные данные Никурадзе при  $Re = 3,2 \cdot 10^6$

$$l = r_0 \chi_1 \left[ 2 \frac{y}{r_0} - \left( \frac{y}{r_0} \right)^2 \right], \quad (24)$$

где  $\chi_1 = 0,15$  – универсальная постоянная турбулентности.

На основании уравнения (24) была получена формула для определения градиента скорости:

$$\frac{d\bar{u}}{dy} = \frac{v_*}{\chi_1 r_0} \cdot \frac{\sqrt{1 - \frac{y}{r_0}}}{\frac{2y}{r_0} - \frac{y^2}{r_0^2}} \text{ (с}^{-1}\text{)}. \quad (25)$$

Интегрирование уравнения (25) позволило получить зависимость для местной скорости турбулентного потока:

$$\bar{u}_y = \bar{u}_{\max} - \frac{v_*}{\chi_1} \left( \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{y}{r_0}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{y}{r_0}}} - \arctg \sqrt{1 - \frac{y}{r_0}} \right) \text{ (м/с)}, \quad (26)$$

где  $\bar{u}_{\max}$  – максимальная местная скорость на оси турбулентного потока жидкости (м/с).

Экспериментальные исследования Никурадзе показали, что максимальный дефицит средней скорости турбулентного потока является постоянной величиной, равной 3,75 [1]:

$$D = \frac{\bar{u}_{\max} - v}{v_*} = 3,75, \quad (27)$$

где  $v$  – средняя скорость движения потока жидкости (м/с).

Из формулы (27) с учетом  $v = v_* \sqrt{8/\lambda}$  может быть выведена формула для определения величины максимальной местной скорости на оси турбулентного потока жидкости:

$$\bar{u}_{\max} = v + 3,75 v_* = v_* \sqrt{\frac{8}{\lambda}} + 3,75 v_* = v_* \left( 3,75 + \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \right). \quad (28)$$

С учетом этого формулу (26) можно записать в виде

$$\bar{u}_y = v_* \left( 3,75 + \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \right) - \frac{v_*}{\chi_1} \left( \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{y}{r_0}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{y}{r_0}}} - \operatorname{arctg} \sqrt{1 - \frac{y}{r_0}} \right) \quad (\text{м/с}). \quad (29)$$

Линейная зависимость распределения величин касательных напряжений  $\tau_y$  в турбулентном потоке жидкости обуславливает линейную зависимость градиента скорости  $G_r$  от текущего радиуса  $r$ , которая, в свою очередь, должна давать параболический закон изменения местной скорости движения жидкости  $\bar{u}_r$  в поперечном сечении трубы.

Как известно, параболический характер распределения местных скоростей по текущему радиусу наблюдается в ламинарном потоке жидкости (формула Стокса):

$$u_r = 2\nu \left( 1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) \quad (\text{м/с}). \quad (30)$$

При этом местная скорость у стенки равна нулю, а при удалении от нее она возрастает пропорционально квадрату отношения радиусов  $(r/r_0)^2$ , достигая максимального значения на оси трубы  $u_{\max \text{ л}} = 2\nu$ .

Максимальная осредненная местная скорость на оси турбулентного потока имеет меньшее значение и может быть определена по предложенному нами выражению  $\bar{u}_{\max \text{ т}} = 2\nu\beta$  [3], где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий уменьшение максимальной скорости в турбулентном режиме.

Коэффициент  $\beta$  может быть определен с учетом формул (28) и (30) при  $r = r_0$ :

$$\beta = \frac{\bar{u}_{\max \text{ т}}}{\bar{u}_{\max \text{ л}}} = \frac{\nu + 3,75\nu_*}{2\nu} = \frac{\nu(1 + 1,326\sqrt{\lambda})}{2\nu} = \frac{1 + 1,326\sqrt{\lambda}}{2}. \quad (31)$$

Закон распределения осредненных местных скоростей турбулентного потока по радиусу  $\bar{u}_r = f(r)$  должен обеспечивать условие равенства суммы элементарных расходов  $dQ$  в кольцевых сечениях площадью  $d\omega$ , имеющих толщину  $dr$  и удаленных от оси потока на расстояние  $r$ , общему расходу  $Q$ :

$$Q = \int_0^{r_0} u_r d\omega = \int_0^{r_0} f(r) 2\pi r dr = \nu \pi r_0^2 \quad (\text{м}^3/\text{с}). \quad (32)$$

Как было показано нами в [3], получить функцию, дающую корректные результаты, можно, подставляя в формулу (30), описывающую распределение величин местных скоростей в ламинарном потоке, корректирующие коэффициенты  $A$  и  $B$

$$\bar{u}_r = 2\nu \left( A - B \frac{r^2}{r_0^2} \right) \quad (\text{м/с}). \quad (33)$$

Значения коэффициентов  $A$  и  $B$  можно выразить через коэффициент  $\beta$ .

Учитывая, что при  $r = 0$   $\bar{u}_r = \bar{u}_{\max \text{ т}} = 2\nu\beta$ ,  $A = \beta$ . Подставляя функцию (33) в формулу (32) и учитывая, что  $A = \beta$ , получаем, что  $B = 2\beta - 1$ .

В этом случае функция (33) распределения величины осредненных местных скоростей  $\bar{u}_r$  по текущему радиусу  $r$  в турбулентном потоке жидкости будет иметь вид

$$\bar{u}_r = 2\nu \left[ \beta - (2\beta - 1) \frac{r^2}{r_0^2} \right] \quad (\text{м/с}). \quad (34)$$

Формула (34), в отличие от формул (15), (23) и (29), позволяет получить корректные граничные условия как в пристеночной области, так и в приосевой области турбулентного потока жидкости.

Для ламинарного режима величина градиента скорости  $G_r$  на расстоянии  $r$  от оси потока может быть определена дифференцированием формулы Стокса (30)

$$G_r = \frac{du_r}{dr} = -\frac{4\nu}{r_0^2} r = -\frac{4\nu}{r_0} \frac{r}{r_0} = -\frac{2\nu}{R_0} \frac{r}{r_0} = -G_* \frac{r}{r_0} \quad (\text{с}^{-1}), \quad (35)$$

где  $G_* = 4\nu/r_0$  – градиент на стенке трубы при  $r=r_0$  ( $\text{с}^{-1}$ ).

Подобным образом при дифференцировании функции (34) получаем формулу

$$G_r = \frac{du_r}{dr} = -\frac{4\nu}{r_0} (2\beta - 1) \frac{r}{r_0} = -\frac{2\nu}{R_0} (2\beta - 1) \frac{r}{r_0} = -G_* (2\beta - 1) \frac{r}{r_0} \quad (\text{с}^{-1}). \quad (36)$$

При этом градиент скорости на оси потока при  $r=0$  равен нулю.

Градиент скорости на границе ядра потока и переходного подслоя при  $r=r_0 - 2\delta_*$  имеет конечное значение и составляет

$$G_{**} = G_* (2\beta - 1) \frac{r_0 - 2\delta_*}{r_0} \quad (\text{с}^{-1}). \quad (37)$$

В табл. 1 приведены значения осредненных местных скоростей турбулентного потока  $\bar{u}_r$  (м/с) на расстоянии  $y$  (м) от стенки трубы, вычисленные по формулам (10), (15), (23), (29) и (34) для трубы диаметром  $d=0,05$  м с величиной, эквивалентной равномерно-зернистой шероховатости поверхности стенки трубы  $\Delta_{\text{эк}} = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м, при значении критерия Рейнольдса  $Re = 10000$  (область, близкая к области гидравлически гладких труб).

Т а б л и ц а 1

Расстояние от стенки трубы $y$ (м)	0,005	0,010	0,015	0,020	0,025
Осредненная местная скорость $\bar{u}_1$ , вычисленная по формуле (10) (м/с)	0,2088	0,2315	0,2448	0,2542	0,2617
Осредненная местная скорость $\bar{u}_2$ , вычисленная по формуле (15) (м/с)	0,2036	0,2263	0,2396	0,2490	0,2564
Осредненная местная скорость $\bar{u}_3$ , вычисленная по формуле (23) (м/с)	0,1965	0,2186	0,2317	0,2410	0,2483
Осредненная местная скорость $\bar{u}_4$ , вычисленная по формуле (29) (м/с)	0,1888	0,2186	0,2353	0,2459	0,2512
Осредненная местная скорость $\bar{u}_5$ , вычисленная по формуле (34) (м/с)	0,1882	0,2158	0,2354	0,2472	0,2512

В табл. 2 приведены значения осредненных местных скоростей турбулентного потока  $\bar{u}_r$  (м/с) на расстоянии  $y$  (м) от стенки трубы, вычисленные по формулам (10), (15), (23), (29) и (34) для трубы диаметром  $d=0,05$  м с величиной, эквивалентной равномерно-зернистой шероховатости поверхности стенки трубы  $\Delta_{\text{эк}} = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м, при значении критерия Рейнольдса  $Re = 150000$  (переходная область).

Т а б л и ц а 2

Расстояние от стенки трубы $y$ (м)	0,005	0,010	0,015	0,020	0,025
Осредненная местная скорость $\bar{u}_1$ , вычисленная по формуле (10) (м/с)	3,7383	4,0287	4,1986	4,3192	4,4127
Осредненная местная скорость $\bar{u}_2$ , вычисленная по формуле (15) (м/с)	3,6713	3,9617	4,1316	4,2522	4,3457
Осредненная местная скорость $\bar{u}_3$ , вычисленная по формуле (23) (м/с)	2,8892	3,1790	3,3487	3,4691	3,5626
Осредненная местная скорость $\bar{u}_4$ , вычисленная по формуле (29) (м/с)	2,8607	3,2420	3,4555	3,6010	3,6584
Осредненная местная скорость $\bar{u}_5$ , вычисленная по формуле (34) (м/с)	2,8540	3,2060	3,4573	3,6082	3,6584

В табл. 3 приведены значения осредненных местных скоростей турбулентного потока  $\bar{u}_r$  (м/с) на расстоянии  $y$  (м) от стенки трубы, вычисленные по формулам (11), (23), (29) и (34) для трубы диаметром  $d = 0,05$  м с величиной, эквивалентной равномерно-зернистой шероховатости поверхности стенки трубы  $\Delta_{\text{эк}} = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м, при значении критерия Рейнольдса  $Re = 300000$  (область вполне шероховатых труб).

Т а б л и ц а 3

Расстояние от стенки трубы $y$ (м)	0,005	0,010	0,015	0,020	0,025
Осредненная местная скорость $\bar{u}_1$ , вычисленная по формуле (11) (м/с)	5,9873	6,5554	6,8878	7,1236	7,3065
Осредненная местная скорость $\bar{u}_2$ , вычисленная по формуле (23) (м/с)	5,7047	6,2723	6,6045	6,8402	7,0230
Осредненная местная скорость $\bar{u}_3$ , вычисленная по формуле (29) (м/с)	5,7296	6,4756	6,8933	7,1575	7,2902
Осредненная местная скорость $\bar{u}_4$ , вычисленная по формуле (34) (м/с)	5,7156	6,4045	6,8965	7,1918	7,2902

Приведенные в табл. 1–3 данные показывают, что:

- 1) формулы Прандтля (10) и Ландау (15) позволяют корректно вычислять величину осредненной местной скорости турбулентного потока жидкости  $\bar{u}_r$  лишь в режиме гидравлически гладких труб;
- 2) уточненная формула (15), предложенная Ландау, позволяет получать более точные значения осредненной местной скорости потока  $\bar{u}_r$ , чем формула (10);
- 3) формула Прандтля (11) позволяет корректно вычислять величины скоростей  $\bar{u}_r$  в турбулентном потоке жидкости, движущимся в режиме вполне шероховатых труб;
- 4) формулы Альтшуля (23), (29) и предложенную нами формулу (34) можно использовать для расчета величин осредненных местных скоростей движения жидкости в трубопроводах круглого сечения, работающих в режимах гидравлически гладких труб, в переходной области и в режиме вполне шероховатых труб;
- 5) относительная разность величин осредненных местных скоростей турбулентного потока  $\bar{u}_r$ , вычисленных по формулам (23) и (34), составляет 0,2–5,6 %;
- 6) относительная разность величин осредненных местных скоростей турбулентного потока  $\bar{u}_r$ , вычисленных по формулам (29) и (34), составляет 0–1,3 %.

#### Список литературы

1. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика /Л. Прандтль. – Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2000. – 576 с.
2. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2006. – 736 с.
3. Андреев, С.Ю. Гидродинамические закономерности распределения величин местных осредненных скоростей турбулентного потока жидкости в поперечном сечении трубчатого гидродинамического устройства / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, М.И. Яхкинд//Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 2. – С. 178–190.

#### References

1. Prandtl, L. Fluid Mechanics / L. Prandtl. – Izhevsk: NITS Regular and chaotic dynamics, 2000 – 576 p.
2. Landau, L.D. Theoretical physics. Hydrodynamics / L.D. Landau, E.M. Lifshitz. – M.: Fizmatlit, 2006. – 736 p.
3. Andreev, S.Yu. Hydrodynamic regularities of distribution of the local velocities of the turbulent fluid flow in the cross section of the tubular hydrodynamic device / S.Yu. Andreev, I.A. Garkina, M.I. Yakhkind // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 2. – P. 178–190.

УДК 628.511.4:69.059.632

*Волгоградский государственный  
технический университет*

Россия, 400074, г. Волгоград,  
ул. Академическая, д. 1,  
тел.: (8442) 96-99-78; факс: (8442) 96-99-78

**Боровков Дмитрий Павлович,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Безопасность жизнедеятельности  
в строительстве и городском хозяйстве»  
E-mail: frigate@yandex.ru

*Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства*

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

**Чичиров Константин Олегович,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Теплогасоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: olegovich.79@mail.ru

**Грейсух Григорий Исаевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Физика и химия»  
E-mail: grev@pguas.ru

**Ежов Евгений Григорьевич,**  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: grev@pguas.ru

*Volgograd state technical university*

Russia, 400074, Volgograd, 1,  
Akademicheskaya St.  
tel.: (8442) 96-99-78; fax: (8442) 96-99-78

**Borovkov Dmitry Pavlovich,**  
Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Fire safety and civil  
protection»  
E-mail: frigate@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

**Chichirov Konstantin Olegovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department of «Heat and gas supply»  
E-mail: olegovich.79@mail.ru

**Greisukh Gregory Isaevich,**  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Physics and Chemistry»  
E-mail: grev@pguas.ru

**Ezhov Evgeny Gregoryevich,**  
Doctor of Sciences in Physics and  
Mathematics, Professor of the department  
«Information and computing systems»  
E-mail: grev@pguas.ru

## МОБИЛЬНАЯ АСПИРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОГРУЗОЧНЫХ РАБОТ ПРИ ДЕМОНТАЖЕ ЗДАНИЙ

Д.П. Боровков, К.О. Чичиров, Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов

Сформулированы основные требования к установкам очистки пылевых выбросов, применяющимся при демонтаже строительных конструкций и разборе завалов в городской черте. Предложена компоновочная схема мобильной пылеулавливающей установки, состоящая из пылеуловителя на встречных закрученных потоках и центробежного пылеконцентратора. Приведены результаты экспериментальных исследований по оптимизации параметров разработанной схемы пылеулавливающей установки.

*Ключевые слова: мобильная система аспирации, пылеулавливающая установка, гофрированный воздуховод, закрученные потоки, центробежный пылеконцентратор*

## MOBILE ASPIRATION INSTALLATION FOR LOADING WORKS DURING DISMANTLING OF BUILDINGS

D.P. Borovkov, K.O. Chichirov, G.I. Greisukh, E.G. Ezhov

The main requirements to the dust removal cleaning installations used for the dismantling of building structures and the analysis of blockages in the urban area are formulated. A layout scheme of a mobile dust collection unit consisting of a dust collector in counter-swirling flows and a centrifugal dust concentrator is proposed. The results of experimental studies on the optimization of the parameters of the developed scheme of a dust collection unit are presented.

*Keywords: mobile aspiration system, dust collection system, corrugated air duct, swirling flows, centrifugal dust concentrator*

Известно, что демонтажные работы в строительстве сопровождаются образованием большого количества пыли. Такие работы производятся, как правило, в черте города, в непосредственной близости от жилых массивов, и пыль становится большой проблемой для проживающих в этих районах жителей. Еще более вредным фактором пыль является для людей, непосредственно занятых на демонтажных работах. Поэтому актуальность проблемы пылевыведения при сносе зданий очевидна.

При демонтаже поврежденных или разрушенных строительных конструкций наибольшее пылевыведение в атмосферный воздух наблюдается в ходе погрузки, разгрузки и транспортировки отходов [1]. Широко распространенным способом для предотвращения выбивания пылевоздушной смеси из объема бункеров при их заполнении является создание разрежения, получаемого путем организации местных отсосов. Однако при использовании бункеров и емкостей, расположенных на автомобильном и железнодорожном транспорте, устройство аспирационных отсосов затруднено вследствие ряда причин.

Основным затруднением при организации аспирации емкостей для перевозки строительных отходов, расположенных на передвижных платформах (автомобильных шасси или железнодорожных вагонах), является выбор способа очистки отводимых объемов воздуха от пылевых частиц. Существующее аспирационное оборудование характеризуется существенными массово-габаритными характеристиками, затрудняющими, а зачастую и исключаящими (например в случае с автомобильным транспортом) их размещение в непосредственной близости от аспирируемых емкостей [1].

В качестве решения задачи по очистке воздуха, удаляемого из передвижных емкостей, предназначенных для сбора сыпучих (либо пылящих) строительных отходов, предлагается использовать передвижные аспирационные установки, представляющие собой передвижные комплексы, смонтированные на отдельном шасси. Такие мобильные аспирационные установки должны присоединяться к аспирируемым емкостям таким образом, чтобы их взаимное расположение могло изменяться, в зависимости от ряда внешних условий. Ввиду того что расстояние между бункером и установкой в различных случаях может быть разным, а также возможно изменение строительных отметок, на которых находятся шасси бункера и установки (например при разборе крупного завала), соединение должно представлять собой гибкий воздуховод. В качестве такого воздуховода наиболее рационально использование гофрированных шлангов больших диаметров, допускающих значительные изгибы без нежелательных деформаций сечения, приводящих к повышению аэродинамического сопротивления. Кроме того, такой воздуховод менее подвержен повреждениям ввиду большей механической прочности.

Следует отметить, что применение гофрированных воздуховодов, помимо ряда преимуществ, характеризуется также повышенным образованием пылевых отложений, возникающих ввиду специфической геометрии внутренней поверхности. При движении пылевоздушного потока по гофрированному воздуховоду образуются завихрения потока, приводящие к образованию зон разрежения в углублениях, вследствие чего пылевые частицы начинают выпадать из потока и осаждаются на внутренних поверхностях. Для исключения повышенного пылеоседания на внутренних поверхностях гофрированных воздуховодов предлагается придавать потоку дополнительное вращательное движение. Использование закрученного потока в большинстве случаев позволяет эффективно предотвращать образование пылевых отложений в аспирационных сетях [2–6].

Наиболее рациональным решением при выборе пылеулавливающего оборудования для мобильных установок является применение пылеуловителей на встречных закрученных потоках (ВЗП) [7, 8]. Данный тип инерционных пылеуловителей, достоинствами которых являются конструктивная простота и малые эксплуатационные затраты, характерные для пылеуловителей циклонного типа, в то же время выгодно отличается от них более высокими значениями эффективности пылеулавливания. Особенно важно и то, что эффективность улавливания частиц мелких фракций, наносящих наибольший урон окружающей среде и здоровью человека, у пылеуловителей ВЗП существенно выше, чем у циклонов традиционной конструкции [7].

Распространенным способом повышения эффективности пылеулавливания в системах аспирации с инерционными пылеуловителями является применение многоступенчатой компоновки. Однако в условиях жестких требований, обусловленных мобильностью конструируемых аспирационных систем, использование многоступенчатой компоновки представляется нежелательным. Многоступенчатая компоновка характеризуется повышенными габаритами и массой, что в условиях жестких требований, обусловленных грузоподъемностью используемого шасси, а также габаритными ограничениями, связанными с перемещением по дорогам общего использования, делает ее применение нерациональным. Также следует отметить, что энергоемкость многоступенчатых систем превышает таковой показатель одноступенчатых ввиду повышенного аэродинамического сопротивления, повышение которого, помимо энергоэффективности, приводит к дополнительному увеличению массы установки за счет применения более мощного тягодутьевого оборудования.

С учетом вышесказанного, наиболее рациональным представляется использование одноступенчатой компоновки с применением пылеуловителя на встречных закрученных потоках. Для максимального повышения эффективности улавливания пылевых частиц предлагается применять рециркуляционную схему движения очищаемого воздуха с отдельной подачей разнозапыленных потоков на первичный и вторичный входы пылеуловителя ВЗП, для чего используется центробежный разделитель-концентратор [9]. Для снижения габаритной высоты установки и уменьшения ее энергоемкости применяется тангенциальный раскручиватель очищенного потока, смонтированный вместо стандартного вентиляционного отвода [10, 11].

При загрузке значительных количеств сыпучих и пылевидных материалов в железнодорожный транспорт и крупнотоннажные самосвалы, как правило, применяются транспортеры, что позволяет повысить эффективность борьбы с пылевым загрязнением посредством применения аспирационных укрытий, устройство которых затруднено при ручной погрузке. При использовании таких укрытий аспирационные отсосы, представляющие собой конфузоры, наиболее рационально располагать на горизонтальных поверхностях бункеров, в непосредственной близости от загрузочных проемов.

С целью определения эффективности работы разработанной аспирационной установки проведены экспериментальные исследования, для чего применялась экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1. Для имитации аспирируемого объема использован бункер, основные характеристики которого аналогичны характеристикам кузова автосамосвала со специально спроектированным аспирационным укрытием. Для максимального приближения к условиям эксплуатации загрузка модели кузова производилась с помощью ленточного транспортера. В качестве загружаемого материала использован строительный мусор с мест разбора завалов кирпичной жилой застройки.

Экспериментальная установка работает по следующему принципу: запыленный воздух, отводимый из аспирируемого объема через аспирационный отсос (2), поступает в закручиватель потока (3), где приобретает вращательное движение. По гофрированному воздуховоду (4) запыленный поток подводится на первичный вход (5) пылеуловителя ВЗП (6). После прохождения сепарационной камеры (7), в которой происходит сепарация пылевых частиц, очищенный поток поступает в тангенциальный раскручиватель (8), где часть остаточной энергии вращения потока преобразуется в энергию поступательного движения. Далее, под действием разрежения, создаваемого тягодутьевым устройством (вентилятором) (10), прошедший первичную очистку поток направляется в воздуховод очищенного газа, где происходит отбор его части в рециркуляционный воздуховод (13), по которому воздух подводится к центробежному разделителю-концентратору (14). В разделителе-концентраторе происходит разделение на два потока с большей и меньшей концентрацией пылевых частиц. Затем более концентрированный поток направляется на первичный вход пылеуловителя (5), а менее концентрированный поток поступает на вторичный вход (15).

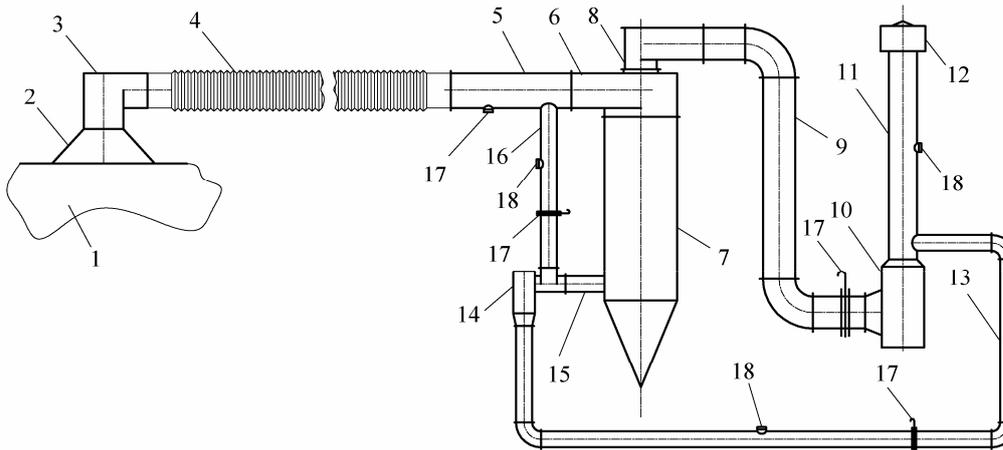


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – аспорируемая емкость; 2 – коническое сужение; 3 – тангенциальный закручиватель потока; 4 – гибкий воздуховод; 5 – патрубок ввода потока; 6 – верхний (первичный) ввод пылеуловителя; 7 – корпус пылеуловителя; 8 – тангенциальный вывод очищенного потока; 9, 11 – воздуховоды очищенного потока; 10 – тягодутьевое устройство; 12 – типовой дефлектор; 13 – воздуховод рециркуляции; 14 – центробежный пылеконцентратор; 15 – вторичный ввод пылеуловителя; 16 – патрубок концентрированного потока; 17 – шиберы; 18 – лючки для проведения замеров

Установка и аспорируемая емкость соединены посредством гофрированного шланга, диаметр которого составляет 120 мм. В соответствии с планом экспериментальных исследований длина шланга может варьироваться. Закручиватель потока выполнен регулируемым, что позволяет ступенчато изменять интенсивность закрутки специальными винтами. Для облегчения проведения экспериментальных исследований конфузор аспирационного отсоса, закручиватель, а также гофрированный воздуховод снабжены быстросоединяемыми фланцами.

В качестве функций отклика на этапе планирования экспериментальных исследований приняты общая эффективность улавливания пыли, аэродинамическое сопротивление установки, а также концентрация пылевых частиц в непосредственной близости от места загрузки. В качестве факторов, оказывающих определяющее влияние на функции отклика, на основании аналитического обзора [7, 8, 10, 11] и предварительных исследований выбраны:

$L_{\text{общ}}$  – количество очищаемого воздуха, удаляемого из аспорируемой емкости и подаваемого на очистку в установку, м<sup>3</sup>/ч;

$L_2/L_{\text{общ}}$  – отношение расхода воздуха, поступающего после прохождения разделителя-концентратора на нижний ввод, к общему, подаваемому в пылеуловитель на встречных закрученных потоках;

$L_3/L_{\text{общ}}$  – отношение расхода воздуха, поступающего после прохождения разделителя-концентратора на верхний ввод пылеуловителя на встречных закрученных потоках, к общему, подаваемому на очистку.

При обработке результатов измерений, выполненных в ходе экспериментальных исследований, методами математической статистики получены регрессионные зависимости, описывающие итоги эксперимента в виде полиномов второй степени. С учетом статистической значимости вычисленных коэффициентов полученные уравнения имеют вид (1), (2), (3).

Зависимость (1) представляет собой функцию, описывающую влияние определяющих факторов на параметр эффективности пылеулавливания экспериментальной установки

$$\eta = 0,0139 - 2,042 \left( \frac{L_2}{L_{\text{общ}}} \right)^2 - 19,001 \left( \frac{L_3}{L_{\text{общ}}} \right)^2 - 0,0007 L_{\text{общ}} +$$

$$+ 1,27 \frac{L_2}{L_{\text{общ}}} + 4,1935 \frac{L_3}{L_{\text{общ}}} + 0,0003 \cdot L_{\text{общ}} \cdot \frac{L_2}{L_{\text{общ}}} \cdot \frac{L_3}{L_{\text{общ}}}. \quad (1)$$

Зависимость (2) характеризует изменение значения коэффициента аэродинамического сопротивления экспериментальной установки в зависимости от определяющих факторов

$$\xi = 143,474 + 87,75 \left( \frac{L_2}{L_{\text{общ}}} \right)^2 + 5,826 \left( \frac{L_3}{L_{\text{общ}}} \right)^2 + 0,0488 L_{\text{общ}} - 31,696 \frac{L_2}{L_{\text{общ}}} + 28,614 \frac{L_3}{L_{\text{общ}}} - 0,01 \cdot L_{\text{общ}} \cdot \frac{L_2}{L_{\text{общ}}} \cdot \frac{L_3}{L_{\text{общ}}}. \quad (2)$$

Зависимость (3) позволяет определять концентрацию пылевых частиц в воздухе в непосредственной близости от работающей установки

$$C = 0,0004 L_{\text{общ}}^2 - 0,8607 L_{\text{общ}} + 518,5. \quad (3)$$

На рис. 2 в графическом виде представлена зависимость эффективности работы пылеулавливающей установки от параметра, характеризующего соотношение доли рециркуляционного расхода, поступающего на нижний (вторичный) ввод пылеуловителя, и общего, подаваемого на очистку из аспирируемой емкости,  $\eta(L_2/L_{\text{общ}})$ . Аналогичная зависимость, характеризующая изменение эффективности очистки от доли расхода очищаемого воздуха, отводимого на рециркуляцию после прохождения очистки в пылеуловителе,  $\eta(L_3/L_{\text{общ}})$ , представлена на рис. 3.

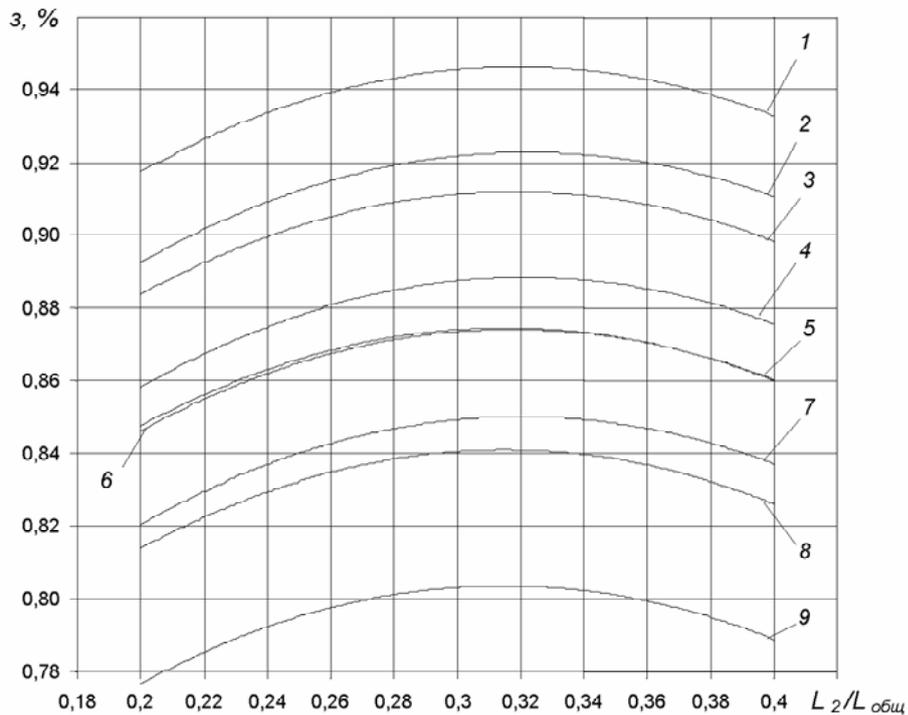


Рис. 2. Зависимость эффективности очистки экспериментальной установки от отношения рециркуляционного расхода воздуха, подаваемого на вторичный ввод пылеуловителя ВЗП, к общему, подаваемому на очистку  $\eta(L_2/L_{\text{общ}})$ :

- 1 –  $L_{\text{общ}} = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,1$ ; 2 –  $L_{\text{общ}} = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,15$ ;  
 3 –  $L_{\text{общ}} = 900 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,1$ ; 4 –  $L_{\text{общ}} = 900 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,15$ ;  
 5 –  $L_{\text{общ}} = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,05$ ; 6 –  $L_{\text{общ}} = 800 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,1$ ;  
 7 –  $L_{\text{общ}} = 800 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,15$ ; 8 –  $L_{\text{общ}} = 900 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,05$ ;  
 9 –  $L_{\text{общ}} = 800 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,05$

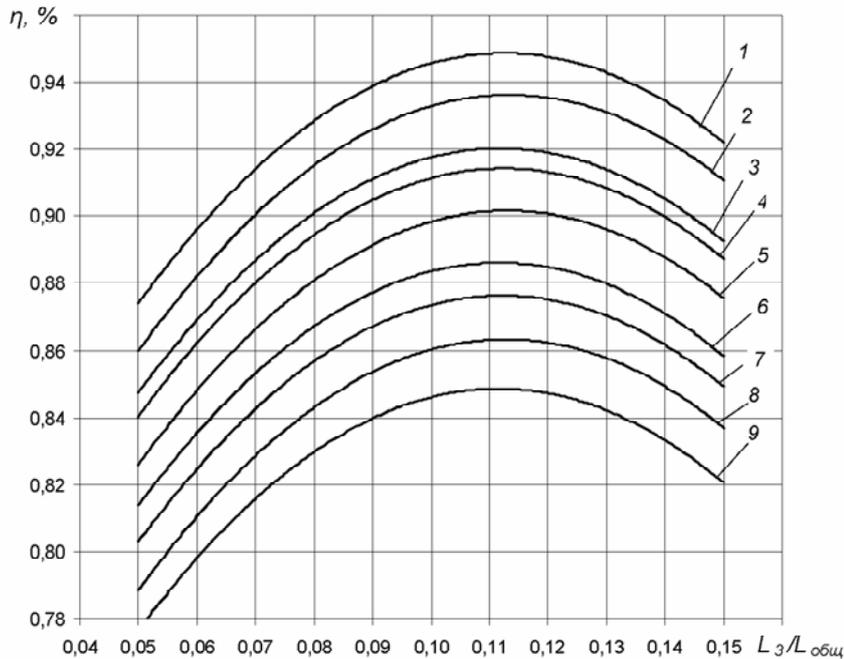


Рис. 3. Зависимость эффективности очистки экспериментальной установки от отношения рециркуляционного расхода воздуха, подаваемого на первичный ввод пылеуловителя ВЗП, к общему, подаваемому на очистку  $\eta(L_3/L_{\text{общ}})$ :

- 1 –  $L_{\text{общ}} = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_2/L_{\text{общ}} = 0,3$ ; 2 –  $L_{\text{общ}} = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_2/L_{\text{общ}} = 0,4$ ;  
 3 –  $L_{\text{общ}} = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_2/L_{\text{общ}} = 0,2$ ; 4 –  $L_{\text{общ}} = 900 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_2/L_{\text{общ}} = 0,3$ ;  
 5 –  $L_{\text{общ}} = 900 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_2/L_{\text{общ}} = 0,4$ ; 6 –  $L_{\text{общ}} = 900 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_2/L_{\text{общ}} = 0,2$ ;  
 7 –  $L_{\text{общ}} = 800 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_2/L_{\text{общ}} = 0,3$ ; 8 –  $L_{\text{общ}} = 800 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_2/L_{\text{общ}} = 0,4$ ;  
 9 –  $L_{\text{общ}} = 800 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_2/L_{\text{общ}} = 0,2$

Анализ данных, приведенных на рис. 2, показывает, что диапазон оптимальных значений доли расхода, поступающей на вторичный ввод пылеуловителя на встречных закрученных потоках после прохождения центробежного разделителя-концентратора, составляет  $L_2/L_{\text{общ}} = 0,30 \dots 0,34$ . Данное значение несколько превышает диапазон аналогичных значений, которые характерны для пылеуловителей ВЗП в случае непосредственной подачи очищаемого газа на вторичный ввод [7, 8]. Данный факт объясняется тем, что при рассматриваемой компоновочной схеме поток, поступающий на нижний ввод пылеуловителя ВЗП, имеет существенно более низкую концентрацию пылевых частиц в сравнении с потоком, подаваемым на очистку от источника пылевыделения. При повышении доли потока, направляемого на вторичный ввод, наступает плавное устойчивое понижение эффективности очистки.

Диапазон оптимальных значений доли расхода очищаемого воздуха, поступающей после прохождения центробежного разделителя-концентратора на верхний (первичный) ввод пылеуловителя ВЗП, обеспечивающий максимальную эффективность очистки, составляет  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,10 \dots 0,12$ , независимо от взаимного сочетания других определяющих факторов. При более низких значениях данного параметра центробежный разделитель-концентратор не обеспечивает требуемой эффективности разделения потоков, что ведет к возрастанию концентрации пылевых частиц в потоке, подаваемом на вторичный ввод, в результате чего происходит снижение общей эффективности улавливания.

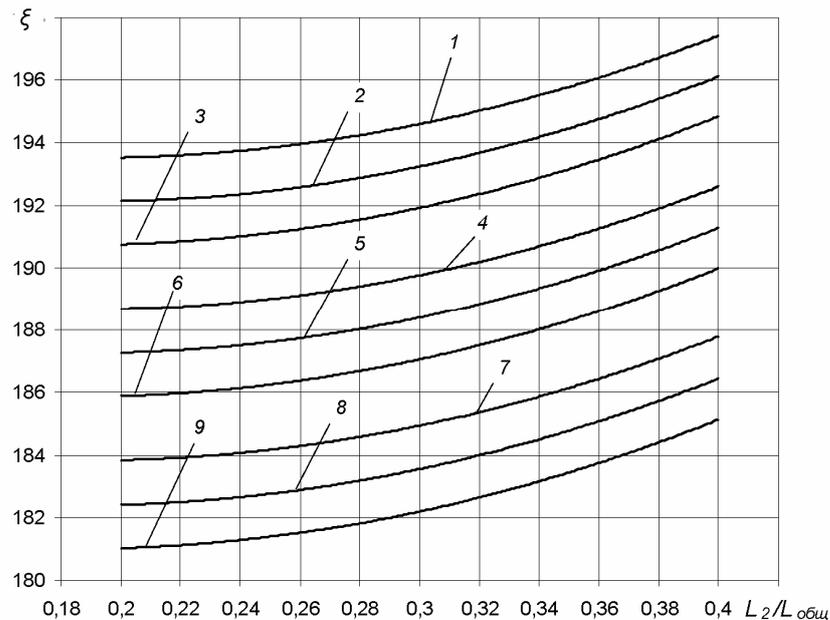


Рис. 4. Зависимость коэффициента местного сопротивления экспериментальной установки от отношения рециркуляционного расхода воздуха, подаваемого на вторичный ввод пылеуловителя ВЗП, к общему, подаваемому на очистку,  $\zeta(L_2/L_{\text{общ}})$ :

1 –  $L_{\text{общ}} = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,15$ ; 2 –  $L_{\text{общ}} = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,10$ ;  
 3 –  $L_{\text{общ}} = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,05$ ; 4 –  $L_{\text{общ}} = 900 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,15$ ;  
 5 –  $L_{\text{общ}} = 900 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,10$ ; 6 –  $L_{\text{общ}} = 900 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,05$ ;  
 7 –  $L_{\text{общ}} = 800 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,15$ ; 8 –  $L_{\text{общ}} = 800 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,10$ ;  
 9 –  $L_{\text{общ}} = 800 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,05$

Данные, представленные на рис. 4, свидетельствуют о том, что зависимость  $\zeta(L_2/L_{\text{общ}})$  является возрастающей во всем диапазоне варьирования определяющих факторов. То же можно сказать и про характер зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления экспериментальной установки от соотношения расхода, подаваемого после прохождения рециркуляции на первичный ввод пылеуловителя, и общего, подаваемого на очистку,  $\zeta(L_3/L_{\text{общ}})$ . Возрастающий характер настоящих зависимостей обусловлен тем, что оба потока являются рециркуляционными и повышение их доли от общего расхода, поступающего на очистку, приводит к увеличению количества воздуха, проходящего через пылеуловитель.

При проведении совместного анализа экспериментальных данных, характеризующих аэродинамическое сопротивление экспериментальной установки, и эффективности ее работы установлено оптимальное соотношение величин, характеризующих определяющими факторами. Оптимальным режимом работы системы пылеулавливания предлагаемой компоновочной схемы является сочетание параметров  $L_2/L_{\text{общ}} = 0,30 \dots 0,34$  и  $L_3/L_{\text{общ}} = 0,10 \dots 0,12$ . Отклонение от указанного сочетания параметров дает лишь незначительное повышение эффективности очистки при существенном росте энергозатрат.

Зависимость концентрации пылевых частиц, содержащихся в воздухе зоны, непосредственно примыкающей к загрузочному проему аспирируемого бункера, в процессе загрузки его строительными отходами, от количества воздуха, отводимого на очистку в аспирационную установку, представлена на рис. 5. Полученная экспериментальным путем зависимость (3) имеет ярко выраженный убывающий характер, что наглядно свидетельствует об эффективности применения аспирационного отсоса, снижающего выбивание пылевых частиц за счет создания разрежения в загружаемом объеме.

Наиболее заметный эффект от применения аспирационной установки наблюдается в диапазоне значений расхода запыленного воздуха, удаляемого из аспирируемого бункера,  $L_{\text{общ}} = 800 \dots 920 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Значения концентрации пыли в воздухе вблизи

аспирационного укрытия при этом снижается с исходных  $C = 103,2 \text{ мг/м}^3$  до  $C = 86,9 \text{ мг/м}^3$ .

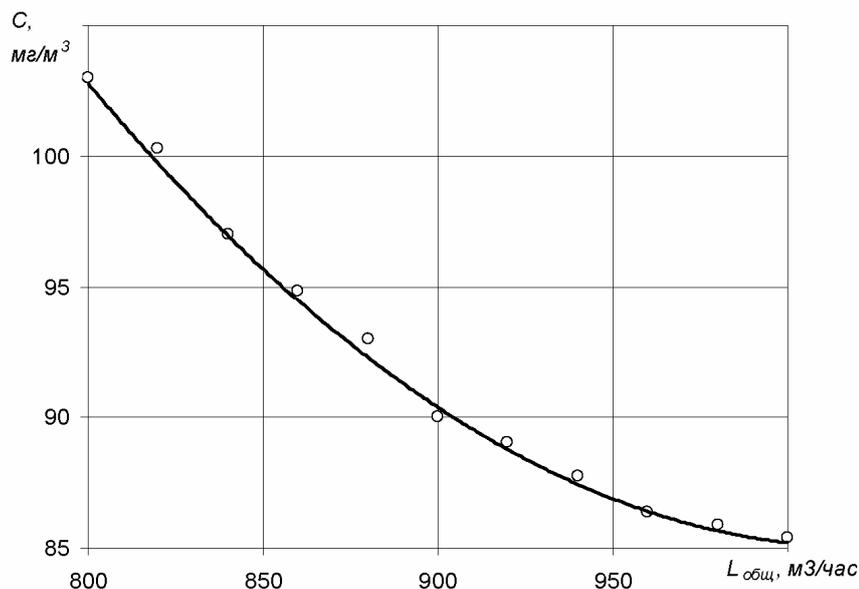


Рис. 5. Зависимость концентрации пылевых частиц, витающих в воздухе, отобранном в непосредственной близости от проема в укрытии бункера, от значения величины расхода пылевоздушной смеси, отводимого мобильной аспирационной установкой  $C(L_{\text{общ}})$

Дальнейшее увеличение количества воздуха, отводимого от аспирируемого бункера, не приносит существенного эффекта. Повышение аэродинамического сопротивления и, как следствие, увеличение энергоемкости делают увеличение расхода аспирационного воздуха нерациональным. Таким образом, оптимальное значение аспирационного расхода, удаляемого от обслуживаемого мобильной установкой бункера, составляет  $L_{\text{общ}} = 890 \dots 930 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Исходя из оптимального значения расхода запыленного воздуха, удаляемого от аспирируемой емкости, и существующих диаметров гибких гофрированных воздухопроводов, во избежание образования пылевых отложений экспериментально осуществлен подбор формпараметра закрутки потока, характеризующего интенсивность закрутки потока, создаваемого тангенциальным закручивателем. Закручиватель тангенциального типа выбран как наиболее подходящий для использования в аспирационных системах ввиду ряда особенностей, наиболее важной из которых является отсутствие частей, выступающих в живое сечение потока, что позволяет избежать оседания пылевых частиц внутри устройства. Также немаловажным достоинством тангенциальных закручивателей является простота конструкции и легкость изготовления [2, 3].

Функцией отклика в данном эксперименте является  $\Phi^*$  – интегральный параметр закрутки потока, создаваемый тангенциальным закручивателем, и численно, с практической точностью, совпадающий с его геометрическим параметром закрутки потока (формпараметром)  $\Phi_r^*$  [2, 3]. Искомое значение параметра интенсивности закрутки потока определяется как наименьшее, позволяющее предотвратить оседание пылевых частиц по всей длине гофрированного воздуховода. Наличие оседания пылевых частиц фиксируется визуально, по результатам осмотра внутренних поверхностей воздуховода, в перерывах между очередным испытанием.

Для обеспечения возможности плавного регулирования величины интенсивности закрутки потока при проведении экспериментальных исследований использован тангенциальный закручиватель с изменяемым геометрическим параметром интенсивности закрутки  $\Phi_r^*$ . Конструкция закручивателя представлена на рис. 6.

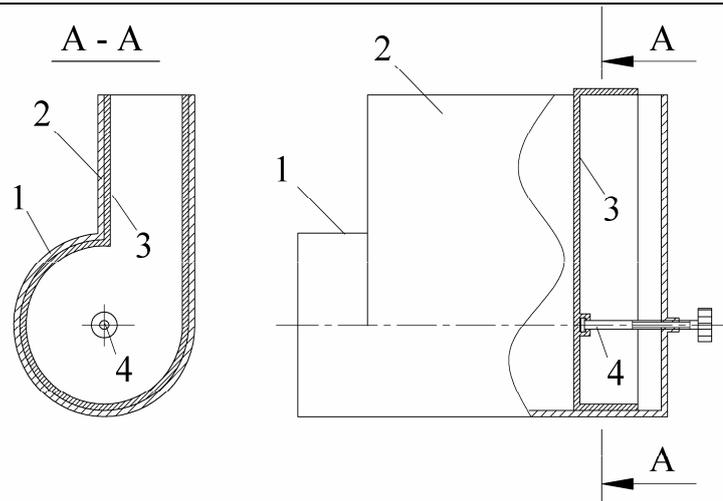


Рис. 6. Тангенциальный закручиватель с изменяемой площадью сечения входного патрубка:  
1 – цилиндрическая камера; 2 – входной тангенциальный патрубок; 3 – подвижная стенка;  
4 – регулировочный винт

Интенсивность закрутки, создаваемая тангенциальным закручивателем, регулируется путем изменения площади сечения входного тангенциального патрубка, которое осуществляется путем перемещения подвижной стенки 3 посредством регулировочного винта 4 [12, 13]. Диапазон изменения значений формпараметра закрутки потока у закручивателя, использованного при проведении эксперимента, составляет  $\Phi_r^* = 0,5 \dots 5$ .

При статистической обработке результатов экспериментальных замеров уравнение регрессии, характеризующее зависимость минимального значения формпараметра закручивателя, позволяющего предотвратить отложение частиц на стенках гофрированного воздуховода, от его длины, получено в виде полинома второй степени. С учетом значимости коэффициентов регрессии зависимость имеет вид

$$\Phi^* = -6,04217 - 0,00076 \cdot (l/d)^2 - 0,00001 \cdot L_{\text{общ}}^2 + 0,15523 \cdot l/d + 0,01463 \cdot L_{\text{общ}} - 0,00011 \cdot l/d \cdot L_{\text{общ}}. \quad (4)$$

Полученная зависимость (4) отличается возрастающим характером, объясняющимся вырождением закрутки по длине канала, имеющим экспоненциальный характер [2-6, 12], в силу которого максимальная длина гофрированного воздуховода при используемой компоновке ограничена значениями отношения диаметра к протяженности  $l/d = 25 \dots 30$ . Дальнейшее возрастание длины воздуховода обуславливает повышение параметра закрутки потока до величин, получение которых связано с недопустимым ростом аэродинамического сопротивления и которые ведут к непропорциональному повышению энергетических затрат, требуемых для работы системы в целом.

Диапазон изменения интегрального параметра закрутки потока, необходимого для предотвращения образования пылевых отложений в гофрированном воздуховоде, составляет от  $\Phi^* = 0,621$  при относительной длине воздуховода 10 диаметров и расходе воздуха  $L_{\text{общ}} = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$  до  $\Phi^* = 1,33$  при относительной длине воздуховода 20 диаметров и  $L_{\text{общ}} = 800 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Следует отметить, что данные получены для горизонтально натянутого гофрированного воздуховода с относительным провисанием не более 5 %. Это требование необходимо соблюдать при эксплуатации предлагаемых мобильных аспирационных установок в случае использования настоящих экспериментальных результатов в качестве справочных данных.

Таким образом, использование закрученного потока, создаваемого тангенциальным закручивателем, позволяет обеспечить возможность присоединения мобильных аспирационных установок к передвижному аспирируемому оборудованию с помощью

гибких гофрированных воздуховодов без риска забивания последних пылевыми отложениями.

#### **Выводы**

1. При проектировании мобильных аспирационных установок предпочтительной является одноступенчатая компоновка с применением в качестве основного пылеулавливающего оборудования пылеуловителей ВЗП с центробежными разделителями-концентраторами.

2. Для обеспечения возможности присоединения мобильной аспирационной установки к источнику загрязнения предлагается использовать гибкий гофрированный воздуховод, снабженный закручивателем потока для предотвращения образования пылевых отложений, обусловленных гофрированием, на внутренних поверхностях.

3. С целью изучения эффективности предлагаемой аспирационной установки проведены опытно-промышленные исследования, которые позволили оптимизировать ее аэродинамические характеристики.

4. Опытные-промышленные исследования показали, что применение мобильных аспирационных установок предложенной компоновки при работах по демонтажу поврежденных и разрушенных зданий является эффективным решением по локализации образующихся пылевых выбросов.

#### **Список литературы**

1. Сергина, Н.М. Совершенствование методов очистки воздуха рабочей зоны от пыли известкового щебня, выделяющейся при разгрузке железнодорожных вагонов / Н.М. Сергина, Д.П. Боровков, Е.А. Семенова // Инженерный вестник Дона. – 2012. – Т. 23, № 4–2 (23). – С. 105.

2. Азаров, В.Н. Применение закрутки потока в системах аспирации на предприятиях строительной индустрии / В.Н. Азаров, Д.П. Боровков // Строительные материалы. – 2012. – № 5. – С. 65–67.

3. Azarov, V.N. Application of swirling flows in aspiration systems / V.N. Azarov, D.P. Borovkov, A.M. Redhwan // International Review of Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 8, № 4. – P. 750–753.

4. Азаров, В.Н. О транспортировании пылевых частиц закрученными потоками в воздуховодах систем аспирации и обеспыливающей вентиляции / В.Н. Азаров, Д.П. Боровков, С.В. Филиппова // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – № 3–1 (42). – С. 113–119.

5. Азаров, В.Н. Об использовании закрутки потока в аспирационных системах на предприятиях строительной индустрии / В.Н. Азаров, Д.П. Боровков // Вестник центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2012. – № 16. – С. 12–17.

6. Боровков, Д.П. Системы аспирации с закруткой потока в воздуховодах / Д.П. Боровков, К.О. Чичиров // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 1. – С. 115–121.

7. Experimental study of secondary swirling flow influence on flows structure at separation chamber inlet of dust collector with counter swirling flows / V.N. Azarov, D.V. Lukanin, D.P. Borovkov, A.M. Redhwan // International Review of Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 8, № 5. – P. 851–856.

8. Исследование по оптимизации характеристик верхнего ввода пылеуловителей со встречными закрученными потоками / Д.П. Боровков, П.А. Сидякин, И.В. Бурба, С.И. Экба // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 11–5. – С. 866–870.

9. Боровков, Д.П. Повышение эффективности пылеуловителей на встречных закрученных потоках / Д.П. Боровков, И.В. Бурба, К.О. Чичиров // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 157–163.

10. Применение раскручивателей для утилизации энергии закрученного потока в пылеуловителях на встречных закрученных потоках / Д.П. Боровков, П.А. Сидякин,

С.И. Экба, Е.А. Семенова, С.В. Шульга // Современные фундаментальные и прикладные исследования. – 2013. – Специальный выпуск. – С. 105–111.

11. Боровков, Д.П. Применение раскручивателей для повышения энергоэффективности многоступенчатых систем аспирации предприятий строительной индустрии / Д.П. Боровков, Д.В. Азаров, Ю.А. Старцев // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2012. – № 28. – С. 164–170.

12. Боровков, Д.П. Аэродинамический расчет систем аспирации при организации закрутки потока в воздуховодах / Д.П. Боровков, К.О. Чичиров // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 3. – С. 145–148.

13. Боровков, Д.П. Устройства для создания закрутки потока в воздуховодах систем аспирации / Д.П. Боровков, Д.А. Скориков // Интернет-Вестник ВолГАСУ. – 2013. – № 1 (25). – С. 3.

## References

1. Sergina, N.M. Improvement of methods for cleaning the air of the working area from crushed limestone dust released during unloading of railway cars / N.M. Sergina, D.P. Borovkov, E.A. Semenova // Engineering herald Don. – 2012. – Vol. 23, No. 4–2 (23). – P. 105.

2. Azarov, V.N. The use of spin flow in the aspiration systems in the construction industry / V.N. Azarov, D.P. Borovkov // Construction Materials. – 2012. – № 5. – P. 65–67.

3. Azarov, V.N. Application of swirling flows in aspiration systems / V.N. Azarov, D.P. Borovkov, A.M. Redhwan // International Review of Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 8, № 4. – P. 750–753.

4. Azarov, V.N. On the transportation of dust particles by swirling flows in the air ducts of the aspiration systems and dedusting ventilation / V.N. Azarov, D.P. Borovkov, S.V. Filippova // Proceedings of the South-West State University. – 2012. – № 3–1 (42). – P. 113–119.

5. Azarov, V.N. On the use of spin flow in the suction systems at the enterprises of the construction industry / V.N. Azarov, D.P. Borovkov // Bulletin of the Central Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. – 2012. – № 16. – P. 12–17.

6. Borovkov, D.P. Aspiration systems with swirling flow in the air ducts / D.P. Borovkov, K.O. Chichirov // Regional architecture and engineering. – 2013. – No. 1. – P. 115–121.

7. Experimental study of secondary swirling flow influence on flows structure at separation chamber inlet of dust collector with counter swirling flows / V.N. Azarov, D.V. Lukanin, D.P. Borovkov, A.M. Redhwan // International Review of Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 8, № 5. – P. 851–856.

8. A study on the optimization of the characteristics of the top entry of dust collectors with counter-swirling flows / D.P. Borovkov, P.A. Sidyakin, I.V. Burba, S.I. Ekba // Basic research. – 2013. – № 11–5. – P. 866–870.

9. Borovkov, D.P. Improving the efficiency of dust collectors on the counter swirling flows / D.P. Borovkov, I.V. Burba, K.O. Chichirov // Regional architecture and engineering. – 2013. – No. 3. – P. 157–163.

10. The use of straighteners for the utilization of the energy of a swirling flow in a dust collector on a counter-swirling flow / D.P. Borovkov, P.A. Sidyakin, S.I. Ekba, E.A. Semenova, S.V. Shulga // Modern fundamental and applied research. – 2013. – Special Edition. – P. 105–111.

11. Borovkov, D.P. The use of advertisers to improve the energy efficiency of multi-stage aspiration systems for construction industry enterprises / D.P. Borovkov, D.V. Azarov, Yu.A. Startsev // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and Architecture. – 2012. – No. 28. – P. 164–170.

12. Borovkov, D.P. Aerodynamic calculation of aspiration systems when organizing swirling flow in the air ducts / D.P. Borovkov, K.O. Chichirov // Regional architecture and engineering. – 2012. – № 3. – P. 145–148.

13. Borovkov, D.P. Devices for creating swirling flow in the air ducts of the aspiration systems / D.P. Borovkov, D.A. Skorikov // Internet Bulletin VolgGASU. – 2013. – № 1 (25). – P. 3.

УДК 697.9:699.871:631.22

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

**Ерёмкин Александр Иванович,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

**Баканова Светлана Викторовна,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: SvBakanova@mail.ru

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

**Eremkin Alexander Ivanovich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Heat, gas supply  
and ventilation»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

**Bakanova Svetlana Viktorovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Heat, gas supply and  
ventilation»  
E-mail: SvBakanova@mail.ru

## РАСЧЁТ ОБЩЕОБМЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ НА РАЗБАВЛЕНИЕ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ В ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПОМЕЩЕНИЯХ

А.И. Еремкин, С.В. Баканова

Рассмотрен расчёт общеобменной приточной вентиляции в животноводческих помещениях. Получены формулы для определения количества приточного воздуха, которое необходимо подавать вентиляционными установками при неустановившемся и при установившемся режимах вентиляции. Предлагаемая методика позволяет снизить концентрацию газовыделений в свинооткормочниках за счёт интенсивного перемешивания воздуха помещений, что удовлетворительно сказывается на микроклимате помещений.

*Ключевые слова:* животноводство, общеобменная вентиляция, вентсистема, производительность, расчет

## CALCULATION OF GENERAL VARIABLE VENTILATION FOR EQUIPMENT OF HARMFUL GASES IN FARMS

A.I. Yeremkin, S.V. Bakanova

The calculation of general exchange ventilation in livestock buildings is consider. Formulas for determining the amount of fresh air that must be supplied by ventilation units with unsteady and steady-state ventilation modes are obtained. The proposed method allows to reduce the concentration of gassing in the pig farms due to the intensive mixing of indoor air which has a satisfactory effect on the microclimate of the premises.

*Keywords:* animal husbandry, general ventilation, ventilation system, productivity, calculation

Концепцией долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации поставлена задача обеспечения потребностей населения продукцией животноводства за счёт отечественного производства, повышения конкурентоспособности, эффективного импортозамещения. Предусматривается, что к 2020 году Россия может выйти на уровень душевого потребления мяса, соответствующий рекомендуемой рациональной норме. Потребление мяса будет практически полностью удовлетворяться за счёт собственного производства. В частности, рост производства продуктов свиноводства предусматривается за счёт не только увеличения поголовья животных, но и главным образом повышения рентабельности, продуктивности и применения новейших технологий.

В настоящее время появились крупные производители, крупные животноводческие комплексы. В закрытых помещениях размещают несколько тысяч свиней. Разведение,

кормление и содержание свиней достигло такой степени развития, что микроклимат в этих помещениях становится одним из важнейших факторов дальнейшего успешного роста продуктивности этой отрасли производства.

Влияние микроклимата на животный организм складывается из совокупности воздействия факторов внешней среды. Основные из них: температура, влажность, скорость движения и химический состав воздуха, радиационное тепло, солнечная радиация [1, 2].

Ниже рассматривается один из факторов – выделение вредных газов в животноводческих помещениях и расчёт воздухообмена на их разбавление. Так, при несоблюдении правил воздухообмена в свинарнике повышаются концентрации углекислоты, аммиачных соединений и сероводорода. Превышение показателей аммиачных примесей в свинарнике приводит к болезням органов дыхания у животных, отёку лёгких [2].

Обеспечить поступление воздуха позволяет эффективная вентиляция, которая очищает свинарник от вредных газовых примесей, запылённости и бактерий.

Для поддержания необходимого газового состава воздуха в помещении справедливо использовать формулу

$$L = \frac{G}{C_{\text{доп}} - C_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где  $G$  – масса газов, поступающих в помещение, кг/с;  $C_{\text{доп}}$  – допустимая концентрация газа в воздухе помещения, кг/м<sup>3</sup>;  $C_{\text{пр}}$  – концентрация газа в приточном воздухе, кг/м<sup>3</sup>.

В животноводческих помещениях происходит непрерывное газовыделение (аммиак, углекислый газ, сероводород и др). Удалить вредные газы из помещения откормочника можно лишь при условии, что воздух будет перемещаться со скоростью, способствующей эффективному перемешиванию воздушных масс, т.е. со скоростью турбулентной диффузии.

Рассмотрим дифференциальное уравнение процесса вентилирования помещения свинооткормочника, основываясь на следующих соображениях.

За элементарный отрезок времени в помещении произойдет следующий аэродинамический процесс:

- 1) выделяется количество вредного газа, кг,

$$Gd\tau, \quad (2)$$

где  $\tau$  – время, с;

- 2) приточным воздухом будет внесено в помещение количество данного газа, кг,

$$C_{\text{пр}}L_{\text{пом}}\frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{пр}}}d\tau, \quad (3)$$

где  $L_{\text{пом}}$  – общее количество приточного воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $T_{\text{н}}$ ,  $T_{\text{пр}}$  – температура наружного и приточного воздуха, К;

- 3) вытяжным воздухом будет удалено из помещения количество газа, кг,

$$CL_{\text{пом}}K_3\frac{T_{\text{уд}}}{T_{\text{пр}}}dt, \quad (4)$$

где  $C$  – средняя концентрация газа в помещении в данный момент времени, кг/м<sup>3</sup>;  $K_3$  – коэффициент турбулентной диффузии частично загазованных струй;  $T_{\text{уд}}$  – температура воздуха, удаляемого из помещения, °С.

В свою очередь, известно:

$$K_3 = K_0 + (1 - K_0)\frac{C_{\text{пр}}}{C}, \quad (5)$$

где  $K_0 = 0,8-1,0$  – коэффициент турбулентной диффузии незагазованных 2-3 и более струй, подаваемых одновременно;

4) в объеме помещения изменится количество газа на величину, кг,

$$Vdc, \quad (6)$$

где  $V$  – внутренний объем помещения, м<sup>3</sup>.

Разность между количеством газа, удаляемого из помещения за время  $d\tau$ , и количеством газа, добавившегося в объеме помещения за это же время, должно равняться изменению количества газа в объеме помещения, т.е.

$$Gd\tau + C_{\text{пр}}L_{\text{пом}} \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{пр}}} d\tau - cL_{\text{пом}}K_3 \frac{T_{\text{уд}}}{T_{\text{пр}}} d\tau = Vdc. \quad (7)$$

Подставляя сюда значение  $K_3$  из (5), имеем

$$Gd\tau + C_{\text{пр}}L_{\text{пом}} \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{пр}}} d\tau - [cL_{\text{пом}}K_0 \frac{T_{\text{уд}}}{T_{\text{пр}}} + C_{\text{пр}}L_{\text{пом}} \frac{T_{\text{уд}}}{T_{\text{пр}}}(1 - K_0)]d\tau = Vdc. \quad (8)$$

Последнее уравнение представим в следующем виде:

$$Gd\tau + C_{\text{пр}}L_{\text{пом}} \left[ \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{пр}}} - \frac{T_{\text{уд}}}{T_{\text{пр}}}(1 - K_0) \right] d\tau - cL_{\text{пом}}K_0 \frac{T_{\text{уд}}}{T_{\text{пр}}} d\tau = Vdc, \quad (9)$$

или

$$\frac{dc}{d\tau} + \frac{cL_{\text{пом}}K_0T_{\text{уд}}}{VT_{\text{пр}}} = \frac{G + C_{\text{пр}}L_{\text{пом}} \left[ \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{пр}}} - \frac{T_{\text{уд}}}{T_{\text{пр}}}(1 - K_0) \right]}{V}. \quad (10)$$

Введем обозначения:

$$\frac{K_0T_{\text{уд}}}{VT_{\text{пр}}} = J_1, \text{ кг}/(\text{ч} \cdot \text{м}^3), \quad (11)$$

$$\frac{G}{V} = J_2, \text{ кг}/(\text{ч} \cdot \text{м}^3), \quad (12)$$

$$\frac{C_{\text{пр}} \left[ \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{пр}}} - \frac{T_{\text{уд}}}{T_{\text{пр}}}(1 - K_0) \right]}{V} = J_3, \text{ кг}/(\text{ч} \cdot \text{м}^3). \quad (13)$$

Тогда уравнение (10) перепишем так

$$\frac{dc}{d\tau} + J_1L_{\text{пом}}C = J_2 + J_3L_{\text{пом}}. \quad (14)$$

Проинтегрировав уравнение (14), получим:

$$C = Ge^{-J_1L_{\text{пом}}\tau} + \frac{J_2 + J_3L_{\text{пом}}}{J_1L_{\text{пом}}}. \quad (15)$$

Из начального условия  $C = C_0$  при  $\tau = 0$  находим постоянную интегрирования

$$G = C_0 - \frac{J_2 + J_3L_{\text{пом}}}{J_1L_{\text{пом}}}. \quad (16)$$

Подставляя значение  $C$  в уравнение (15), имеем

$$C = \frac{J_2 + J_3 L_{\text{пом}}}{J_1 L_{\text{пом}}} + e^{-J_1 L_{\text{пом}} \tau} \left( C_0 - \frac{J_2 + J_3 L_{\text{пом}}}{J_1 L_{\text{пом}}} \right). \quad (17)$$

Откуда

$$e^{J_1 L_{\text{пом}} \tau} = \frac{C_0 - \frac{J_2 + J_3 L_{\text{пом}}}{J_1 L_{\text{пом}}}}{C - \frac{J_2 + J_3 L_{\text{пом}}}{J_1 L_{\text{пом}}}}. \quad (18)$$

Разложим полученную показательную функцию в ряд Маклорена и примем сумму первых двух членов, т.е.

$$e^{J_1 L_{\text{пом}} \tau} = 1 + J_1 L_{\text{пом}} \tau. \quad (19)$$

Приравниваем первую часть равенства (19) правой части равенства (17)

$$1 + J_1 L_{\text{пом}} \tau = \frac{C_0 - \frac{J_2 + J_3 L_{\text{пом}}}{J_1 L_{\text{пом}}}}{C - \frac{J_2 + J_3 L_{\text{пом}}}{J_1 L_{\text{пом}}}}. \quad (20)$$

Откуда получаем:

$$L_{\text{пом}} = \frac{J_2 \tau (C_0 - C)}{(J_1 C - J_3) \tau}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (21)$$

Подставив сюда значение величин из (11), (12) и (13), окончательно получим:

$$L_{\text{пом}} = \frac{[G\tau + V(C_0 - C)] T_{\text{пр}}}{K_0 T_{\text{уд}} C \tau - C_{\text{пр}} [T_{\text{н}} - T_{\text{уд}} (1 - K_0)] \tau}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (22)$$

Таким образом, можно считать, что изменение концентрации газа в помещении в зависимости от времени работы вентиляции при данной количественной подаче приточного воздуха выражается уравнением (17). Полученная формула (22) позволяет рассчитывать общее количество воздуха, которое необходимо подавать в помещение вентиляционными установками при неустановившемся режиме вентиляции.

Обычно применяется установившийся режим вентиляции, при котором подается постоянное количество воздуха и поддерживается в помещении допустимая концентрация газа. Для этого случая количество газа, которое вносится в объем помещения, должно равняться количеству газа, которое выносится из этого объема, т.е.

$$G + C_{\text{пр}} L_{\text{пом}} \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{пр}}} = C L_{\text{пом}} K_0 \frac{T_{\text{уд}}}{T_{\text{пр}}} + C_{\text{пр}} L_{\text{пом}} \frac{T_{\text{уд}}}{T_{\text{пр}}} (1 - K_0). \quad (23)$$

Отсюда находим количество воздуха, которое необходимо подавать в помещение при установившемся режиме:

$$L_{\text{пом}} = \frac{C}{T_{\text{уд}} / T_{\text{пр}} [CK_0 + C_{\text{пр}} (1 - K_0)] - C_{\text{пр}} T_{\text{н}} / T_{\text{пр}}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (24)$$

В последнюю формулу необходимо подставить вместо  $C$  допустимую концентрацию газа  $C_{\text{доп}}$ .

На основании изложенного следует, что эффективная вентиляция является крупным резервом в повышении рентабельности свинооткормочных хозяйств. Предложенная методика расчёта воздухообмена в животноводческих помещениях позволит не только улучшить санитарно-гигиенические условия, но и даст существенный технико-экономический эффект, выражающийся в повышении продуктивности животных.

#### Список литературы

1. Нечаев, В.И. Развитие инновационных процессов в животноводстве / В.И. Нечаев, Е.И. Артёмов, С.М. Резниченко [и др.]. – Краснодар: Просвещение – Юг, 2007. – 277с.
2. Блинецов, А.В. Биологические и технологические аспекты интенсификации свиноводства / А.В. Блинецов – Уфа: БГАУ, 2001. – 93 с.

#### References

1. Nechaev, V.I. The development of innovative processes in animal husbandry / V.I. Nechaev, E.I. Artyomov, S.M. Reznichenko [et al.]. – Krasnodar: Enlightenment – South, 2007. – 277 p.
2. Bliznetsov, A.V. Biological and technological aspects of the intensification of pig breeding / A.V. Gemini – Ufa: BGAU, 2001. – 93 p.

УДК 66.045.13; 697.9

Вологодский государственный университет  
Россия, 160000, г. Вологда,  
ул. Ленина, д. 15/15,  
тел.: (8172) 72-46-45

**Монаркин Николай Николаевич,**  
старший преподаватель кафедры  
«Теплогазоснабжение и вентиляция»  
E-mail: nikolay-monarkin@yandex.ru

**Лукин Сергей Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор,  
исполняющий обязанности заведующего  
кафедрой «Теплогазоснабжение и  
вентиляция»  
E-mail: s.v.luk@yandex.ru

**Кочкин Александр Александрович,**  
доктор технических наук, доцент, декан  
инженерно-строительного факультета  
E-mail: aakochkin@mail.ru

Vologda State University  
Russia, 160000, Vologda, 15/15, Lenin St.,  
tel.: (8172) 72-46-45

**Monarkin Nikolay Nikolaevich,**  
Senior Teacher of the department «Heat and  
Gas Supply and Ventilation»  
E-mail: nikolay-monarkin@yandex.ru

**Lukin Sergey Vladimirovich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Acting Head of the department «Heat and Gas  
Supply and Ventilation»  
E-mail: s.v.luk@yandex.ru

**Kochkin Aleksandr Aleksandrovich,**  
Doctor of Sciences, Associate Professor,  
Dean of Civil Engineering Faculty  
E-mail: aakochkin@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАЦИОНАРНОГО ПЕРЕКЛЮЧАЮЩЕГОСЯ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА НА ЕГО ТЕПЛОВУЮ И АЭРОДИНАМИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Н.Н. Монаркин, С.В. Лукин, А.А. Кочкин

Произведено сравнение тепловой и аэродинамической эффективности двух конфигураций регенеративной насадки, используемой в регенеративном теплоутилизаторе, применяемом для вентиляции помещений. Рассмотрено влияние изменения диаметра канала насадки, длины насадки и времени этапа на тепловую эффективность насадки, ее аэродинамическое сопротивление и требуемую мощность вентилятора.

*Ключевые слова:* регенеративный теплоутилизатор, тепловая и аэродинамическая эффективность, регенеративная насадка, оптимизация

## INFLUENCE OF STRUCTURAL AND REGIME PARAMETERS OF STATIONARY SWITCHABLE REGENERATIVE HEAT EXCHANGER ON THERMAL AND AERODYNAMIC EFFICIENCY

N.N. Monarkin, S.V. Lukin, A.A. Kochkin

The article is devoted to the comparison of the thermal and aerodynamic efficiency of two configurations of a regenerative adapter used in the regenerative heat exchanger for ventilation. The influence of changes in the diameter of the adapter channel, the length of the adapter and the stage time on the thermal efficiency of the adapter, its aerodynamic resistance and the required fan power is analyzed.

*Keywords:* regenerative heat exchanger, thermal and aerodynamic efficiency, regenerative adapter, optimization

**Введение.** В вентиляции применяются стационарные переключающиеся регенеративные теплоутилизаторы (СПРТ). СПРТ представляет собой компактное устройство, позволяющее утилизировать теплоту вытяжного воздуха [1]. Для побуждения движения воздуха используется реверсивный вентилятор. Теплообменный элемент (насадка) представляет собой пучок каналов малых размеров поперечного сечения.

Целью исследования является решение оптимизационной задачи. При заданной площади поперечного сечения (заданный диаметр насадки) и заданном расходе воздуха  $V$  требуется определить диаметр единичного канала  $d$ , длину насадки  $L$ , длительность этапов регенерации и аккумуляции тепловой энергии, при которых насадка будет работать достаточно эффективно и с наименьшим аэродинамическим сопротивлением.

**Основная часть.** В статье [2] показана схема регенеративной насадки СПРТ (рис. 1 и 2) и предложена математическая модель процессов теплообмена в единичном канале насадки. Решение математической модели позволяет находить поля температуры насадки и воздуха в зависимости от координаты  $z$  и времени  $\tau$ :  $T_n(z, \tau)$ ,  $T_b(z, \tau)$ . Предложенная математическая модель реализована с помощью программного пакета Matlab.

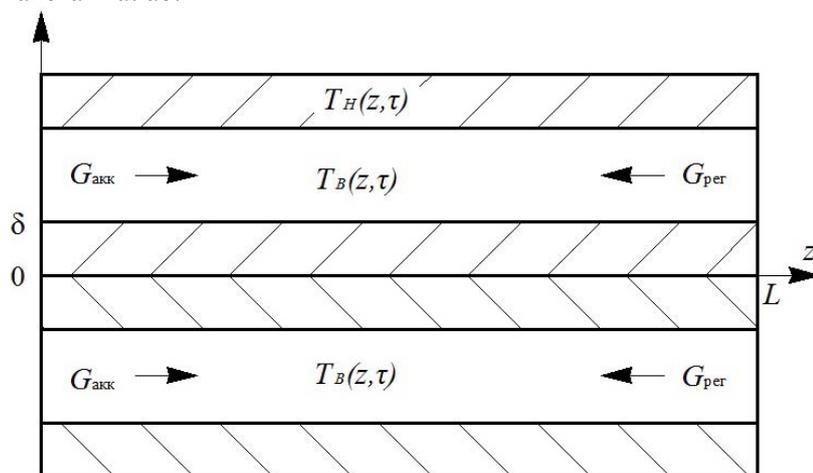


Рис. 1. Схема соседних каналов регенеративной насадки СПРТ:  $\delta$  – толщина стенки канала;  $G_{акк}$  и  $G_{рег}$  – массовый расход воздуха на этапах аккумуляции и регенерации теплоты

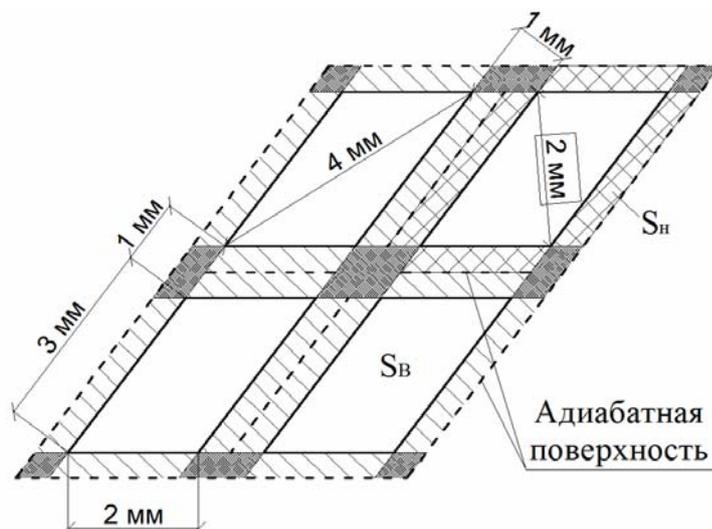


Рис. 2. Поперечное сечение 4 соседних каналов насадки:  $S_n$  и  $S_b$  – площади поперечного сечения насадки и канала для прохода воздуха

Для оценки эффективности насадки можно использовать следующие коэффициенты для этапов аккумуляции и регенерации:

$$E_{\text{акк}} = \frac{\delta T_1}{\Delta T_{\text{max}}}, E_{\text{рег}} = \frac{\delta T_2}{\Delta T_{\text{max}}}, \quad (1)$$

где  $\Delta T_{\text{max}} = (T_{\text{in}} - T_{\text{out}})$  – максимально возможное охлаждение или нагрев воздуха в насадке от температуры внутренней среды  $T_{\text{in}}$  до наружной  $T_{\text{out}}$ , °С;  $\delta T_1$  – охлаждение внутреннего воздуха в насадке в конце этапа аккумуляции, °С;  $\delta T_2$  – нагрев наружного воздуха в насадке в конце этапа регенерации, °С.

Изменение таких параметров, как диаметр каналов  $d$ , длина насадки  $L$ , длительность этапов регенерации и аккумуляции, повлечет изменение величин  $\delta T_1$  и  $\delta T_2$ .

Коэффициенты  $E_{\text{акк}}$  и  $E_{\text{рег}}$  не могут быть больше 1, но, например, когда расход воздуха большой, или площадь теплообмена небольшая, или длительности этапов аккумуляции и регенерации  $\tau_{\text{акк}}, \tau_{\text{рег}}$  большие, эти коэффициенты могут быть существенно меньше единицы. Например, если  $E_{\text{акк}} = 0,5$ , это значит, что в конце этапа аккумуляции внутренний воздух отдает регенератору только половину своей теплоты от максимально возможной. Работу регенератора можно считать достаточно эффективной, если  $E_{\text{акк}} \geq 0,9$ , и  $E_{\text{рег}} \geq 0,9$ , то есть более 90 % теплоты внутреннего воздуха утилизируется в регенераторе в течение всего процесса.

Диаметр насадки регенератора ограничивается конструктивными и дизайнерскими соображениями. Однако длина имеющегося опытного образца имеет запас на увеличение, если исходить из средней толщины стен зданий в России. Сохранение постоянным диаметра насадки будет причиной уменьшения количества каналов в насадке при увеличении диаметра единичного канала. При увеличении диаметра канала  $d$  уменьшается суммарная площадь теплообмена в насадке регенератора, и коэффициенты  $E_{\text{акк}}$  и  $E_{\text{рег}}$  при той же длительности  $\tau_{\text{акк}}, \tau_{\text{рег}}$  начнут в какой-то момент времени снижаться. Чтобы не допустить этого, можно одновременно уменьшать длительности  $\tau_{\text{акк}}, \tau_{\text{рег}}$ . Тогда каждому диаметру канала  $d$  будет соответствовать свое время  $\tau_{\text{акк}} = \tau_{\text{рег}}$ , при котором сохраняется эффективность регенератора.

В табл. 1 приведены результаты сравнения двух конфигураций насадки, отличающихся размером единичного канала  $d$ , при этом толщина стенки между каналами сохраняется постоянной. Сравнение проводилось при изменении длины насадки и времени одного этапа аккумуляции (регенерации) тепловой энергии.

Т а б л и ц а 1

Сравнение коэффициентов эффективности при разных длинах канала, диаметрах канала и времени этапа

Длина насадки, м	Время этапа, сек	Коэффициенты эффективности при диаметре канала, м			
		$d_1=0,0016$		$d_2=0,004$	
		$E_{\text{акк}}$	$E_{\text{рег}}$	$E_{\text{акк}}$	$E_{\text{рег}}$
$L_1=0,2$	20	0,8777	0,9502	0,7937	0,8457
$L_1=0,2$	40	0,8804	0,9350	0,7916	0,8290
$L_1=0,2$	60	0,8845	0,9200	0,7904	0,8120
$L_2=0,64$	20	0,8935	0,9840	0,8692	0,9486
$L_2=0,64$	40	0,8940	0,9788	0,8698	0,9415
$L_2=0,64$	60	0,8948	0,9730	0,8705	0,9347

По данным табл. 1 построены графики, приведенные на рис. 3.

По табл. 1 и рис. 3 можно сделать следующие выводы:

1. При увеличении длины канала (насадки) и сохранении диаметра канала увеличиваются коэффициенты эффективности  $E_{\text{акк}}$  и  $E_{\text{рег}}$ . При этом по рис. 1 видно, что графики, соответствующие большей длине канала, находятся преимущественно в

верхней части координатной плоскости, что позволяет сделать вывод о благоприятном влиянии увеличения длины канала на тепловую эффективность насадки.

2. Увеличение диаметра канала ведет к снижению коэффициентов эффективности  $E_{акк}$  и  $E_{рег}$  независимо от времени этапа и длины канала.

3. Увеличение времени этапа аккумуляции (регенерации) вызывает снижение регенеративной способности насадки ( $E_{рег}$ ) для обоих диаметров и длин канала. При этом аккумуляционная способность ( $E_{акк}$ ) насадки при росте времени этапа увеличивается во всех случаях, кроме того, когда длина  $L=0,2$  м, диаметр  $d_2=0,004$  м.

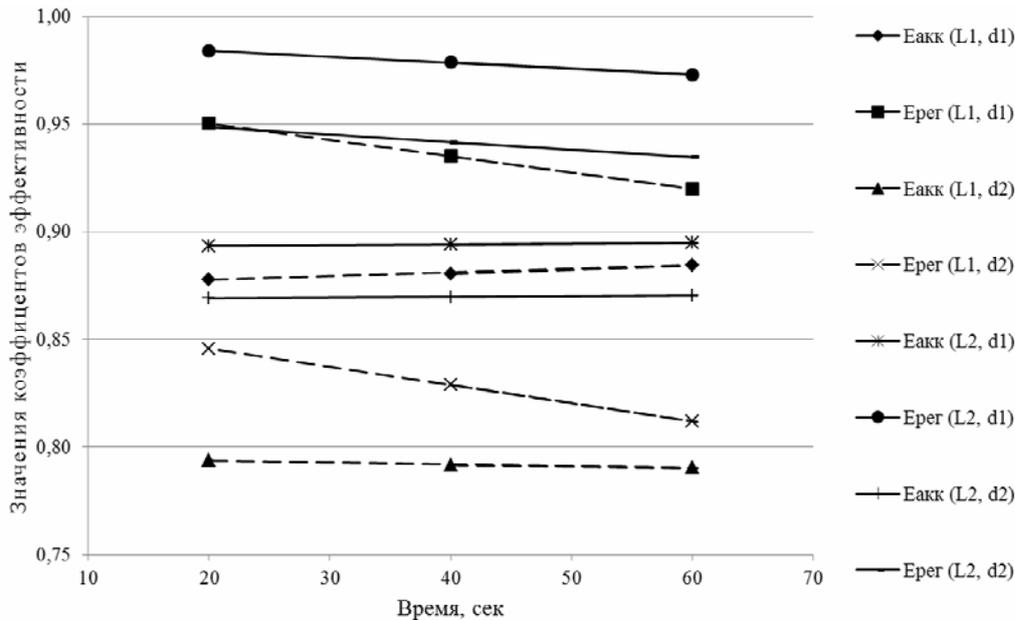


Рис. 3. Сравнение коэффициентов эффективности при разных длинах канала, диаметрах канала и времени этапа

Необходимо отметить, что в перспективе удобнее оперировать средними за цикл коэффициентами  $E_{рег}$  и  $E_{акк}$ , и они будут выше коэффициентов, определяемых в конце этапов аккумуляции и регенерации. Вообще, средние значения  $E_{рег}$  и  $E_{акк}$  должны быть равны друг другу, и это будет просто коэффициент тепловой эффективности регенератора  $E$ . Тогда количество теплоты, утилизированной регенератором, можно определить следующим образом:

$$Q = E \cdot c \cdot V (t_{вн} - t_{нар}), \text{ Вт}, \quad (2)$$

где  $V$  — объемный расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $c$  — теплоемкость воздуха,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $t_{вн}$  и  $t_{нар}$  — внутренняя и наружная температуры воздуха,  $^\circ\text{C}$ .

Для регенератора важным показателем является расход электроэнергии на вентилятор, который можно оценить выражением

$$N = \frac{V \cdot \Delta p_{сумм}}{\eta}, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где  $\eta$  — КПД вентилятора;  $\Delta p_{сумм}$  — суммарные потери давления в регенераторе, Па.

Основным элементом, создающим сопротивление прохождению воздуха в регенераторе, является насадка. Так как регенератор переключающегося типа, то вход воздуха в каналы насадки осуществляется с разных сторон в зависимости от этапа. Поэтому можно считать, что суммарные потери давления в насадке ( $\Delta p_{сумм}$ ) состоят из потерь на входе в канал ( $\Delta p_{вх}$ ) и потерь на трение в канале ( $\Delta p_{тр}$ ):

$$\Delta p_{сумм} = \Delta p_{вх} + \Delta p_{тр}, \text{ Па}. \quad (4)$$

Так как каналы насадки идентичны и параллельны друг другу, то для определения суммарных потерь давления в насадке достаточно определить потери в единичном канале.

Потери давления на трение в канале можно оценить выражением

$$\Delta p_{\text{тр}} = \xi \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}, \text{ Па}, \quad (5)$$

где для ламинарного режима течения коэффициент  $\xi$  определяется формулой

$$\xi = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64}{\frac{w \cdot d}{\mu/\rho}} = \frac{64 \cdot \mu}{w \cdot d \cdot \rho}. \quad (6)$$

Если выражение для  $\xi$  подставить в формулу для  $\Delta p$ , получится

$$\Delta p_{\text{тр}} = \frac{64 \cdot \mu}{w \cdot d \cdot \rho} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} = \frac{32 \cdot L \cdot \mu \cdot w}{d^2}, \text{ Па}, \quad (7)$$

где скорость воздуха в канале определяется для средней плотности воздуха при температуре  $T_{\text{ср}} = (T_{\text{in}} + T_{\text{out}})/2$ .

Примем, что скорость движения воздуха в помещении достаточно мала, тогда потеря давления при входе воздуха в канал будет равна одному скоростному (динамическому) давлению. То есть коэффициент местного сопротивления входа будет равен 1. Тогда

$$\Delta p_{\text{сумм}} = \Delta p_{\text{вх}} + \Delta p_{\text{тр}} = \frac{\rho \cdot w^2}{2} + \frac{32 \cdot L \cdot \mu \cdot w}{d^2}, \text{ Па}. \quad (8)$$

Т а б л и ц а 2

Сравнение потерь давления и мощностей вентилятора при разных длинах и диаметрах канала

Длина насадки, м	Потери давления $\Delta p_{\text{сумм}}$ , Па		Мощность вентилятора $N$ , Вт	
	при диаметре канала, м			
	$d_1=0,0016$	$d_2=0,004$	$d_1=0,0016$	$d_2=0,004$
0,2	27,2	3,0	0,261	0,028
0,64	86,6	9,3	0,829	0,089

Расчет потерь давления и мощности вентилятора выполнен при расходе воздуха  $V=0,00861 \text{ м}^3/\text{с}$ , скорости воздуха в единичном канале составляли  $w_1=0,62$ ,  $w_2=0,41$ .

Из табл. 2 следует:

1) увеличение диаметра в 2,5 раза снижает потери давления и требуемую мощность вентилятора примерно в 9,5 раза;

2) увеличение длины канала с 0,2 до 0,64 м (в 3,2 раза) при постоянном диаметре увеличивает потери давления и требуемую мощность вентилятора примерно в 3,2 раза.

Т а б л и ц а 3

Потери давления в регенеративной насадке

Длина насадки, м	Потери давления, Па					
	на входе $\Delta p_{\text{вх}}$		на трение $\Delta p_{\text{тр}}$		суммарные $\Delta p_{\text{сумм}}$	
	при диаметре канала, м					
	$d_1=0,0016$	$d_2=0,004$	$d_1=0,0016$	$d_2=0,004$	$d_1=0,0016$	$d_2=0,004$
0,2	0,242	0,107	27,0	2,9	27,2	3,0
0,64	0,242	0,107	86,4	9,2	86,6	9,3

По табл. 3 можно сделать вывод, что потери давления на входе воздуха в каналы насадки крайне малы по сравнению с потерями на трение. Поэтому ими можно пренебрегать в дальнейшем.

При этом из формулы (7) видно, что  $\Delta p_{\text{тр}} \sim \frac{1}{d^2}$ , тогда как коэффициент теплоотдачи  $\alpha \sim \frac{1}{d}$ . То есть при уменьшении диаметра канала потери давления растут гораздо быстрее, чем увеличивается коэффициент теплоотдачи.

**Заключение.** В итоге можно сделать следующий вывод. Увеличение диаметра единичного канала приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи, к снижению скорости воздуха (при том же расходе) и к резкому снижению потерь давления. Увеличение длины насадки регенератора практически прямо пропорционально увеличивает потери давления, однако значительно повышает коэффициенты тепловой эффективности  $E_{\text{рег}}$  и  $E_{\text{акк}}$ . Поэтому для достижения максимальной тепловой эффективности регенератора целесообразно увеличивать длину насадки, при этом увеличение диаметра канала может применяться как способ снижения аэродинамического сопротивления насадки и, как следствие, снижения требуемой мощности вентилятора.

В общем случае оптимизацию параметров регенератора нужно проводить по экономическому или энергетическому критериям. Экономический критерий – это экономия денежных затрат на отопление при наличии регенератора за вычетом стоимости электроэнергии, потребленной вентилятором. Энергетический критерий – экономия тепловой энергии на отопление за вычетом энергетических затрат на производство и транспорт электроэнергии, потребленной вентилятором. Оптимальные параметры регенератора должны соответствовать максимуму энергетического или экономического критерия.

#### Список литературы

1. Синицын, А.А. Теоретические исследования по выбору регенеративной насадки в энергосберегающих устройствах для вентиляции помещений / А.А. Синицын, Н.Н. Монаркин, Т.В. Рогулина // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы девятой международной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГУ, 2014. – С. 202–205.
2. Монаркин, Н.Н. Математическая модель теплообмена в тонкостенном регенераторе / Н.Н. Монаркин, С.В. Лукин, А.А. Кочкин // Приволжский научный журнал. – 2018. – №3(47). – С. 57–62.

#### References

1. Sinitcyn, A.A. Theoretical studies on the choice of the regenerative adapter in energy-saving devices for ventilation / A.A. Sinitcyn, N.N. Monarkin, T.V. Rogulina // Automation and energy saving of machine-building and metallurgical production, technology and reliability of machines, devices and equipment: materials of the ninth international scientific and technical conference. – Vologda: VoGU, 2014. – P. 202 – 205.
2. Monarkin, N.N. Mathematical model of heat transfer in thin-walled regenerator / N.N. Monarkin, S.V. Lukin, A.A. Kochkin // The Privolzhsky scientific journal. – 2018. – №3(47). – P. 57–62.

УДК 728.37

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,  
и.о. 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

## ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ ЖИЛОГО ИНДИВИДУАЛЬНОГО ДОМА

Л.А. Васин

Разработан вариант создания информационно-управляющей системы для жилого помещения, обеспечивающей поддержание микроклимата, управляющей водоснабжением, электросистемой и охраной. Сформулированы основные функции, выполняемые системой управления, и требования, предъявляемые к подобным системам.

Показаны подходы к созданию управляющей системы, и определены системные платформы и программное обеспечение, необходимое для разработки системы управления жилыми помещениями. Рассмотрено использование аппаратных платформ на основе открытых проектов. Проведен анализ аппаратных платформ, и осуществлен выбор одной из них для использования в системах управления инженерными системами. Показано формирование системы управления на основе открытых аппаратных платформ.

Определен необходимый состав системной архитектуры для управления исполнительными механизмами систем контроля основных инженерных параметров. Дана оценка использования операционных систем класса «Open Source» в качестве управляющих структур инженерных систем. Предложен принцип управления смарт-системой, основанный на принятии самостоятельных решений. Показан вариант пользовательского интерфейса.

*Ключевые слова:* строительство, инженерные системы, умный дом, системы управления, системная архитектура, операционная система, интерфейс управления

## APPROACH TO THE CREATION OF THE INFORMATION MANAGEMENT SYSTEM FOR AUTOMATION OF ENGINEERING SYSTEMS OF A INDIVIDUAL RESIDENTIAL HOUSE

L.A. Vasin

An option has been developed to create an information management system for residential premises that manages engineering systems for maintaining microclimate, water supply, electrical system management and security. Formulated the main functions performed by the control system and the requirements for such systems.

The approaches to the creation of the control system are shown and the system platforms and software necessary for the development of a residential management system are defined. Considered the use of hardware platforms based on open source projects. The analysis of hardware platforms was carried out and it was selected for use in engineering systems management systems. The formation of a control system based on open hardware building platforms is shown.

The necessary composition of the system architecture for controlling the actuating mechanisms of the monitoring systems of the main engineering parameters has been determined. An assessment is

made of the use of Open Source-class operating systems as control structures in engineering systems. The principle of managing a smart system based on making independent decisions is proposed. The user interface option is shown.

*Keywords: construction, engineering systems, smart home, control systems, system architecture, operating system, control interface*

### **Введение**

Важным аспектом при проектировании жилых зданий является обеспечение комфортных и безопасных условий проживания или пребывания людей. Это является важным показателем при осуществлении выбора подходящего жилья заказчиком. Такие условия, соответствующие всем строительным и санитарным нормам в течение всего срока эксплуатации жилого здания, являются наиболее привлекательными как с точки зрения инвестора строительства, так и при его выборе покупателем.

Увеличение стоимости энергетических ресурсов, а также коммунальных услуг заставляет переходить на полный учет потребления услуг и ресурсов, задумываться о необходимости оптимизации таких расходов. Это возможно при оптимальном потреблении ресурсов, которые необходимы для поддержания комфортного микроклимата жилых помещений. Такая возможность осуществима только при использовании интеллектуальных инженерных систем, управляемых автоматизированной системой, регулирующей инженерную инфраструктуру. В нее входят инженерные системы зданий, которые являются совокупностью технических решений, обеспечивающих нормальную жизнедеятельность потребителей. К ним относятся следующие категории систем:

- теплоснабжение (тепловые сети, отопительные элементы и тепловые котлы);
- водоснабжение и канализация (системы трубопроводов и водоводов);
- электроснабжение и энергопотребление (кабельные линии, распределительные устройства, системы защиты, а также молниезащита и заземление);
- освещение (осветительные элементы индивидуального и коллективного использования);
- вентиляция (кондиционеры, воздуховоды, воздушные насосы, фильтрующие элементы);
- газоснабжение (газовые приборы, трубопроводы низкого давления, а так же запорные элементы);
- охранная и пожарная сигнализация (противопожарные датчики, видеоэлементы, кабельные системы и сигнализирующие устройства, а также места хранения видеоданных).

Управление инженерными системами осуществляется с автоматизированных систем управления. Здание, оборудованное такой системой, получило название «Умный дом». Под этим термином подразумевается смарт-система ресурсоуправления и безопасности. Преимущества использования смарт-системы заключаются в следующем:

- экономическая эффективность использования энергетических ресурсов;
- возможность эффективного управления устройствами, которыми оборудовано жилое помещение;
- безопасность жилого помещения и здания, обеспечиваемая с помощью систем видеонаблюдения и охраны;
- простота в эксплуатации, позволяющая управлять системой с помощью простого пользовательского интерфейса.

Сценарий использования системы «Умный дом» для автоматизации управления жилым зданием, например загородным домом, выглядит следующим образом. Основным направлением автоматизации является создание комфортных условий жизнеобеспечения и безопасности. Это обеспечивается системами вентиляции, отопления и освещения. Установка датчиков влажности и температуры позволяет сформировать необходимый объем данных, предназначенных для обработки устройством управления, на основании которых производится анализ комфортных условий. Повышение или понижение температуры производится системой регулируемого отопления,

которая может быть выполнена в двух вариантах: электрическая или водяная. В первом варианте используются электрические нагревательные элементы, второй вариант ориентирован на использование нагревательного котла. Любой из них может быть регулируемым с помощью автоматизированной системы отопления. Параметры теплоносителя в трубопроводе отслеживаются с помощью датчиков давления и температуры. Для управления потоком используются шаровые краны с электроприводом. Регулировкой подачи энергии на электрические тепловые элементы производится оптимизация температуры. С помощью датчиков влажности поддерживается оптимальное состояние влажности воздуха.

Автоматическое управление системами освещения позволяет оптимизировать уровень освещенности по данным, поступающим с датчиков, установленных в жилых помещениях. Использование энергосберегающих осветительных приборов в совокупности со сценарием освещенности, необходимой в разных ситуациях, позволяет сократить расходы потребления электроэнергии.

Обеспечение безопасности проживания обеспечивается системами охраны, контроля доступа и видеонаблюдения. В ней видеокамеры и охранные датчики полностью перекрывают весь периметр охраняемой территории, а также внутреннее пространство жилого помещения.

Основной принцип в построении смарт-системы управления жилым помещением заключается в использовании автоматизированного принципа управления, когда все системы, относящиеся к инженерным, должны быть регулируемы. Это подразумевает наличие исполнительных устройств, позволяющих изменять подачу электро-, теплоэнергии и газа на основании значений, предусмотренных для создания необходимых для нормального нахождения людей микроклиматических параметров. Управление исполнительными механизмами регулирующих устройств производится единым управляющим центром, выполненным на основе микропроцессорных устройств по заранее заложенной программе.

Современное развитие информационных технологий позволяет создать центр управления на основе высокопроизводительных устройств, работающих под управлением качественной операционной системы и обеспечивающих простоту использования непрофессиональными пользователями.

### **Основная часть**

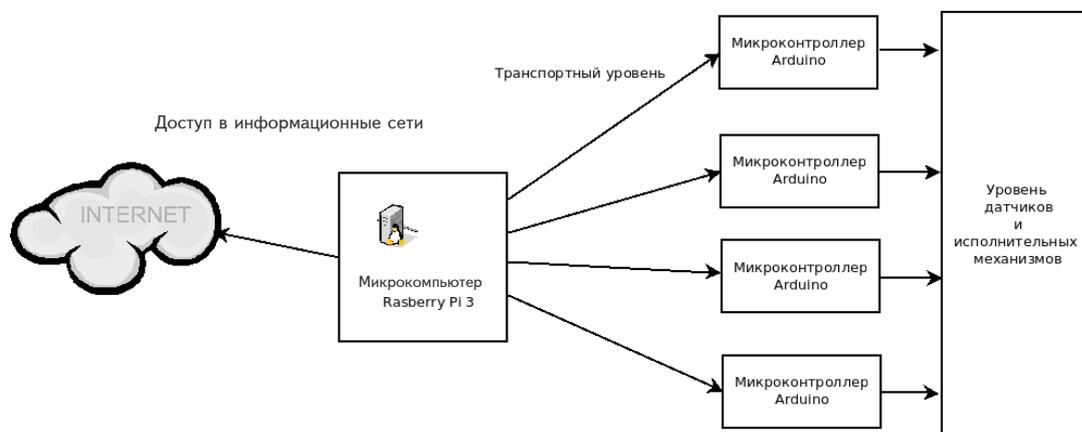
Концептуальная организация системы управления основана на использовании автоматизированного центра управления и контроля. Главной его задачей является управление различными компонентами, входящими в смарт-систему. Управление строится по принципу самостоятельности, которая базируется на существующих нормах комфортного и безопасного проживания людей. Центр управления принимает те или иные решения на основе заложенной программы, а также анализа данных с датчиков. В первом случае необходимые функциональные параметры человек задает вручную, как системные константы. При использовании принципа обратной связи управляющий центр принимает решения самостоятельно, без участия человека [1].

Автоматизированная система управления инженерными системами жилого здания представляет собой информационно-вычислительный комплекс, обрабатывающий данные от контрольных датчиков и производящий управление регулирующих элементов исполнительных устройств. Автоматизированные системы управления строятся как централизованные, с центральным контроллером, и децентрализованные, состоящие из распределенной сети контроллеров, каждый из которых выполняет строго ограниченные функции. В любом из типов построения системы главной частью является контроллер. Его основная задача – реализовать принцип программного управления. Программное управление контроллера обеспечивает выполнение следующих действий:

- сбор данных, поступающих с датчиков;
- анализ данных на основе заложенных алгоритмов;

- выдача управляющего сигнала на исполнительные механизмы регулирующих систем.

Для системы «Умный дом» применяются многофункциональные контроллеры, логика работы и состав периферийного оборудования которых определены заранее [2]. Более перспективным является использование микроконтроллеров с возможностью расширения состава дополнительного оборудования. Структурная схема управляющего центра приведена на рисунке.



Структурная схема центра управления инженерными системами

Его основу составляет микрокомпьютер, в который входит центральный процессор, модули памяти, порты ввода-вывода данных. Его задачей является управление по заложенной программе и взаимодействие с датчиками и регулирующими элементами, а также коммуникационные функции Ethernet, WiFi, 3G, 4G, LTE с внешней информационной сетью Интернет. По каналам передачи данных, использующим стандартные протоколы, осуществляется информационное взаимодействие с микроконтроллерами, которые ориентированы на выполнение строго определенных функций по взаимодействию с объектовыми датчиками. При этом организуются независимые каналы управления, не ограничивающиеся ресурсами центрального микрокомпьютера smart-системы [3]. Использование отдельных микроконтроллеров для связи с датчиками позволяет увеличивать их количество, обеспечивать физическое сопряжение электрических интерфейсов. При этом программирование микроконтроллеров производится в отдельном порядке и логика их работы может быть адаптирована для каждого датчика или исполнительного механизма. Такой принцип «распределённости» управляющих контроллеров позволяет организовать взаимосвязь со всеми датчиками с помощью одного стандартного протокола, сформировать транспортный уровень передачи данных на основе проводных или беспроводных технологий, тем самым обеспечив открытый интерфейс для дальнейшей модернизации или расширения системы.

Управляющие микроконтроллеры можно реализовывать несколькими способами: использованием специализированных решений, программная логика которых уже заложена производителем и не может быть расширена, и применением универсальных проектов, функционирующих под управлением универсального программного обеспечения [4].

Наибольшую популярность при построении различных систем управления получили открытые проекты микроконтроллера Arduino и микрокомпьютера Raspberry Pi. Arduino – это универсальный микроконтроллер, предназначенный для работы с цифровыми и аналоговыми устройствами через соответствующие входы и выходы, как проводными, так и беспроводными. Контроллер имеет низкое энергопотребление, разработка программного обеспечения не требует высокой квалификации, обладает возможностью перепрограммирования, функционирует без использования операционной системы. Применение данного контроллера позволяет создать единый транспортный уровень взаимодействия с датчиками и регулирующими устройствами.

Системные характеристики Arduino DUO следующие:

- микроконтроллер – AT91SAM3X8E;
- рабочее напряжение – 3,3 В;
- входное напряжение (рекомендуемое) – 7-12 В;
- входное напряжение (предельное) – 6-16 В;
- цифровые входные/выходные выводы – 54 (12 из которых поддерживают ШИМ);
- аналоговые входные выводы – 12;
- аналоговые выходные выводы – 2 (ЦАП);
- флеш-память – 512 Кбайт (вся доступна для пользовательских приложений);
- оперативная память SRAM – 96 Кбайт (два банка: 64 Кб и 32 Кб);
- тактовая частота – 84 МГц.

В качестве центра управления смарт-системы используется микрокомпьютер Raspberry Pi 3.

Системные характеристики:

- процессор: 64-битный 4-ядерный ARM Cortex-A53 с тактовой частотой 1,2 ГГц на однокристальном чипе Broadcom BCM2837;
- оперативная память: 1ГБ LPDDR2 SDRAM;
- цифровой видеовыход: HDMI;
- композитный выход: 3,5 мм (4 pin);
- USB порты: USB 2.0×4;
- сеть: WiFi 802.11n, 10/100 Мб RJ45 Ethernet;
- Bluetooth: Bluetooth 4.1, Bluetooth Low Energy;
- разъем дисплея: Display Serial Interface (DSI);
- разъем видекамеры: MIPI Camera Serial Interface (CSI-2);
- порты ввода-вывода: 40.

Такие системные характеристики позволяют данным устройства выступать в роли и периферийных контроллеров, и центрального главного контроллера системы. Такая система реализуется на основе принципа распределенных вычислений, позволяющих сделать систему управления «Умный дом» открытой, легко расширяемой, реконфигурируемой, с возможностью использования открытых программных разработок.

Программное обеспечение, используемое в системе, состоит из базовой операционной системы, устанавливаемой на микрокомпьютер, и прикладных программ, которые непосредственно управляют параметрами инженерных сетей. В качестве операционной системы перспективнее использовать Linux. Это открытая система, позволяющая спроектировать собственное программное обеспечение на основе набора открытого кода.

Важной программной частью является разработка интерфейса управления системы. Основной принцип его создания заключается в простоте управления необходимыми параметрами с помощью панели управления, на которой визуально отображается состояние системы в виде мнемосхем, графиков, цифр. С их помощью пользователь полностью производит контроль объекта. Панель управления должна быть доступна для использования с помощью удаленных средств: персональных компьютеров, планшетов, смартфонов. Центральное место интерфейса управления отдано визуализации различных показателей. Управляющие элементы группируются по боковым панелям. Необходимо предусмотреть возможность перехода между различными частями интерфейса управления, что удобнее выполнить на основании древовидной структуры меню. В обязательном порядке все действия системы должны записываться (логироваться) в специальной базе данных, в перспективе – в удаленном облачном хранилище. Это особенно актуально для безопасного хранения архива данных системы видеонаблюдения. Только в этом случае полностью исключается возможность полного уничтожения видеофиксации событий.

Существует два подхода в программной логике работы прикладного программного обеспечения управляющего микрокомпьютера: пользовательское управление, когда вручную формируются управляющие параметры и команды исполнительным устройствам (включение света, уменьшение температуры, включение подогрева и т.д.), и автономное (самостоятельное) управление – выдача команд на основании ситуации в жилом пространстве.

Логика работы при ручном управлении заключается в следующем. Пользователь задает параметры для регулировки, в пределах которых будет осуществляться управление исполнительными механизмами. Управление осветительными приборами, их включение и выключение производится вручную. Аналогично происходит управление охранными системами, а также системой видеонаблюдения. Смарт-система управляет микроклиматом, обеспечивает удаленный доступ, логирует свои действия и сообщает о своем состоянии пользователю. Система принимает решения на основе параметрических констант, например температуры и влажности комнат утром, днем, вечером.

Самостоятельный принцип управления базируется на интеллектуальном анализе поведенческого характера жильцов, ситуаций в жилом помещении, параметров климатических датчиков, датчиков присутствия, а также временных интервалов. В логику работы управляющей программы заложены различные ситуации, например нахождение людей в жилых помещениях в различное время бодрствования или сна, время суток, времена года и другие ситуации. На основании их анализа могут быть включены те или иные осветительные приборы, проводится регулирование микроклимата, включаются мультимедийные и охранные системы. Кроме этого, производится постоянное тестирование всего оборудования смарт-системы, а также каналов связи в сети Интернет.

#### Выводы:

1. Разработана структурная схема смарт-системы для управления инженерными системами жилого здания.
2. Определено аппаратное обеспечение, используемое в системе, приведены выполняемые функции.
3. Сформулирован принцип функционирования системы управления на основании принятия самостоятельных решений для управления инженерными системами.
4. Показана возможность использования открытого программного обеспечения для реализации программной составляющей системы.

#### Список литературы

1. Элсенпитер, Р.К. Умный Дом строим сами / Р.К. Элсенпитер, Т.Дж. Велт. – М.: Кудиц-образ, 2005. – 384 с.
2. Гололобов, В.Н. Умный дом своими руками / В.Н. Гололобов. – М.: НТ-Пресс, 2007. – 416 с.
3. Сопер, М.Э. Практические советы и решения по созданию «Умного дома» / М.Э. Сопер. – М.: НТ Пресс, 2007. – 432 с.
4. Вернер, Харке. Умный дом. Объединение в сеть бытовой техники и систем коммуникаций в жилищном строительстве / Харке Вернер. – М.: Техносфера РИЦ ЗАО, 2006. – 287 с.

#### Referances

1. Elsenpiter, R.K. We build a Smart House ourselves / R.K. Elsenpiter, T.J. Welt. – M.: Kudits- image, 2005. – 384 p.
2. Gololobov, V.N. Make yourself a smart house / V.N. Gololobov. – M.: NT-Press, 2007. – 416 p.
3. Soper M. Practical advice and solutions for creating a “smart home” / M. Soper. – M.: NT Press, 2007. – 432 p.
4. Werner, Harke. Smart House. Networking home appliances and communications systems in housing construction / Harke. Werner. – M.: Technosphere RIC CJSC, 2006. – 287 p.

# АРХИТЕКТУРА

# ARCHITECTURE

УДК 72.03 (470.40)

*Научно-исследовательский институт  
теории и истории архитектуры  
и градостроительства*

Россия, 111024, Москва,  
ул. Душинская, д. 9  
тел.: +7 (499) 951 82 72

**Нугманова Гульчачак Гилемхановна**,  
кандидат искусствоведения, ведущий  
научный сотрудник Отдела истории  
архитектуры и градостроительства  
Древнего мира и Средних веков

*Research Institute of theory and history of  
architecture and urban planning*

Russia, 111024, Moscow,  
9, Dushinskaya St.,  
tel: +7 (499) 951 82 72

**Nugmanova Gulchachak Golemanova**,  
Candidate of art history, leading researcher of  
the Department of history of architecture and  
urban planning of the Ancient world and the  
Middle ages

## ИМПЕРСКИЕ ОБРАЗЫ В ОБЛИКЕ ПАРАДНОГО ЦЕНТРА КАЗАНИ В XIX – НАЧАЛЕ XX ВЕКА\*

Г.Г. Нугманова

Статья посвящена архитектуре Казани – бывшей столицы Казанского ханства, присоединенного к Русскому государству в середине XVI века. Рассматривается формирование парадного центра города, его ключевых сооружений и ансамблей в период XIX – начала XX века. Сделан вывод о том, что востребованность классицизма в Казани на протяжении всего рассматриваемого времени обусловлена актуальностью идеи империи в наделенном особой ролью завоеванном регионе и сохранявшейся потребностью визуализировать ее архитектурными средствами.

*Ключевые слова: Казань, центр города, классицизм, имперская идея*

## IMPERIAL IMAGES IN THE PHYSIOGNOMY OF THE NINETEENTH – EARLY TWENTIETH CENTURY KAZAN CITY CENTER

G.G. Nugmanova

This article is dedicated the architecture of Kazan, the former capital of the Kazan Khanate, which was annexed by Russia in the middle of the 16th century. The formation of the main city center with its key structures and ensembles in 19th and early 20th century is considered. The article concluded that the relevance of the style of Classicism in the formation of the image of the Kazan city center throughout the period under review had been encouraged by the persistence of a concept of empire in the conquered region with a special role, and by the continued need to visualize it through architecture.

*Keywords: Kazan, city center, Classicism, the concept of empire*

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект «Архитектурно-градостроительный процесс в позднеимперской российской провинции (Казанское Поволжье, последняя треть XIX – начало XX века)» № 18-012-00338.

Казань, присоединенная к Русскому государству в 1552 г. в результате победы над Казанским ханством, в XIX веке воспринималась как символ основания Российской империи. Официальный взгляд на город как на центр завоеванного татарского государства и одновременно как «окно» России на Восток [1] сказался на наделении его особыми имперскими функциями – столица Казанской губернии стала еще и центром учебного, военного и судебного округов. Специфика Казани, связанная с ее исключительной ролью в истории и структуре Российской империи, нашла отражение в облике города, прежде всего – его главного парадного центра.

Центр Казани сложился в соответствии с регулярным планом 1768 г. за пределами кремля вдоль тянувшейся от кремлевской Спасской башни по гребню холма главной Воскресенской улицы и поперечной ей оси, связывавшей Гостиный двор XVII в. и Богородицкий монастырь, основанный вскоре после казанского завоевания. В европейской архитектурной культуре концепт империи устойчиво ассоциируется с классицизмом, формы которого восходят к Римской империи. Образы классического Рима воплощались в зданиях главных государственных учреждений и создавались в ключевых пространствах и значимых точках города.

Семантическая роль Богородицкого монастыря была связана с чудесным обретением иконы Казанской богородицы, ставшей покровительницей дома Романовых [2]. Ее явление на территории, относительно недавно присоединенной к России, а до того мусульманской, рассматривалось обществом и его элитой как важное свидетельство благословения этих деяний свыше. Собор, спроектированный по распоряжению Екатерины II, посетившей обитель в 1767 г., великим И. Е. Старовым, был заложен в 1798 г. в присутствии Павла I и Великого князя Александра. Последний, став императором, назначил на строительство ежегодную субсидию, отпускавшуюся из казны вплоть до его завершения в 1808 году. Задуманный в 1809–1810 гг. вокруг собора ансамбль с окруженной колоннадой овальной площадью отсылал к самому известному памятнику христианского мира – площади Святого Петра в Риме. По подобию собора Святого Петра, следуя прямому предписанию Павла I, проектировал Андрей Воронихин свой Казанский собор в Петербурге, в строительстве которого участвовал его ученик – Я.М. Шелковников, автор монастырского ансамбля в Казани. В 1810–1830-х гг. возвели лишь строения по северной дуге площади с настоятельским корпусом, кельями и церковью Николая Тульского, симметрично которому по другую сторону собора предполагалось аналогичное здание с новыми святыми воротами. Колоссальный, особенно по местным меркам, собор с массивным куполом и колонными портиками под треугольными фронтонами задал городской застройке подлинно имперский стиль и масштаб (рис. 1).

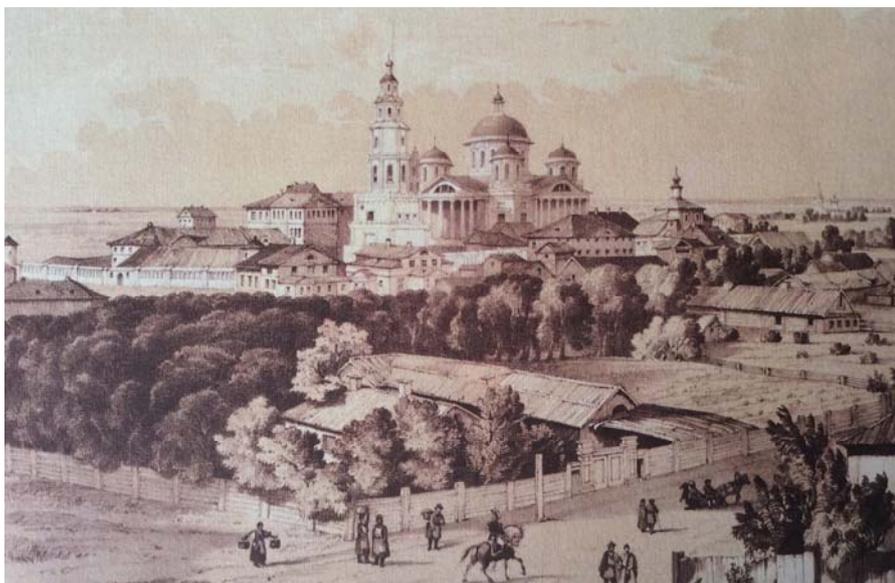


Рис. 1. Казанский Богородицкий монастырь. Э. Турнерелли, 1839–1840

Проект собора и непосредственное общение строившего собор Ф. Е. Емельянова с Старовым вдохновили губернского архитектора на создание в городе величественных сооружений с пластическими формами. Увенчанный куполом и отмеченный центральным шестиколонным портиком коринфского ордера под треугольным фронтоном губернаторский дом в конце Воскресенской улицы стал первым построенным в стиле классицизма зданием в Казани.

Новый импульс развитию городского центра дал приезд в 1798 году в город Павла I. Перестроенный на выделенные по его распоряжению из казны средства гостиный двор продолжил распространение высокого стиля в городе. Двухэтажный комплекс с колонным портиком под треугольным фронтоном, обращённым на Воскресенскую улицу, занял весь квартал. В единый квартал были объединены и строения расположенной поблизости духовной семинарии. Здание губернаторского дома император передал гимназии; в 1804 г. в нем разместился только что учрежденный университет, положив начало формированию одного из лучших произведений русского классицизма.

Ансамбль Казанского университета, наделенного особой образовательной миссией на Востоке, в полной мере воплотил в своей архитектуре имперское значение учебного учреждения эпохи Просвещения. Возведенный в 1820–1830-х гг. архитекторами П.Г. Пятницким и М.П. Коринфским, он представлял законченную и целостную композицию. Главный корпус с колоннадами из ионических колонн – двенадцати в центре и шести на флангах – протянулся вдоль Воскресенской улицы (рис. 2). В глубине квартала на бровке холма располагалась обсерватория. Физический корпус и библиотека соединялись с анатомическим театром оградой («в один ряд пестумской колоннады»), циркумференцией охватывавшей полукруглую площадь. Её завершающим аккордом стал памятник известному русскому просветителю и уроженцу Казани Г.Р. Державину. Место его установки в центре указал лично Николай I во время посещения города в 1836 году. Великолепие университета, отвечавшего всем достижениям современности, восхитило императора, признавшего, что эти «университетские здания вообще есть лучшее, какое ему когда-либо случалось видеть в этом роде» [3, с. 773]. Университетская площадь ассоциировалась у горожан с «общественным форумом», с «чем-то вроде древней площади в Афинах» [4, с. 480], отчасти компенсируя отсутствие в Казани городской административной площади, не заложенной планом 1768 г.



Рис. 2. Казанский университет. В. Турин, 1834

Во второй половине XIX века актуальность эстетики регулярного градостроительства в России выражалась в основном в консервации и поддержании сложившихся планировочных структур. Эта преемственность как творческий метод русского градостроительства XIX в. была свойственна и Казани. Однако здесь, кроме того, концепт регулярности получил новый импульс в завершении начатых и формировании новых ансамблей, устойчивости форм классицизма в облике городского центра.

Так, при возведении в 1879 г. вблизи университета нового Воскресенского собора на месте старой установки на классицистические формы, шедшая вразрез с всеобщей ориентацией на русский стиль в церковном строительстве, была изначально прописана в задании на проектирование. Соответствие проекта поставленной задаче его автор Г.В. Розен особо подчеркнул в пояснительной записке, заверив, что он «составлен согласно заданной программе пятиглавый, в стиле, подходящем к существующей колокольне» [5]. Монументальный собор с величественным центральным куполом на массивном барабане и ордерными формами на фасадах, хотя и решенных в инновационной технике обнаженной кирпичной кладки, отвечал стилистике как возведенной в начале XIX века колокольни, так и расположенного поблизости университетского комплекса.

Приверженность к классицизму продемонстрировал и другой значимый элемент ансамбля парадного центра – Богородицкий монастырь. Дальнейшая застройка неоконченного строительством комплекса стала результатом посещения его в 1861 г. обер-прокурором Святейшего Синода, обнаружившим здесь ветхую трапезную и множество возведенных частным образом при поступлении в обитель деревянных келий. Настоятельница монастыря обратилась к замыслу 1810 г., намереваясь завершить комплекс именно «в таком симметричном расположении». К проекту корпуса, подобного церкви Николы Тульского, для убедительности прилагалась копия с плана Я.М. Шелковникова 1809 г., свидетельствуя о решимости следовать ему. Стремление было так сильно, что не поддавалось прямым указаниям столичных чиновников, призывавших проект составить «согласно настоящим потребностям монастыря и условиям местности и нисколько не стесняясь В[ысочайше] У[твержденным] в 1810 году фасадом», терявшим свою силу по прошествии 50 лет со времени утверждения. Отложенный на время ввиду отсутствия средств проект приобрел чрезвычайную актуальность в 1879 г., в год 300-летия обретения иконы Казанской богородицы. Крестовоздвиженский корпус,<sup>1</sup> аналогичный по внешнему виду теплomu Никольскому храму 1810–1815 гг., был возведен в 1883–1887 гг. Желаемая симметрия в композиции ансамбля в целом была достигнута. Однако ее нарушали оставленные по силе указа 1869 г., распространявшего закон о сохранении российских древностей на памятники петровского времени, старые строения – святые ворота с надвратным храмом и трапезная конца XVII – начала XVIII в. «Археологические древности» привнесли живописность в строгий облик монастырского комплекса. В 1910-х гг. в подвале собора на месте чудесного обретения иконы Казанской богородицы по инициативе Великой княгини Елизаветы Федоровны и по проекту архитектора А. Щусева был устроен «пещерный храм» [2]. Включение монастыря, с самого основания пользовавшегося покровительством царских особ, в план мероприятий по подготовке к празднованию 300-летия правления дома Романовых в последний раз продемонстрировало его значимость для императорской семьи и для империи в целом.

Таким образом, во второй половине XIX – начале XX в., как и в предшествующий период, государственное начало в облике центра Казани выражалось через создание выразительного общественного парадного пространства, свидетельствуя о генетическом и содержательном родстве с идеями регулярного градостроительства [6, с. 116]. Созданная вокруг собора Богородицкого монастыря площадь заменила, подобно университетскому «форуму», отсутствовавшую в Казани городскую соборную площадь, став средоточием православных празднований. Университетская площадь, скорее, вызывала, благодаря своему образу, ассоциации с восходящим к античности общественным пространством, чем реально им была. Она лишилась такого ее восприятия с исчезновением полуциркульных очертаний и утратой под натиском новых и надстроенных старых корпусов композиционной целостности дворового ансамбля.

Потребность в создании общественных городских пространств в эпоху декларированного включения народа в государственное управление возросла. В России второй половины XIX в. время великих реформ символизировали вновь возведенные или обновленные в русско-народных формах здания городских дум. В отличие от других городов в Казани перестроенное в 1830–1840-х гг. здание городского общественного

<sup>1</sup> Свое название получил по располагавшемуся в нем храму во имя Воздвижения Честного и Животворящего Креста Господня.

самоуправления сохранило свой облик, отвечавший общему классицистическому образу главной Воскресенской улицы. Здесь причастность к демократическим переменам нашла архитектурно-градостроительное воплощение в новой, впервые появившейся в городе административной площади.

Открытое к волжским далям пространство на вершине Ивановской горы у Спасских ворот кремля с двух сторон ограничивали дом общественного самоуправления и находившийся левее по другую сторону Воскресенской улицы гостиный двор. Чуть ниже, на спуске горы, располагался Ивановский монастырь с трехшатровым собором XVII в. На этом неровном, пересеченном небольшим оврагом участке земли перед зданием городской думы и появилась площадь. Начало ее формированию положило постановление о сооружении в городе памятника императору Александру II, принятое в 1881 г. городскими властями, поддержавшими общероссийское движение по увековечиванию памяти автора Великих реформ [7].

В свете таких намерений очень своевременной оказалась инспирированная в 1884 г. настоятелем Иоанно-Предтеченского монастыря деятельность по сносу расположенного напротив городской думы собора и возведению на его месте нового [8]. Редкий в русской архитектуре трехшатровый храм XVII в. был разобран несмотря на решительное возражение Московского Археологического Общества, признавшего в нем «замечательный памятник русского зодчества, который необходимо сохранить», и заключение авторитетного архитектора-реставратора и историка архитектуры А.М. Павлинова. Ссылаясь на результаты обследования губернского архитектора и мнение Казанского Общества археологии, истории и этнографии, неосторожно допустившего возможность разбора, местные власти опередили научное сообщество и добились через Правительствующий Синод императорского разрешения на снос [9].

Новый храм, возведенный в 1887–1889 гг. по проекту архитектора Г.Б. Руша с «сохранением, по возможности, архитектуры старого», был сильно вынесен вперед и поставлен параллельно зданию городской думы, архитектурно оформив южную сторону площади. Рассматривавшийся «совершенной реставрацией прежней» церкви, он существенно превышал свои первоначальные габариты. Сухие фасады трехэтажного основного объема с равномерно расположенными окнами и пилястрами придавали ему вид более общественного здания, чем культового, если бы не апсиды и три массивных шатра. В 1895 г. в центре площади был установлен памятник «Царю-Освободителю» по победившему в конкурсе проекту академика В.И. Шервуда. Заимствованные из герба Казани бронзовые фигуры Зиланта выделяли его среди множества других подобных монументов страны [9]. В том же 1895 г. в обращенном к площади западном корпусе гостиного двора разместился городской музей, отмеченный угловой четырехскатной башенкой [10, с. 407]. Площадь, впоследствии получившая название Александровской, стала важной частью общегородского центра (рис. 3). В своем облике она воплощала новое видение империи, выражаемое через такое ключевое понятие «европейскости» этого времени, как «самоуправление».



Рис. 3. Вид на Воскресенскую улицу и Александровскую площадь. Фот. нач. XX в.

Архитектура российских городов, являвшаяся зеркалом и одновременно вывеской имперской идеи с ее тяготением к порядку и единообразию, наиболее выразительно и ярко выражалась в облике их парадных центров. В Казани раннее – в числе первых российских городов – появление регулярного плана благоприятствовало зарождению традиций классицизма, расцвет которого произошел в первой половине XIX века в значительной степени благодаря государственной поддержке. Устойчивость этих традиций в последующий период второй половины XIX – начала XX столетия, по-видимому, можно объяснить актуальностью идеи империи в наделенном особой ролью завоеванном регионе и сохранявшейся потребностью визуализировать ее архитектурными средствами.

### Список литературы

1. Джераси, Роберт. Окно на Восток: империя, ориентализм, нация и религия в России / Роберт Джераси. – М.: НЛО, 2013. – 548 с.
2. Нугманова, Г.Г. История планировки и строительства Казанского Богородицкого монастыря / Г.Г. Нугманова // Памятники русской архитектуры и монументального искусства. – М.: Наука, 2010. – С. 172–216.
3. Бенкендорф, А.Х. / Н.К. Шильдер. Император Николай I. Его жизнь и царствование. Т. 2. Дополнения ко второму тому. – СПб., 1903.
4. Агафонов, Н.Я. Казанский университет / Н.Я. Агафонов // Первый шаг. – Казань, 1873.
5. Национальный архив Республики Татарстан. Ф. 2. Оп. 7. Д. 692.
6. Кириченко, Е.И. Градостроительство России середины XIX – начала XX века / под ред. Е.И. Кириченко. Т. I. – М.: Прогресс-Традиция, 2001. – 340 с.
7. Национальный архив Республики Татарстан. Ф. 98. Оп. 2. Д. 228.
8. Азлецкий, П. Описание Иоанно-Предтеченского мужского монастыря в городе Казани / П. Азлецкий. – Казань, 1898.
9. Известия Общества Археологии, Истории и Этнографии при Императорском Казанском университете. – Т. 6. – Вып. 2. – Казань, 1887.
10. Национальный архив Республики Татарстан. Ф. 98. Оп. 2. Д. 2412.
11. Загоскин, Н.П. Спутник по Казани / под ред. Н.П. Загоскина. – Казань: ДОМО, 2005. – 847 с.

### References

1. Jeracy, R. The window to the East: Empire, Orientalism, Nation and Religion in Russia / R. Jeracy. – M.: NLO, 2013. – 548 p.
2. Nugmanova, G.G. The History of Planning and Building of the Kazan Mother of God Monastery // Monuments of Russian architecture and monumental art / G.G. Nugmanova. – M.: Nauka. P. 172-216.
3. Benkendorf, A.Kh. / Notes (1832-1837). N.K. Schilder. The emperor Nicholas I. His life and reign. V. 2. Additions to the 2-nd tom. St Petersburg, 1903.
4. Agafonov, N.Ya. Kazan University / N.Ya Agafonov // First step. – Kazan, 1873.
5. National Archive of the Republic of Tatarstan. 2-7-692.
6. Kieichenko, E.I. Town Planning in Middle Nineteenth – Early Twentieth Century Russia / ed. E.I. Kirichenko. V. I. M: Progress-Tradition, 2001. – 340 p.
7. National Archive of the Republic of Tatarstan. 98-2-228.
8. Azletskyi, P. The Description of the John the Baptist Monastery in Kazan. – Kazan, 1898.
9. Bulletin of the Society of Archeology, History and Ethnography at the Kazan University. – V. 6. – Issue 2. – Kazan, 1887.
10. National Archive of the Republic of Tatarstan. 98-2-2412.
11. Zagoskin, N.P. Tour around Kazan / ed. N.P. Zagoskin. Kazan: DOMO, 2005. – 847 p.

УДК 711.1+004.9

*Центральный научно-исследовательский институт проектирования Минстроя России*Россия, 119331 г. Москва,  
пр. Вернадского, д.29**Лола Александр Михайлович,**  
кандидат технических наук,  
главный научный сотрудник  
E-mail: amlola@mail.ru**Лола Ульяна Александровна,**  
главный специалист  
E-mail: uyalola@mail.ru**Меньшикова Елена Павловна,**  
кандидат архитектуры, начальник научно-исследовательского центра градостроения, советник Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН)  
E-mail: arhmep@mail.ru*Central research Institute of design of the Ministry of construction of Russia*Russia, 119331 Moscow,  
29, prospect Vernadskogo**Lola Alexander Mikhailovich,**  
Candidate of Sciences, Chief Researcher  
E-mail: amlola@mail.ru**Lola Juliana Aleksandrona,**  
Leading specialist  
E-mail: uyalola@mail.ru**Menshikova Elena Pavlovna,**  
Candidate of Architecture, Head of the research center of urban studies, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASN)  
E-mail: arhmep@mail.ru

## НЕОБХОДИМОСТЬ ЗНАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ АРХИТЕКТОРАМИ

А.М. Лола, У.А. Лола, Е.П. Меньшикова

В современном обществе происходит проникновение информационных технологий в различные отрасли, в т.ч. в архитектуру и градостроительство. Важно, чтобы в совместной деятельности архитекторы и IT-технологи лучше понимали друг друга. Для этого надо подготовить их к взаимному общению. Поэтому представляется целесообразным внедрение в архитектурное образование предметов, связанных с цифровыми технологиями.

*Ключевые слова: градостроительство, архитектура, цифровые технологии, образование*

## NEED FOR KNOWLEDGE OF INFORMATION TECHNOLOGIES FOR ARCHITECTS

А.М. Lola, J.A. Lola, E.P. Menshikova

In modern society, the penetration of information technologies in various industries, including architecture and urban planning is widespread. It is important for architects and IT-specialists to understand each other better in their joint activities. For this we need to prepare them for mutual communication. Therefore, it seems advisable to introduce subjects related to digital technologies into the architectural education.

*Keywords: urban planning, architecture, digital technologies, education*

В век развития и усложнения информационных систем, с одной стороны, и многовекторности развития городов и агломераций, с другой – архитектуру и градостроительство необходимо усиливать новыми знаниями. Архитекторы всегда были ведущими профессионалами проектирования города. Однако усложняющиеся технологии, человеческие отношения, глобализация и др. мировые и локальные процессы требуют дополнительных знаний и иного подхода к организации современных городов, особенно к их планировке, застройке, управлению, а для этого требуются архитекторы с новыми информационными знаниями.

Мировая цивилизация вступила в новую эпоху – эпоху информатизации, Главными создателями и «строителями» этой всемирной цивилизации являются города, ставшие в XXI столетии ключевой образующей средой обитания человека и

человечества. Однако эти самые города до сих пор не обеспечены адекватной им информацией. То есть они не идентифицированы в той мере, в какой они должны устойчиво развиваться и управляться.

Целями государственной программы «Цифровая экономика РФ» (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632) являются: создание экосистемы цифровой экономики Российской Федерации, в которой данные в цифровой форме являются ключевым фактором производства во всех сферах социально-экономической деятельности и в которой обеспечено эффективное взаимодействие, включая трансграничное, бизнеса, научно-образовательного сообщества, государства и граждан [1].

Отрасли градостроительства нельзя оставаться в стороне и не заявлять о себе в информационном пространстве, тем более что в решении сложнейших проблем города и агломерации без современных научных информационных знаний не обойтись [2]. Архитектурно-градостроительная деятельность, являясь достаточно консервативной (города не могут быстро меняться), должна быть при этом одной из самых прогрессивных, чтобы жизнь в городах не отставала от прогресса человечества. Наглядное тому подтверждение – появление понятия «умный город».

На протяжении многих веков в проектировании использовался традиционный набор «информационных носителей»: это изобретенные еще древними китайцами тушь и бумага. С появлением вычислительных инструментов их также стали использовать в процессе проектирования. С течением времени они совершенствовались, шел быстрый прогресс в технологии вычислительных процессов (логарифмическая линейка, механический калькулятор, электронный калькулятор, ЭВМ). Долгое время шел процесс совершенствования ЭВМ: уменьшались физические размеры машин, увеличивались их мощность и результативность. В третьем поколении ЭВМ (конец 1960-х – начало 1970-х) появились дисплеи и графопостроители. И лишь в четвертом поколении (с конца 1970-х годов) компьютеры стали уметь не только считать и строить графики, но и редактировать тексты.

В 1958 году был запущен компьютер Lincoln TX-2, впервые использующий графическую консоль. С этого момента компьютерная графика обретает настоящее приложение методик и наработок – векторный дисплей. В 1963 году Айвен Сазерленд (Ivan Sutherland) написал компьютерную программу «Альбом» (Sketchpad). Она, на тот момент по праву революционная, дала машинной графике огромный толчок вперед, послужила прообразом для систем автоматизированного проектирования (САПР), впервые описала элементы современных пользовательских интерфейсов и объектно ориентированных языков программирования.

Рождение BIM-технологий в мире относится к концу 20 века. Появление программы ArchiCAD 5.1 (1997 г.) с технологией виртуального здания (Virtual Building) и TeamWork (работа в команде) стало важной вехой в развитии САПР, признанной конкурентами GRAPHISOFT [3]. Технология Virtual Building зарекомендовала себя как передовая на рынке технологий архитектурно-строительного проектирования под новым именем: Информационная Модель Здания (Building Information Modeling), сокращенно BIM. Компания AUTODESK (электронный кульман) – конкурент GRAPHISOFT – с программой AutoCAD вышла на рынок двумя годами раньше, но, предлагая только 2D проектирование, не могла предоставить тех возможностей, что предлагала ArchiCAD. И только купив Revit Technology Corporation, программа смогла выполнять недостающие функции.

Появление электронных возможностей не сразу влечет за собой их массовое применение в проектной практике. История применения электронного проектирования в нашей стране берет начало от первой САПР для легкой промышленности. Она была разработана совместно специалистами отдела математического моделирования и оптимального проектирования Института проблем машиностроения АН Украины и Проектно-конструкторского бюро автоматизированных систем управления текстильной и легкой промышленности в Москве. Система разрабатывалась на базе АРМ СМ-4.

САПР в строительном проектировании не получила должного развития, учитывая ее ограниченные возможности для архитектуры. Однако желание идти в ногу со временем в середине 1970-х годов побудило ЦНИИП градостроительства к созданию отдела математического моделирования (под руководством Л. Яковлева). В отделе велась серьезная работа, чтобы приспособить процесс градостроительного проектирования к САПР. Следует отметить, что такой опыт стал возможен потому, что в институт пришли энтузиасты-математики. Совершенно очевидно, что на той стадии электронного проектирования архитекторы (учитывая их подготовку) ничего не могли создать. Наиболее адаптивными оказались вопросы организации транспортно-пешеходных связей. Работа проводилась на базе ЭВМ «Минск». Система САПР (система автоматизированного проектирования) была ограничена практически расчетной составляющей, поэтому целостного градостроительного (пространственного) подхода в этой системе не было. Поскольку имеющиеся специалисты были единичны, а новых ни один вуз для градостроительного проектирования не готовил, отдел математического моделирования естественным путем прекратил свое существование.

Конечно, такое негативное явление можно оправдать политической ситуацией. Но задача ученых и деятелей образования – работать на опережение. Имея замечательный прецедент симбиоза математического моделирования и градостроительного проектирования, со стороны научно-образовательного сообщества было непросчитанным просчетом упустить возможность по дальнейшему развитию данного направления через подготовку новых кадров.

Кроме описанного выше опыта САПР в ЦНИИП градостроительства был уникальный опыт реального программного продукта, нацеленного на транспортно-градостроительную оценку территорий для проектирования реальных градостроительных объектов. Проектировщики ЦНИИП градостроительства высоко оценили результаты работы этой программы при работе над генеральными планами городов. Появление такой программы не просто нетипично, а абсолютно уникально. Авторами программного продукта являются два специалиста: Б.В. Черепанов – опытный инженер транспортно-градостроительных систем, инициатор данной разработки, и А.Б. Черепанов – его сын, программист. Без такого симбиоза вряд ли был бы полученный результат.

Этот пример может послужить «моделью», на которую следует ориентироваться при подготовке специалистов. Специалист – архитектор (инженер) или градостроитель – лишь тогда сможет составить квалифицированное задание на программный продукт, если будет понимать, по каким принципам создаются программы, чтобы, работая с программистами, разговаривать на понятном им языке. И самое существенное: только специалист, связанный с проектированием, знает, какие проблемы есть в его отрасли и какие бы усовершенствования через цифровые технологии хотелось бы получить. Программисты сами о таких проблемах догадаться не могут и не должны, несмотря на то, что существует отрасль «Прикладная информатика». Позитивно, что выпускники вузов направления «Прикладная информатика» – это специалисты по информационным системам (ИС) и информационным ресурсам (ИР); системные аналитики, разработчики программных бизнес-приложений, сочетающие хорошее знание предметной области, с одной стороны, и глубокие знания и навыки практической работы в области информационно-коммуникационных технологий (ИКТ), с другой. В каждой предметной области есть задачи и проблемы. Поэтому корректнее говорить о предметно-проблемных областях (ППО) деятельности или знаний. Примерами таких областей деятельности являются: экономика, образование, медицина, социальное обеспечение, оборона страны и т.д. Отличительными особенностями выпускника по направлению «Прикладная информатика» от других направлений подготовки в области ИКТ является способность решать широкий круг задач создания, внедрения, сопровождения и эксплуатации ИС в различных предметно-проблемных сферах: экономика, менеджмент, юриспруденция, образование, государственное и муниципальное управление и др. [4]. Складывается такая картина: университеты готовят специалистов по прикладной информатике, в том числе по прикладной информатике в архитектуре.

Стало быть, IT-специалисты готовы к диалогу с архитекторами. Однако в подготовке архитекторов не предусмотрено общение с IT-специалистами.

Беглый анализ реализации программы «Умный город» показывает, что основными направлениями этой программы являются чаще всего: такие, которые интуитивно выбирали сами IT-специалисты; полученные в результате междисциплинарного научного взаимодействия (например с медициной); по совершенствованию административно управленческих процедур («единое окно» и проч.); связанные с слежением на дорогах; нацеленные на различные формы распознавания (в частности, поиск по лицу); вдохновленные некоторыми решениями из зарубежного опыта и т.д. Но среди множества предложений практически не разрабатываются вопросы именно пространственных проблем города. Почему? Вероятно, именно потому, что градостроители не проявляют должную активность, а молодых архитекторов к этому не готовят.

Основной принцип образования определяет набор изучаемых предметов. Это:

– предметы первого уровня обучения, без знания которых невозможно преподавать следующую ступень знаний. Например, без знания сопротивления материалов невозможно обучать расчету прочности строительных конструкций;

– предметы, сопутствующие основному. Так, для архитекторов – это история архитектуры и искусств;

– предметы смежных профессий, которые влияют на основную деятельность. Для архитекторов это предметы так называемых смежников, с которыми в практической деятельности происходит постоянное профессиональное взаимодействие. Это водоснабжение и канализация, отопление и вентиляция, строительные конструкции, вертикальная планировка и другие.

Дело не только в том, чтобы в процессе проектирования понимать, как функционируют те или иные составляющие здания, а важно еще и то, чтобы разговаривать со смежниками на понятном друг другу языке. Ведь с этой же целью будущим смежникам в институтах преподают предмет «архитектура».

Жизнь не стоит на месте. Меняются технологии, появляются новые отрасли. Появление и развитие информационных технологий обязывает все профессии скоординировать свою деятельность с учетом прогресса (см. рисунок).



Междисциплинарный подход в образовании

Поэтому очень важно не упустить момент и подготовить новое поколение архитекторов, готовых так же равноправно работать со специалистами по информатике, как с конструкторами и с теплотехниками. Отрадно, что IT-специалисты не замы-

каются на своем предмете, и формируются специальности (например, «Прикладная информатика»), предполагающие диалог в различных областях знаний, поэтому не следует лишать будущих профессионалов знаний, востребованных на современном этапе развития общества. «Мы обязаны не только поспевать за стремительным изменением жизни, но и предугадывать и опережать ее развитие» [5].

Замечательным примером для подражания может быть НИЦ «Курчатовский институт», где совмещаются знания совершенно различной направленности, где создана междисциплинарная молодежная научная школа, где ведут «подготовку междисциплинарно образованных специалистов – элиты научного сообщества» [6, 7].

Весьма важной составляющей архитектурного образования во все времена было обучение графическому оформлению проекта. От архитектора требуется не только правильно построить геометрию объекта, но и изобразить визуализацию. Поэтому много часов в программе обучения отдавалось предметам «изобразительным» (рисунок, начертательная геометрия, архитектурная графика и др.).

С появлением электронной графики в нашей стране архитекторы в целом (как проектировщики) и архитектурные вузы в частности не спешили отказываться от традиционной графики. Плохую услугу в этом деле оказал архитектурный снобизм (в ручной графике есть жизнь и душа, а в электронной все безлико). Поэтому первыми в освоение электронной графики включились инженеры. Первым продуктом, пришедшим в СССР, была программа AutoCAD [8]. Первые AutoCAD действительно были очень «примитивны» и не вполне конкурировали с «ручной работой». Но со временем программа совершенствовалась и пользовалась спросом у инженеров. Вскоре за AutoCAD появилась ArchiCAD, программа с технологией Virtual Building, ставшая одним из первых в мире BIM-приложений, сертифицированных по стандарту IFC. Поскольку инженерам не надо было искать себе что-то иное вместо AutoCAD, то ArchiCAD оказалась ими невостребованна. Более того, из-за того, что все инженеры работали в AutoCAD (по тем временам не совместимой с ArchiCAD), постепенно и архитекторов перевели на эту платформу. Здесь можно упрекнуть архитекторов в том, что они не потрудились провести анализ существующих программ и выбрать наиболее «подходящую» для своих потребностей. Тем более, что ArchiCAD вполне могла использоваться инженерами. Нам известны примеры, когда инженеры, познакомившись с уникальными возможностями ArchiCAD, полностью ушли от AutoCAD.

Здесь мы вновь обращаем внимание на то, что пока шло внедрение программ в практику, архитектурное образование не готовило студентов к электронному проектированию. Чаще студенты самостоятельно осваивали программы, как могли. На этом этапе вполне уместен упрек образовательному сообществу, которое не провело соответствующего анализа, не выбрало наиболее подходящих программ для обучения и не создало методическую образовательную базу. Речь идет о комплексном подходе к электронному проектированию, которое не ограничивается преподаванием одной программы для архитектурного проектирования (ArchiCAD, Photoshop, PowerPoint и др.)

Актуальность программного обучения в архитектурном образовании на сегодняшний день не только не снижается, но становится необходимостью [9]. Современные выпускники, начиная проектную работу, сегодня обязаны владеть знаниями в системе BIM-технологий [10]. А стало быть, им предстоит общаться со смежниками уже внутри единой системы проектирования и сопровождения проекта в BIM-системе.

Необходимо разработать образовательную программу, нацеленную на изучение составляющих BIM и умение работать в команде. Это не так просто сделать, поскольку следует изучить современное состояние системы, понять, какие программы следует внедрять для изучения, поскольку для функционирования отечественной BIM разработаны различные программы (и разрабатываются новые). Одновременно с этим встает вопрос углубленного изучения импортных программ, которые пока не могут быть заменены отечественными для сложных объектов.

## Вывод

Анализ развития архитектурно-градостроительного проектирования в свете использования достижений цифровых технологий указывает на недостаточную активность градостроительного сообщества по внедрению новых технологий в практику. Например, такая ветвь градостроительного проектирования, как организация транспортных сетей, является лидером среди градостроителей в использовании электронного проектирования, однако с уходом ветеранов отрасли их дело не получает должной преемственности.

Таким образом, задача высшей школы и аспирантуры – готовить специалистов по архитектуре и градостроительству с учетом новых знаний, позволяющих:

- свободно работать в новых программах и информационных системах (BIM-технологии);
- ставить профессиональные задачи перед информатикой по решению пространственных задач;
- полноправно участвовать в актуальных государственных программах, таких, как «Цифровизация экономики», «Умный город» и других.

Образовательные процессы должны работать с опережением, для того чтобы архитекторы и градостроители создавали среду завтрашнего, а не вчерашнего дня.

## Список литературы

1. Меньшикова, Е.П. Градостроительное моделирование / Е.П. Меньшикова, А.М. Лола, У.А. Лола // Фундаментальные поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации. Научные труды РААСН в 2016 году. – М., 2017. – Т.1. – С.404–412.
2. Лола, А.М. Генеральный план города как информационная модель / А.М. Лола, Е.П. Меньшикова, У.А. Лола // Современные научные исследования и разработки. – 2018. – №4(21). – Т.1. – С.339–343.
3. <http://cadstudio.ru/archicad-30th-anniversary.htm> (дата обращения 10.12.2018).
4. <http://obrazovanie66.ru/spec/prikladnaya-informatika/> (дата обращения 10.01.2019).
5. Шубенков, М.В. – URL: [http://www.marhi.ru/rectorat/vote/shubenkov.php?phrase\\_id=968831](http://www.marhi.ru/rectorat/vote/shubenkov.php?phrase_id=968831) (дата обращения 02.02.2019)
6. Ковальчук, М.В. Конвергенция наук и технологий – новый этап научно-технического развития / М.В. Ковальчук, О.С. Нарайкин, Е.Б. Яцишина // Вопросы философии. – 2013. – № 3. – С.34–49.
7. Ковальчук, М.В. От синтеза в науке – к конвергенции в образовании / М.В. Ковальчук // Образовательная политика. – 2010. – № 11–12. – С.49–52.
8. Пристрастные заметки о русских разработчиках САПР 22 августа 2014 в 10:25 Блог компании Нанософт, CAD/CAM. – URL: <http://habrahabr.ru/company/nanosoft/blog/234221/> (дата обращения 02.02.2019)
9. Меньшикова, Е.П. Основной доклад на круглом столе 07.12.2018 «Информационные технологии и город» «как интегрированный предмет образования» в Республике Казахстан / Е.П. Меньшикова. – Уральск: КазИИТУ, 2018.
10. Чегодаева, М.А. Этапы формирования и перспективы развития BIM-технологий / М.А. Чегодаева // Молодой ученый. – 2017. – №10. – С. 105–108.

## References

1. Menshikova, E.P. Urban modeling / E.P. Menshikova, A.M. Lola, U.A. Lola // Fundamental and applied studies of architecture in the scientific development of architecture, urban planning and construction industry of the Russian Federation. Scientific works of architecture in 2016. – M., 2017. – Vol.1. – P. 404–412.

2. Lola, A.M. General plan of the city as an information model / A.M. Lola, E.P. Menshikov, U.A. Lola // Modern scientific research and development. – 2018. – №4(21). – Vol.1. – P. 339–343.
3. <http://cadstudio.ru/archicad-30th-anniversary.htm> (accessed 10.12.2018).
4. <http://obrazovanie66.ru/spec/prikladnaya-informatika/> (accessed 10.01.2009).
5. Shubenkov, M.V. – URL: [http://www.marhi.ru/rectorat/vote/shubenkov.php?phrase\\_id=968831](http://www.marhi.ru/rectorat/vote/shubenkov.php?phrase_id=968831) (accessed 02.02.2009)
6. Kovalchuk, M.V. Convergence of science and technology – new stage of scientific-technical development / M.V. Kovalchuk, O.S. Naraikin, E.B. Yatsishin // Questions of philosophy. – 2013. – № 3. – P. 34–49.
7. Kovalchuk, M.V. From synthesis in science to convergence in education / M.V. Kovalchuk // Educational policy. – 2010. – № 11–12. – P. 49–52.
8. Partial notes for the Russian developers of CAD on August 22, 2014 at 10:25 Blog of Nanosoft, CAD/CAM. – URL: <http://habrahabr.ru/company/nanosoft/blog/234221/> (accessed 02.02.2009)
9. Main report at the Round table 07.12.2018 Information technologies and the City "as an integrated subject of education" in the Republic of Kazakhstan / E.P. Menshikova. – Uralsk: The Convenient, 2018.
10. Chegodaeva, M.A. Stages of formation and prospects of BIM-technologies / M.A/ Chegodaeva // Young scientist. – 2017. – №10. – P. 105–108.