

**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 использо-  
вание в статьях данных, не подлежа-  
щих открытой публикации.  
Редакция может опубликовать статьи  
в порядке обсуждения, не разделяя точку  
зрения автора.

Подписано к печати 18.09.2020.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд.л. 23,5. Тираж 500 экз. Первый завод 100.

Заказ № 69.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

# РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО 3(44)/2020

## Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
И ИЗДЕЛИЯ..... 5

**Ильина Л.В., Туляганов А.К.**  
ПРИМЕНЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОЛОКОН  
В ШТУКАТУРНЫХ ЦЕМЕНТНЫХ СМЕСЯХ  
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК РАСТВОРА..... 5

**Логанина В.И.**  
КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА  
ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ..... 12

**Логанина В.И., Куимова Е.И.**  
ДОСТОВЕРНОСТЬ КОНТРОЛЯ  
И ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ  
ПРИ ДОПУСКОВОМ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА  
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ..... 17

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ,  
ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ..... 22

**Селяев В.П., Селяев П.В.,  
Горенков А.О., Безрукова Е.С.**  
АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИАГРАММ  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНОВ  
ПРИ СЖАТИИ ..... 22

**Селяев В.П., Селяев П.В., Горенков А.О.,  
Безрукова Е.С., Кечуткина Е.Л.**  
ФРАКТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЧНОСТИ  
БЕТОНА С УЧЕТОМ МАСШТАБНОГО  
ЭФФЕКТА СТРУКТУРЫ ..... 31

**Монахов В.А., Зайцев М.Б.**  
МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
КОНФИГУРАЦИИ СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЫ  
ПРИ ВНЕШНЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ..... 39

**Бакушев С.В., Шацкая Г.С.**  
ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ  
В ПОЛУПЛОСКОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ  
НОРМАЛЬНЫХ И КАСАТЕЛЬНЫХ  
НАГРУЗОК..... 46

© Авторы публикаций, 2020

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2020

© ПГУАС, 2020

<b>Береговой А.М., Береговой В.А.</b> ВОПРОСЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ ВОЗДУХОПРОНИЦАНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ..... 57	<b>Андреев С.Ю., Вилкова Н.Г., Сафронов М.А.</b> ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАМИНАРНОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ЕГО СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ..... 115
<b>Гучкин И.С., Ласьков Н.Н.</b> ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ СКЛАДА ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ СТАНЦИИ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ..... 61	<b>Андреев С.Ю., Гарькина И.А., Сафронов М.А.</b> УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСТЕНОЧНОГО ПОДСЛОЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА..... 125
<b>Гарькин И.Н., Лаштанкин А.С.</b> ЦИКЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК НА ВЫНОСЛИВОСТЬ..... 68	<b>Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.</b> ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ.. 140
<b>Нежданов К.К., Гарькин И.Н., Курткеев Д.Х.</b> РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НЕРАЗРЕЗНЫХ ПОДКРАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ..... 78	<b>Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.</b> ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР В МОДЕЛИРОВАНИИ И УПРАВЛЕНИИ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ..... 146
<b>Тарасеева Н.И., Иванов Н.М., Прохиро С.А.</b> МЕТОДИКА КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ МОСТА .. 84	<b>Домке Э.Р., Жесткова С.А., Барсукова А.И.</b> ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДОСТАВКИ МАССОВОГО СТРОИТЕЛЬНОГО ГРУЗА АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ .... 152
<b>Кочеткова М.В.</b> ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ РАЗРУШАЮЩЕЙ СИЛЫ РОСТВЕРКОВ ПОД КОЛОННУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СХЕМЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ СВАЙ..... 91	<b>Еремкин А.И., Пономарева И.К.</b> МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВОЗДУХООБМЕНА СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ВЫТЕСНЯЮЩЕГО ТИПА В ЗАЛАХ БОГОСЛУЖЕНИЯ ПРАВОСЛАВНЫХ СОБОРОВ ..... 161
<b>Герасимов В.П., Валиахметов Р.М.</b> УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОСКОЙ ФОРМЫ ИЗГИБА ДЕРЕВЯННЫХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАПРАВЛЕНИЯ ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА И РАСПОЛОЖЕНИЯ СВЯЗЕЙ..... 96	<b>Еремкин А.И., Пономарева И.К.</b> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПУТЕЙ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ ..... 169
<b>Очиров Н.Г., Лунегова А.А., Болотин А.В.</b> ВЕРоятностная модель ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЗДАНИЙ ..... 102	АРХИТЕКТУРА..... 175
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ .....108	<b>Нугманова Г.Г.</b> ГУБЕРНСКИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМИССИИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫМИ ПРАКТИКАМИ В РОССИИ СЕРЕДИНЫ XIX ВЕКА ..... 175
<b>Осипова Н.Н., Гришин Б.М., Родионов Ю.В., Тараканов О.В.</b> ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ НА ОСНОВЕ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ..... 108	<b>Астахова И.С., Жданова Л.Р.</b> ПРИРОДНЫЙ КАМЕНЬ В АРХИТЕКТУРНОМ ОФОРМЛЕНИИ Г. СЫКТЫВКАРА: ИСТОРИЯ, СОХРАНЕНИЕ И РЕСТАВРАЦИЯ ..... 182

# Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	<b>Garkin I.N., Lashtankin A.S.</b> CYCLIC TESTS OF CRANE BEAMS ON ENDURANCE.....	68
<b>Ilna L.V., Tulyaganov A.K.</b> APPLICATION OF MINERAL FIBERS IN PLASTER CEMENT MIXTURES TO IMPROVE THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF THE SOLUTION....	5	<b>Nezdanov K.K., Garkin I.N., Kurtkeзов D.Kh.</b> TEST RESULTS OF CONTINUOUS CRANE STRUCTURES.....	78
<b>Loganina V.I.</b> QUALITY CONTROL OF PAINT COATINGS .....	12	<b>Taraseeva N.I., Ivanov N.M., Prohiro S.A.</b> PROCEDURE FOR DESIGN AND CALCULATION OF BRIDGE SUPPORT PARTS.....	84
<b>Loganina V.I., Kuimova E.I.</b> RELIABILITY OF CONTROL AND MEASUREMENT ERROR IN TOLERANCE QUALITY CONTROL OF BUILDING MATERIALS.....	17	<b>Kochetkova M.V.</b> REGULARITIES OF CHANGES IN THE DESTRUCTIVE FORCE OF GRILLAGE UNDER A COLUMN DEPENDING ON LAYOUT OF PILES .....	91
BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS.....	22	<b>Gerasimov V.P., Valiakhmetov R.M.</b> STABILITY OF A PLANE FORM OF BENDING OF WOODEN CURVILINE ELEMENTS DEPENDING ON THE DIRECTION OF BENDING MOMENT AND LOCATION OF LINKS .....	96
<b>Selyaev V.P., Selyaev P.V., Gorenkov A.O., Bezrukova E.S.</b> ANALYTICAL DESCRIPTION OF CONCRETE DEFORMATION DIAGRAMS DURING COMPRESSION .....	22	<b>Ochirov N.G., Lunegova A.A., Bolotin A.V.</b> PROBABILISTIC MODEL OF OPERATIONAL RELIABILITY OF BUILDINGS.....	102
<b>Selyaev V.P., Selyaev P.V., Gorenkov A.O., Bezrukova E.S., Kechutkina E.L.</b> FRACTAL MODEL OF CONCRETE STRENGTH TAKING INTO ACCOUNT THE SCALE EFFECT OF THE STRUCTURE.....	31	ENGINEERING SYSTEMS.....	108
<b>Monakhov V.A., Zaytsev M.B.</b> METHOD FOR DETERMINING CONFIGURATION OF THE ROD SYSTEM UNDER EXTERNAL INFLUENCE.....	39	<b>Osipova N.N., Grishin B.M., Rodionov Yu.V., Tarakanov O.V.</b> OPTIMIZATION OF GAS SUPPLY SYSTEMS BASED ON AIR-GAS MIXTURES OF INHABITED LOCALITIES .....	108
<b>Bakushev S.V., Shatskaya G.S.</b> NUMERICAL-ANALYTICAL DETERMINATION OF DISPLACEMENTS IN SEMI-PLANE UNDER THE ACTION OF NORMAL AND TANGENTIAL LOADS .....	46	<b>Andreev S.Yu., Safronov M.A.</b> REGULARITIES OF THE PROCESSES OF CHANGING THE HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A LAMINAR LIQUID FLOW DEPENDING ON THE VALUE OF ITS AVERAGE VELOCITY .....	115
<b>Beregovoy A.M., Beregovoy V.A.</b> ENERGY SAVING ISSUES IN CONDITIONS VARIABILITY OF THE AIR PERMISSON OF THE ENCLOSING STRUCTURES.....	57	<b>Andreev S.Yu., Garkina I.A., Safronov M.A.</b> REFINED METHOD FOR DETERMINING THE VALUES OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF NEAR-WALL SUBLAYER OF A TURBULENT FLOW .....	125
<b>Guchkin I.S., Laskov N.N.</b> THE RESULTS OF INSPECTION AND REINFORMENT OF CONCRETE SLABS FLOOR OF CHEMICAL REAGENTS STORAGE OF TREATMENT STATION.....	61		

<p><b>Budylna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.</b>          PROBLEMS OF SYSTEM APPROACH          IMPLEMENTATION IN CONSTRUCTION          INDUSTRY ..... 140</p> <p><b>Budylna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.</b>          HUMAN FACTOR IN MODELING AND          MANAGEMENT OF COMPLEX          SYSTEMS ..... 146</p> <p><b>Domke E.R., Zhestkova S.A.,          Barsukova A.I.</b>          OPTIMIZATION OF THE SYSTEM FOR          DELIVERY OF BULK CONSTRUCTION CARGO          BY AUTOMOBILE          TRANSPORT ..... 152</p> <p><b>Eremkin A.I., Ponomareva I.K.</b>          METHOD FOR AIR EXCHANGE          CALCULATING OF AIR CONDITIONING          SYSTEM OF BREATHABLE TYPE IN          ORTHODOX CATHEDRALS ..... 161</p>	<p><b>Eremkin A.I., Ponomareva I.K.</b>          IMPROVEMENT OF WAYS ENERGY          SAVING OF CAPITAL CONSTRUCTION          OBJECTS IN THE IMPLEMENTATION OF          NATIONAL PROJECTS ..... 169</p> <p>ARCHITECTURE ..... 175</p> <p><b>Nugmanova G.G.</b>          PROVINCIAL CONSTRUCTION          COMMISSIONS IN ARCHITECTURAL AND          CONSTRUCTION PRACTICES          GOVERNANCE SYSTEM IN MID-          NINETEENTH CENTURY RUSSIA ..... 175</p> <p><b>Astakhova I.S., Zhdanova L.R.</b>          NATURAL STONE IN THE          ARCHITECTURAL DESIGN OF          SYKTYVKAR: HISTORY, CONSERVATION          AND RESTORATION ..... 182</p>
--	--

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.5

*Новосибирский государственный  
архитектурно-строительный университет  
(СИБСТРИН)*

Россия, 630008, Новосибирская обл.,  
г. Новосибирск, ул. Тургенева, д. 159

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

**Туляганов Александр Константинович**,  
старший преподаватель кафедры  
«Строительные материалы, стандартизация  
и сертификация»  
E-mail: klinker@bk.ru

*Novosibirsk state university of architecture  
and civil engineering (SIBSTRIN)*

Russia, 630008, Novosibirsk region,  
Novosibirsk, 159, Turgeneva St.

**Ilina Lilia Vladimirovna**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Construction materials  
standardization and certification»,  
Dean of the faculty of engineering and  
information technologies  
E-mail: nsklika@mail.ru

**Tulyaganov Aleksandr Konstantinovich**,  
Senior lecturer of the department «Building  
materials, standardization and certification»  
E-mail: klinker@bk.ru

### ПРИМЕНЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОЛОКОН В ШТУКАТУРНЫХ ЦЕМЕНТНЫХ СМЕСЯХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТВОРА

Л.В. Ильина, А.К. Туляганов

Приведены результаты исследований по разработке состава раствора для устройства штукатурного покрытия, наносимого на поверхность зданий и сооружений для защиты от атмосферных воздействий или придания декоративных свойств. Установлено, что при введении в состав смеси ретиспергируемого в воде порошка (РПП) увеличивается прочность при изгибе, при этом прочность при сжатии незначительно снижается. Максимальное увеличение прочности при изгибе удалось достичь при введении 0,4 % РПП. Прочность при этом увеличилась на 35,7 %. При введении РПП стойкость к образованию трещин увеличивается. Показана возможность повышения трещиностойкости и снижения усадочных деформаций за счет введения в состав штукатурных растворов армирующих элементов из базальтового волокна отечественного производства. Установлено, что оптимальное содержание волокон составляет 0,6 %, при этом прочность при изгибе увеличивается на 21 % по сравнению с составом без волокон и в 1,9 раза по отношению к составу без волокон и РПП. Наибольшая трещиностойкость получена при введении базальтовых волокон, добавление 0,6 % которых обеспечивает трещиностойкость в слое раствора 20 мм уже через сутки твердения.

*Ключевые слова: раствор, растворная смесь, полимерные добавки, армирующие волокна, прочность при изгибе, трещиностойкость*

## APPLICATION OF MINERAL FIBERS IN PLASTER CEMENT MIXTURES TO IMPROVE THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF THE SOLUTION

L.V. Ilina, A.K. Tulyaganov

The results of research on the development of the composition of the solution for plaster coating applied for the surface of buildings and structures for their protection from atmospheric influences or giving decorative properties are presented. It is found that introducing a water-based powder (rpp) into the mixture, the bending strength increases, while the compressive strength decreases slightly. The maximum increase in bending strength was achieved with the introduction of 0.4 % rpp. At the same time, the strength increased by 35.7 %. With the introduction of rpp, the resistance to crack formation increases. It is shown that it is possible to increase crack resistance and reduce shrinkage deformations due to the introduction of reinforcing elements from basalt fiber of domestic production into the composition of plaster solutions. It is found that the optimal fiber content is 0.6 %, while the bending strength increases by 21 % compared to the composition without fibers and 1.9 times in relation to the composition without fibers and rpp. The greatest crack resistance is obtained by the introduction of basalt fibers, the addition of 0.6 % of which provides crack resistance in the 20 mm layer of the solution after a day of hardening.

*Keywords: solution, solution mixture, polymer additives, reinforcing fibers, flexural strength, crack resistance*

### Введение

Для устройства отделочного слоя из строительного раствора, наносимого на поверхность зданий и сооружений для ее выравнивания, подготовки к дальнейшей отделке, а также для защиты от атмосферных воздействий или придания декоративных свойств широко применяются сухие строительные штукатурные смеси, изготавливаемые на цементном вяжущем или смешанных минеральных вяжущих на основе портландцементного клинкера, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 33083-2014 по показателям качества: стойкость к образованию трещин и деформации усадки.

Увеличение межремонтного периода, повышение качества поверхности и технологичности устройства штукатурных покрытий с использованием цементного штукатурного раствора являются актуальной задачей.

Цементное вяжущее, обладая высокой прочностью на сжатие, имеет сравнительно низкую прочность на растяжение и на изгиб. Для исправления этого недостатка используется много различных способов, одним из которых является армирование цементного камня различными волокнистыми материалами как органического, так и неорганического происхождения [1].

Эффективность дисперсного армирования сухих строительных смесей напрямую зависит от правильного выбора вида волокон и во многом определяется совместимостью волокон с минеральной матрицей, количеством введенных волокон, способом производства работ и условиями последующей эксплуатации [2, 3]. При введении в матрицу армирующего волокна возникает множество локальных микроконтактов взаимодействия между волокнами и цементной матрицей, и, таким образом, связующий механизм волокон уменьшает тенденцию к образованию трещин и увеличивает срок службы штукатурного покрытия [4]. В качестве армирующего волокна предлагается использовать армирующее базальтовое микроволокно.

Таким образом, целью нашего исследования являлась разработка научно обоснованных составов раствора для устройства штукатурного покрытия, обладающего повышенной прочностью и трещиностойкостью, с использованием армирующих добавок в виде базальтового волокна отечественного производства.

### Сырьевые материалы

При проведении исследований использовались следующие сырьевые материалы:

– портландцемент класса ЦЕМ I 42,5 Н производства ООО «Топкинский цементный завод». Минералогический состав цемента, % по массе:  $C_3S$  – 61,0,  $C_2S$  – 14,5,  $C_3A$  – 7,4,  $C_4AF$  – 12,3,  $CaO_{своб}$  – 0,52;

– песок, производства ОАО «Камнереченский каменный карьер». Минеральный состав песка, % по массе: кварц – 85, полевой шпат – 20. Естественная влажность – 6 %, истинная плотность зерен песка – 2650 кг/м<sup>3</sup>, насыпная плотность песка – 1400 кг/м<sup>3</sup>, модуль крупности – 1,87, содержание илистых, глинистых и пылевидных примесей – 4,8 %;

– гидратная известь второго сорта производства ОАО «Искитимизвесть», содержащая активных оксидов (CaO + MgO) – 70 %;

– дисперсный известняк (г. Искитим, Новосибирская область), отход горнодобывающей промышленности. Химический состав известняка, % по массе: CaO – 54,48; MgO – 0,45; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,55; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,22; SiO<sub>2</sub> – 0,95; SO<sub>3</sub> – 0,27; потери при прокаливании – 43,08, удельная поверхность молотого известняка – 400 м<sup>2</sup>/кг, насыпная плотность – 1400 кг/м<sup>3</sup>, истинная плотность – 2800 кг/м<sup>3</sup>, средний диаметр частиц – 27 мкм;

– базальтовое волокно Аргаяшского месторождения порфиринов (пос. Новогорный Челябинской обл.), ООО «ТД «Порфирит-Урал», химический состав, % по массе: SiO<sub>2</sub> 47,5-55,0; TiO<sub>2</sub> 1,36-2,0; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 14,0-20,0; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + FeO 5,38-13,5; MnO 0,25-0,5; MgO 3,0-8,5; CaO 7-11,0; Na<sub>2</sub>O 2,7-7,5; K<sub>2</sub>O 2,5-7,5; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> не более 0,5; SO<sub>3</sub> не более 0,5; прочие породы не более 5. Истинная плотность – 2600 кг/м<sup>3</sup>, длина волокна – 10 мкм, диаметр волокна – 17 мкм;

– релаксируемый в воде порошок на основе сополимера винилацетата и винилового эфира версатиковой кислоты (РПП) – производитель ООО «Кубань полимер»;

– метилцеллюлоза (МЦ) производства ООО «Усольехимпром» (Иркутская область), представляющая собой метиловый эфир целлюлозы. МЦ – волокнистый материал белого цвета с желтоватым оттенком, с длиной волокон 3 мм и толщиной 8 мкм.

#### **Методы исследования**

Растворная смесь готовилась следующим образом. Сначала смешивались сухие компоненты (портландцемент, дисперсный известняк, базальтовые волокна, гидратная известь, песок, полимерные добавки), затем вводилось необходимое количество воды, после чего растворная смесь тщательно перемешивалась. Затем растворная смесь оставалась в покое на 20 мин, чтобы полимерные добавки, находящиеся в композиционной смеси, начали взаимодействовать с водой. Перед заполнением формы растворная смесь вновь перемешивалась.

Отформованные образцы-балочки размером 40×40×160 мм твердели 28 суток при температуре 20 ± 2 °С.

Испытания на изгиб образцов-балочек проводились на машине, предназначенной для статических испытаний в соответствии с ГОСТ Р 310.4.

Проведение испытания стойкости к образованию усадочных трещин осуществлялось по ГОСТ 33083-2014 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем для штукатурных работ. Технические условия». Опыты проводились на слое раствора толщиной 20 мм.

#### **Экспериментальная часть**

При составлении рецептур сухих строительных смесей использовали имеющиеся рекомендации [5–7], учитывали результаты исследования физико-механических показателей растворных смесей и растворов, модифицированных дисперсной минеральной добавкой, порошковыми полимерами и волокнами, функциональное назначение сухих смесей, условия твердения и эксплуатации.

#### **Влияние содержания РПП на прочностные показатели раствора и стойкость к образованию трещин**

На первом этапе изучалось влияние РПП на прочность при сжатии и при изгибе раствора, стойкость к образованию трещин. Для испытания приготавливалась растворная смесь оптимальной рецептуры, подобранная ранее [8] и содержащая дисперсную минеральную добавку (7 % от массы цемента), гидратную известь (25 % от массы цемента), МЦ (0,4 % от массы сухой смеси). РПП вводился в количестве от 0,2 до 0,5 % от массы сухой смеси. Результаты испытаний представлены в табл. 1 и 2.

Т а б л и ц а 1

Влияние содержания РПП на прочностные показатели раствора

Содержание РПП, % мас.	Прочность раствора, МПа	
	при сжатии	при изгибе
0	13,1	2,7
0,1	13,0	3,1
0,2	13,0	3,4
0,3	13,0	3,8
0,4	12,8	4,2
0,5	12,7	3,9

Т а б л и ц а 2

Влияние количества РПП на стойкость к образованию трещин

Продолжительность твердения, сутки	Глубина раскрытия трещин, мм, при количестве РПП, % мас.					
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	0,5	0,4	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют
2	0,6	0,5	0,4	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют
3	0,8	0,6	0,5	0,4	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют

Анализ экспериментальных данных показал, что введение в состав смеси РПП увеличивает прочность при изгибе, при этом прочность при сжатии незначительно снижается. Максимального увеличения прочности при изгибе удалось достичь при введении 0,4 % РПП. Прочность при этом увеличилась на 35,7 %. На прочность при сжатии добавление РПП существенно влияния не оказывает, что согласуется с уже известными данными [9].

При введении РПП стойкость к образованию трещин увеличивается. При добавлении 0,2 % РПП через 1 сутки твердения трещины в слое раствора толщиной 20 мм не обнаружены. Наибольшей стойкостью к образованию трещин обладает смесь, содержащая 0,4–0,5 % РПП. Трещины в такой смеси не обнаружены через 3 суток твердения.

Таким образом, для дальнейших исследований принято количество РПП – 0,4 % от массы сухой смеси.

#### **Влияние волокнистых добавок на прочность при изгибе раствора и стойкость раствора к образованию трещин**

На втором этапе изучалось влияние армирующих базальтовых волокон на прочности при изгибе раствора и стойкость раствора к образованию трещин.

Для испытания приготавливалась растворная смесь, содержащая дисперсную минеральную добавку (7 % от массы цемента), гидратную известь (25 % от массы цемента), МЦ (0,4 % от массы сухой смеси), РПП (0,4 % от массы сухой смеси).

Исследована растворная смесь и раствор, которые изготавливались как без добавок, так и с добавкой волокон в количестве 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; и 1,0 % от массы портландцемента. Результаты влияния базальтовых волокон на прочность при изгибе приведены в табл. 3.

Влияние количества базальтовых волокон на прочность при изгибе раствора

Прочность при изгибе, МПа, в зависимости от количества волокон, % мас					
0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
4,2	4,6	4,9	5,1	4,8	4,7

П р и м е ч а н и я :

1. Прочность при изгибе контрольного состава, не содержащего волокон, РПП, – 2,7 МПа.
2. Прочность при изгибе состава, содержащего 0,4 % РПП, – 4,2 МПа.

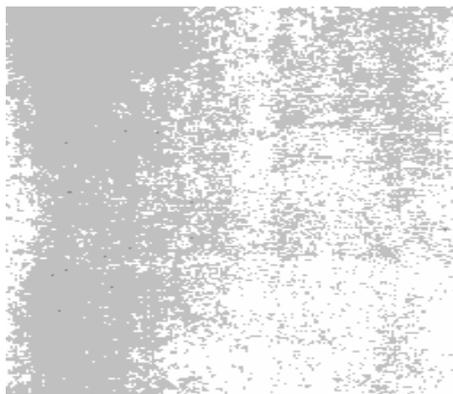
Анализ экспериментальных данных показал, что введение базальтовых волокон приводит к увеличению прочности при изгибе. При этом оптимальное содержание волокон составляет 0,6 %. Прочность при изгибе при этом увеличивается на 21 % по сравнению с составом без волокон и в 1,9 раза по отношению к составу без волокон и РПП.

Далее изучалось влияние армирующих базальтовых волокон на стойкость к образованию трещин. Испытания проводились на слое раствора толщиной 20 мм. Результаты стойкости к образованию трещин представлены в табл. 4 и на рис. 1.

Влияние количества волокон на стойкость к образованию трещин

Продолжительность твердения, сутки	Глубина раскрытия трещин, мм, при количестве волокон, % мас.					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
1	0,5	трещины отсутствуют				
2	0,6	0,4	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют
3	0,8	0,5	0,4	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют	трещины отсутствуют

а



б



Рис. 1. Поверхность раствора после испытания на стойкость к трещинообразованию:  
а – с базальтовым волокном; б – без волокон

Анализ экспериментальных данных показал, что введение волокон приводит к увеличению стойкости к образованию трещин. Наибольшая трещиностойкость получена при введении базальтовых волокон в количестве 0,6 %, что обеспечивает трещиностойкость в слое раствора 20 мм.

Проведенный микроструктурный анализ контактной зоны базальтового волокна и цементного камня (рис. 2) позволил выявить новообразования на поверхности

волокон, образовавшиеся вследствие химического взаимодействия базальтового волокна и продуктов гидратации цемента.

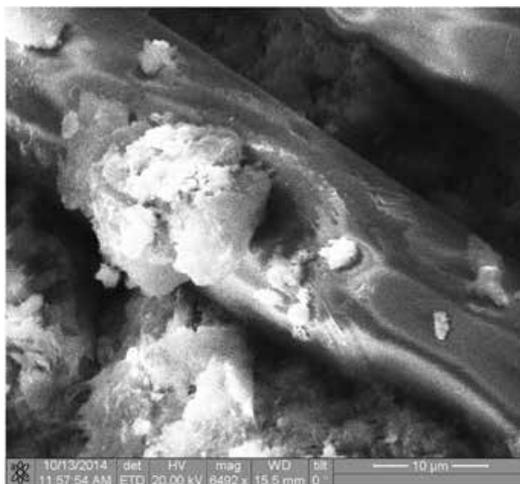


Рис. 2. Структура цементного камня, армированного базальтовым волокном, в возрасте 28 суток

### Заключение

Введение базальтовых волокон приводит к увеличению прочности при изгибе. При этом оптимальное содержание волокон составляет 0,6 %. Прочность при изгибе при этом увеличивается на 21 % по сравнению с составом без волокон и в 1,9 раза по отношению к составу без волокон и РПП. Наибольшая трещиностойкость получена при введении базальтовых волокон, добавление 0,6 % которых обеспечивает трещиностойкость в слое раствора 20 мм уже через сутки твердения.

Таким образом, исследования показали возможность повышения трещиностойкости и снижения усадочных деформаций за счет введения в состав штукатурных растворов армирующих элементов из базальтового волокна отечественного производства.

### Список литературы

1. Василик, П.Г. Применение волокон в сухих строительных смесях / П.Г. Василик, И.В. Голубев // Строительные материалы. – 2000. – № 9.
2. Дергунов, С.А. Сухие строительные смеси (состав, технология, свойства) / С.А. Дергунов, С.А. Орехов. – Оренбург, 2012. – 106 с.
3. Сарайкина, К.А. Наноструктурирование цементного камня при дисперсном армировании базальтовым волокном / К.А. Сарайкина, В.А. Голубев, Г.И. Яковлев, С.А. Сеньков, А.И. Политаева // Строительные материалы. – 2015. – № 2. – С.34–38.
4. Дервянко, В.Н. Дисперсно-армированные растворы для устройства стяжек полов / В.Н. Дервянко, Л.В. Саламаха // Строительство, материаловедение, машиностроение: сборник научных трудов. – 2009. – №3. – С.14–19.
5. Новицкий, А.Г. Базальтовое волокно как продукт для армирования бетонов и композиционных материалов: тезисы докладов Международной конференции по химической технологии ХТ'07 (посвящается 100-летию со дня рождения академика Николая Михайловича Жаворонкова) / А.Г. Новицкий, М.В. Ефремов; под ред. А.А. Вошкина, А.И. Холькина. – М.: ЛЕНАНД, 2007. – Т. 1. – С.218–220.
6. Сухие смеси в современном строительстве / В.А. Безбородов, В.И. Белан, П.Н. Мешков [и др.]. – Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, 1998. – 94 с.
7. Никифоров, Ю.В. Сухие строительные смеси, их производство и применение / Ю.В. Никифоров // Цемент и его применение. – 1999. – №5. – С.31–33.

8. Ильина, Л.В. Цементные растворы с тонкодисперсными минеральными добавками / Л.В. Ильина, А.И. Кудяков, А.К. Туляганов // Известия вузов. Строительство. – 2019. – №12. – С.32–43.
9. Харди, Г. Крепление плиток клеями, модифицированными редуспергируемыми порошками / Г. Харди // Современные технологии сухих смесей в строительстве. – 2000.
10. Ponikiewski, Tomasz. The influence of steel fibers on the rheological properties of SCC / Ponikiewski Tomasz // Silesian University Technology, Gliwice BFT Int. Poland. – 2012. – № 8. – P.46–51.
11. Ilina, L.V. Effect of dispersed mineral additive on properties of mortar mixture and solution / L.V. Ilina, A.K. Tulyaganov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – P.012031.

### References

1. Vasilik, P. G. Application of fibers in dry building mixes / P.G. Vasilik, I.V. Golubev // Building material. – 2000. – № 9.
2. Dergunov, S.A. Dry building mixes (composition, technology, properties) / S.A. Dergunov, S.A. Orekhov. – Orenburg, 2012. – 106 p.
3. Saraykina, K.A. Nanostructuring of cement stone with dispersed reinforcement with basalt fiber / K.A. Saraykina, V.A. Golubev, G.I. Yakovlev, S.A. Senkov, A.I. Politaeva // Construction materials. – 2015. – No. 2. – P. 34–38.
4. Derevyanko, V.N. Dispersed-reinforced solutions for floor screeds / V.N. Derevyanko, L.V. Salamakha // Construction, materials science, mechanical engineering: collection of scientific papers. – 2009. – No. 3. – P. 14–19.
5. Novitsky, A.G. Basalt fiber as a product for reinforcing concrete and composite materials: abstracts of the international conference on chemical technology HT ' 07 (dedicated to the 100th anniversary of the birth of academician Nikolai Mikhailovich Zhavoronkov) / A.G. Novitsky, M.V. Efremov; ed. by A.A. Voshkin, A.I. Holkin. – M.: LENAND, 2007. – Vol.1. – P. 218–220.
6. Dry mixes in modern construction / V.A. Bezborodov, V.I. Belan, P.N. Meshkov [etc.]. – Novosibirsk: Novosibirsk state University of architecture and civil engineering, 1998. – 94 p.
7. Nikiforov, Yu.V. Dry building mixes, their production and application / Yu.V. Nikiforov // Cement and its application. – 1999. – No. 5. – P. 31–33.
8. Ilina, L.V. Cement solutions with fine mineral additives / L.V. Ilina, A.I. Kudyakov, A.K. Tulyaganov // Izvestiya vuzov. Construction. – 2019. – No. 12. – P. 32–43.
9. Hardy, G. Fixing tiles with adhesives modified with redispersible powders / G. Hardy // Modern technologies of dry mixes in construction – 2000.
10. Ponikiewski, Tomasz. The influence of steel fibers on the rheological properties of SCC / Ponikiewski Tomasz // Silesian University Technology, Gliwice BFT Int. Poland. – 2012. – № 8. – P.46–51.
11. Ilina, L.V. Effect of dispersed mineral additive on properties of mortar mixture and solution / L.V. Ilina, A.K. Tulyaganov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – P.012031.

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

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

В.И. Логанина

Предложена методология организации статистического приемочного контроля окрашенной поверхности строительных изделий и конструкций по количественному признаку. Приведен пример расчета процедуры статистического приемочного контроля.

*Ключевые слова: лакокрасочные покрытия, статистический приемочный контроль, уровень несоответствий, метод доверительных границ*

## QUALITY CONTROL OF PAINT COATINGS

V.I. Loganina

A methodology is proposed for organizing statistical approval control of the painted surface of building products and structures by quantitative criteria. An example of calculating the statistical acceptance control procedure is given.

*Keywords: paint coatings, statistical approval control, level of discrepancies, confidence bound method*

Качество окрашенной поверхности определяется показателями, характеризующими защитные и декоративные свойства лакокрасочных покрытий [1, 2]. Основной задачей при разработке методики приёмочного контроля лакокрасочных покрытий является установление критериев контроля. К сожалению, ни один нормативный документ, касающийся вопросов окраски, не содержит требований к правилам статистического приемочного контроля качества окрашенной поверхности. В связи с этим вопросы разработки планов контроля качества отделки являются в настоящее время весьма актуальными.

Для разработки правил контроля следует установить [3, 4]:

- контролируемые свойства продукции;
- метод контроля;
- тип плана контроля;
- приёмочный уровень дефектности;
- правила определения объёма выборки.

В соответствии с ГОСТ 9.407-74 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида» качество окрашенной поверхности оценивается обобщёнными количественными оценками декоративных АД и защитных АЗ свойств. Известно, что изменчивость свойств лакокрасочных материалов [1] подчиняется нормальному закону распределения. Логично предположить, что количественные значения декоративных АД и защитных АЗ свойств являются случайными величинами и также подчиняются нормальному закону распределения

В соответствии с ГОСТ 50779-95 «Приемочный контроль качества по количественному признаку» требования к качеству партий продукции заданы в виде нормативного уровня несоответствий  $NQL$  по одному или нескольким количественно

измеряемым показателям качества. Решение о приемке партии принимают, если нижняя или верхняя доверительная граница уровня несоответствий не превышает нормативный уровень несоответствий:  $\bar{q} \leq NQL$  и  $\underline{q} < NQL$ . Наиболее приемлемым является правило принятия решения по методу доверительных границ.

Предлагается следующая методология статистического приемочного контроля.

Качество покрытия считается неудовлетворительным, если  $AD < 0,5$ . Верхний предел для показателя АД равен 1. Поэтому расчет следует проводить с учетом нижней доверительной границы уровня несоответствий

Нижнюю доверительную границу уровня несоответствий рассчитывают по формуле

$$\underline{q} = 0,5 - \Phi\left(\frac{a - \bar{\mu}}{\sigma}\right), \quad (1)$$

где  $\Phi$  – функция распределения стандартного нормального закона;  $\bar{\mu}$  – верхняя доверительная граница математического ожидания;  $\bar{R}$  – среднее значение прочности (математическое ожидание).

Верхнюю доверительную границу математического ожидания рассчитывали по формуле

$$\bar{\mu} = \bar{R} + \sigma \frac{z_{1-\beta_{0/2}}}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

где  $\bar{R}$  – выборочное среднее;  $z_{1-\beta_{0/2}}$  – квантиль уровня  $(1-\beta_{0/2})$  стандартного нормального распределения.

Учитывая нормальный закон распределения и «трехсигмовые» пределы, «хорошее» покрытие можно охарактеризовать следующим видом распределения показателя АД (рис. 1) с долей дефектности, не превышающей значения  $p_0$  (0,027 %) [5–7]. При снижении математического ожидания показателя АД уровень дефектности будет возрастать (рис.1) до какого-то значения  $p_1$ , которое будет характеризовать «плохое» покрытие. Уровень дефектности «плохого» покрытия  $p_1 = NQL$  задаётся по согласованию с потребителем.

Математическое ожидание «хорошего» и «плохого» покрытий будем обозначать  $AD_0$  и  $AD_1$  соответственно. Среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  принимается неизменным и определяется из условия, что «зона удовлетворительного состояния покрытия» ( $AD = 0,5 \dots 1$ ) содержит 6 «сигм» распределения.

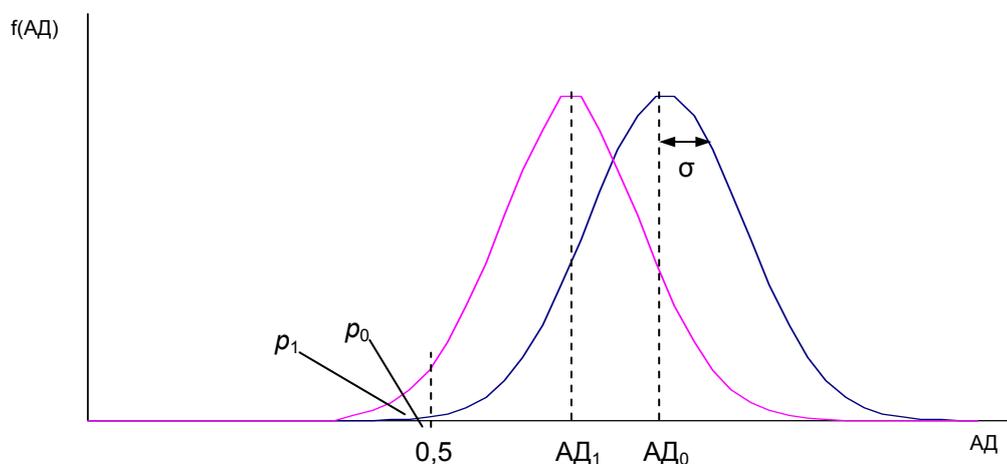


Рис. 1. Законы распределения показателя АД «хорошего» и «плохого» покрытий

Таким образом,

$$\sigma = \frac{1-0,5}{6} = 0,083.$$

План статистического приёмочного контроля окрашенных поверхностей по количественному признаку определяется объёмом выборки  $n$  (в данном случае под «единицей выборки» понимается определённый участок поверхности, подвергаемый контролю) и нормативным уровнем дефектности  $NQL$ , который является критерием при проведении контроля.

Объём выборки  $n$  определяется из соотношения

$$n = \left( \frac{z_{1-\alpha} + z_{1-\beta}}{AD_0 - AD_1} \right)^2 \cdot \sigma^2. \quad (3)$$

Таким образом, изготовитель строительных изделий и конструкций, исходя из требований потребителя, определяет число контролируемых участков поверхности (объём выборки)  $n$ . После этого контролируемая поверхность разбивается на  $n$  участков, площадь которых  $d = S/n$  ( $S$  – общая площадь поверхности).

Распределения средних значений показателей АД для «плохого» и «хорошего» покрытий ( $AD_1$  и  $AD_0$ ) будут иметь вид, показанный на рис.2.

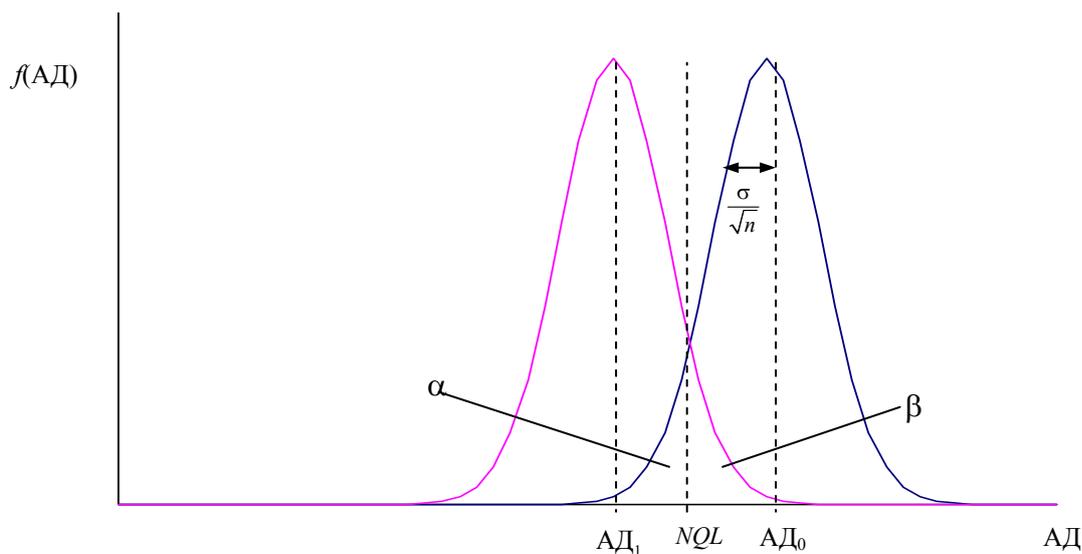


Рис. 2. Законы распределения средних значений показателя АД «хорошего» и «плохого» покрытий

Значения  $\alpha$  и  $\beta$  будут соответственно характеризовать риски «поставщика» и «потребителя» окрашенных поверхностей. Значение риска потребителя  $\beta$  определяется в соответствии с ГОСТ Р 50779.50-95 и зависит от степени доверия. При отсутствии надежной информации о возможностях поставщика обеспечить требуемое качество  $\beta=0,1$ .

Определив объём выборки  $n$ , а также нижнюю доверительную границу уровня несоответствий из (1) и сравнив показатель  $NQL$  с нормативным значением, делают заключение о качестве окрашенной поверхности.

Показатель АД для каждого участка вычисляется в соответствии с ГОСТ 9.407-74. Площадь контролируемой поверхности представляется как партия, состоящая изначально из бесконечного числа элементарных участков. Объект контроля – отдельный

участок площади поверхности, размер которого определяется расчётным значением объёма выборки.

Ниже приведен пример расчета процедуры статистического приемочного контроля по количественному признаку качества окрашенной поверхности. Допустим, что установлен нормативный уровень несоответствий  $NQL=3\%$ . Нормативное значение риска потребителя при контроле поставщика  $\beta_0=0,10$  соответствует степени доверия T2. Риск поставщика  $\alpha=5\%$ ,  $\sigma=0,083$ .

Предварительно вычисляем  $AD_1$  из соотношения

$$AD_1 = 0,5 + z_{1-NQL} \sigma = 0,5 + 1,88 \cdot 0,083 = 0,65604.$$

Значение  $AD_1$  вычисляли, исходя из уровня дефектности  $NQL=3\%$ . Для определения объема выборки  $n$  воспользуемся соотношением (3).

$$n = \left( \frac{u_{1-\alpha} + u_{1-\beta}}{AD_0 - AD_1} \right)^2 \cdot \sigma^2 = \left\{ \frac{1,645 + 1,28}{0,75 - 0,65604} \right\}^2 \cdot 0,083^2 = 7,27.$$

Принимаем  $n=8$ . Допустим, при осмотре состояния окрашенной поверхности значение обобщенной оценки декоративных  $AD$  свойств составило  $\overline{AD}=0,7$ .

$$\bar{\mu} = \bar{R} + \sigma \frac{z_{1-\beta_0/2}}{\sqrt{n}} = 0,7 + 0,083 \frac{1,645}{\sqrt{8}} = 0,7487.$$

$$\begin{aligned} \underline{q} &= 0,5 - \Phi \left( \frac{a - \bar{\mu}}{\sigma} \right) = 0,5 - \Phi \left( \frac{0,5 - 0,7487}{0,083} \right) = 0,5 - \Phi(2,99) = \\ &= 0,5 - 0,49863 = 0,00137 = 0,137\% \\ \underline{q} &= 0,137\% < NQL = 3\%. \end{aligned}$$

Следовательно, окрашенную поверхность можно принять.

Аналогичным образом следует поступать и при контроле покрытий по защитным свойствам по показателю  $A3$ . Отличие заключается в том, что в соответствии с [1] покрытие считается «плохим» при  $A3 < 0,44$ , следовательно, изменится нижняя граница «зоны удовлетворительного состояния покрытия». В остальном рассуждения аналогичны.

Значение среднего квадратического отклонения  $\sigma$  может изменяться от выборки к выборке и должно подвергаться дисперсионному анализу для проверки однородности, а следовательно, стабильности процесса изготовления. Предложенное числовое значение  $\sigma$  целесообразно принимать в качестве базового на начальных этапах организации статистического приемочного контроля окрашенных поверхностей на заводах-изготовителях и в построечных условиях.

Основными достоинствами предлагаемой методики является относительно невысокая стоимость, объективность оценки, основанная на статистических правилах, возможность анализа качества покрытия по простиранию поверхности, а также регулирование технологических процессов окрашивания путем внесения корректировок по данным контроля.

Также необходимо отметить, что предложенный подход позволяет не только проводить научно обоснованный приёмочный контроль окрашенных поверхностей, но и одновременно накапливать ценный статистический материал по видам дефектов и местам их проявления на стандартных строительных конструкциях. Решения о корректировке технологических процессов, выборе того или иного красочного состава и другие, не менее важные решения, принимаемые на основе объективной статистической информации, позволят обеспечить непрерывное улучшение качества процессов, что является одной из главных целей предприятий в области качества

## Список литературы

1. Логанина, В.И. Оценка декоративных свойств лакокрасочных покрытий / В.И. Логанина, В.А. Смирнов, С.Н. Кислицына, О.А. Захаров, В.Г. Христолюбов // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2004. – № 8. – С. 10–12.
2. Карякина, М.И. Лакокрасочные материалы : Технические требования и контроль качества / М.И. Карякина, Н.В. Майорова. – М.: Химия, 1985. – 272 с.
3. Саката Сиро. Практическое руководство по управлению качеством / Саката Сиро; пер. с 4-го японского издания С.И. Мышкиной, под ред. В.И. Гостяева. – М.: Машиностроение, 1980. – 215 с.
4. ГОСТ Р 50779.21-96. Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Часть 1. Нормальное распределение. – М.:Изд-во стандартов, 1996.
5. Логанина, В.И. Достоверность контроля качества строительных материалов и изделий / В.И. Логанина, А.Н. Круглова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 2. – С. 16–18.
6. Логанина, В.И. Статистические методы контроля и управления качеством продукции учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению 653500 «Строительство» / В.И. Логанина, А.А. Федосеев. – Ростов н/Д, 2007.
7. Логанина, В.И. Организация статистического приемочного контроля качества строительных изделий и конструкций / В.И. Логанина // Строительные материалы. – 2008. – № 8. – С. 98–99.

## References

1. Loganina, V.I. Assessment of the decorative properties of coatings / V.I. Loganina, V.A. Smirnov, S.N. Kislitsyna, O.A. Zakharov, V.G. Khristolyubov // Paintwork materials and their use. – 2004. – No. 8. – P. 10–12.
2. Karjakina, M.I. Paintwork materials: Technical requirements and quality control / M.I. Karjakina, N.V. Mayorova. – M.: Chemistry, 1985. – 272 p.
3. Sakata Shiro. Practical Guide to Quality Management / Sakata Shiro; trans. from the 4th Japanese edition S.I. Myshkina, ed. IN AND. Gostyaeva. – M.: Mechanical Engineering, 1980. – 215 p.
4. GOST R 50779.21-96. Statistical methods. Definition rules and methods for calculating statistical characteristics from sample data. Part 1. Normal distribution. – M.: Publishing house of standards, 1996.
5. Loganina, V.I. Reliability of quality control of building materials and products / V.I. Loganina, A.N. Kruglova // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. – 2014. – No. 2. – P. 16–18.
6. Loganina, V.I. Statistical methods of control and product quality control study guide for students studying in the direction 653500 «Construction» / V.I. Loganina, A.A. Fedoseev. – Rostov-on-Don, 2007.
7. Loganina, V.I. Organization of statistical acceptance control of quality of building products and structures / V.I. Loganina // Building materials. – 2008. – No. 8. – P. 98–99.

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

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

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

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

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

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

## ДОСТОВЕРНОСТЬ КОНТРОЛЯ И ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ДОПУСКОВОМ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.И. Логанина, Е.И. Куимова

Приведены сведения о допусковом контроле качества сухих строительных смесей с учетом достоверности контроля и погрешности измерения. Установлено, что если значение любого из контролируемых параметров отклонится от границ допуска на 55 % от заданной нормативности погрешности, то с вероятностью 95 % проверяемый объект можно считать годным.

*Ключевые слова: контроль, допуск, погрешность измерения, достоверность контроля, предельные значения показателей качества*

## RELIABILITY OF CONTROL AND MEASUREMENT ERROR IN TOLERANCE QUALITY CONTROL OF BUILDING MATERIALS

V.I. Loganina, E.I. Kuimova

Information on tolerance quality control of dry building mixtures, taking into account the reliability of control and the measurement error is given. It is established that if the value of any of the monitored parameters deviates from the tolerance limits by 55 % from the specified error, then with a probability of 95 % the inspected object can be considered suitable.

*Keywords: control, tolerance, measurement error, reliability of control, limit values of quality indicators*

Важным элементом управления качеством выпускаемой продукции являются измерения и контроль качества [1–3]. В процессе контроля осуществляется сопоставление фактически достигнутых результатов с данными нормативной документации. В соответствии с законом «О техническом регулировании» основными элементами технического регулирования являются нормирование требований, обеспечивающих безопасность, и подтверждение соответствия продукции установленным требованиям. Для количественной оценки ущерба вводят показатели риска. Уровень допустимого риска в нормативных документах выражается обычно через предельно допустимые значения контролируемых показателей (нормативы безопасности).

В соответствии с действующими нормативными документами ограничения на значения показателей качества задаются в виде

$$\begin{aligned}x &\geq x_{\min}; \\x &\leq x_{\max}; \\x_{\min} &\leq x \leq x_{\max}.\end{aligned}$$

Любой выход за границы допуска считается нарушением. Известно, что любой процесс изготовления связан с вариациями его параметров, вызванными большим количеством воздействующих на него факторов. Согласно ГОСТ Р 8.563–2009 (п. 5.1.3) «методики измерений должны обеспечивать требуемую точность оценки показателей, подлежащих допусковому контролю, с учетом допусков на эти показатели, установленных в документах по стандартизации или других нормативных документах, а также допустимых характеристик достоверности контроля и характера распределения контролируемых показателей». На практике все измерения сопровождаются погрешностями, вызывающими приемку как ряда годных изделий по действительным отклонениям, выходящим за границы поля допуска (с заданной вероятностью), и ошибочную забраковку некоторой части годных изделий. Отклонения в результате забраковки происходят в границах предельно допустимой погрешности измерения [4–7].

Модель измеренного  $i$ -го параметра объекта контроля имеет вид [8, 9]

$$z_i(t) = U_i(t) + y_i(t), \quad (1)$$

где  $U_i(t)$  – истинное значение измеряемого параметра;  $y_i(t)$  – погрешность, зависящая от времени и распределенная с плотностями вероятности  $f(U_i)$  и  $f(y_i)$  с среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{U_i}$  и  $\sigma_{y_i}$  соответственно.

В соответствии с ГОСТ Р 8.731-2010 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Системы допускового контроля. Основные положения» требования к показателям достоверности контроля устанавливают, основываясь на необходимости исключить или снизить риск принятия неправильного решения о состоянии объекта контроля. В ГОСТ Р 8.563–2009 и ГОСТ 8.051–81 предложено нормировать комплексный показатель достоверности контроля  $P_d$  как наиболее простой и наглядный на уровне  $P_d \geq 0,95$ .

К задачам контроля относят вычисление:

- ✓  $P_{Б-Г}$  – вероятности признания бракованного объекта контроля годным;
- ✓  $P_{Г-Б}$  – вероятности признания годного объекта контроля бракованным;
- ✓  $P_{Г-Г}$  – вероятности признания годного объекта контроля годным;
- ✓  $P_{Б-Б}$  – вероятности признания бракованного объекта контроля бракованным.

Указанные вероятности составляют полную группу событий:

$$P_{Б-Г} + P_{Г-Б} + P_{Г-Г} + P_{Б-Б} = 1. \quad (2)$$

При контроле с верхней границей допуска  $x \leq C$  отнесение годного объекта к бракованным  $P_{Г-Б}$  определяют в соответствии с выражением [10]

$$P_{Г-Б} = \int_{-\infty}^C f(x) \int_{C-x}^{\infty} \varphi(\xi) d\xi dx, \quad (3)$$

где  $f(x)$  – плотность вероятности распределения измеряемой величины  $x$ ;  $\varphi(\xi)$  – плотность вероятности распределения погрешности оценки значения измеряемой величины  $x$ .

Вероятность отнесения действительно бракованного объекта к годным  $P_{Б-Г}$  определяют в соответствии с выражением

$$P_{Б-Г} = \int_C^{\infty} f(x) \int_{-\infty}^{x-C} \varphi(\xi) d\xi dx. \quad (4)$$

Как уже отмечалось, допусковый контроль качества строительных материалов предусматривает двухсторонний и односторонний допуски. Если объект характеризуется одной величиной, для которой установлена одна допусковая граница, например контролируемая величина не должна превышать предельного значения  $C$ , объект признают годным при выполнении условия  $x \leq C$ . Несомненно, актуальным является определение наибольшего предельного значения  $\Gamma_x$ , превышающее границу допуска  $C$ , которое может принимать контролируемая величина  $x$  с учетом погрешности измерения и с заданной вероятностью  $P_d$ . В соответствии с [10] наибольшее предельное значение  $\Gamma_x$  может быть оценено на основании зависимости

$$P_d = \int_{\Gamma_x - C}^{\infty} \varphi(\xi) d\xi, \quad (5)$$

где  $\varphi(\xi)$  – плотность вероятности распределения погрешности оценки значения измеряемой величины  $x$ .

Если допустимые значения ограничиваются условием  $x \geq C$ , то  $\Gamma_x$  представляет наименьшее значение, которое может принимать контролируемая величина с вероятностью не более  $P_d$  при условии принятия по результатам контроля решения о том, что  $x$  находится в пределах допуска:

$$P_d = \int_{-\infty}^{C - \Gamma_x} \varphi(\xi) d\xi. \quad (6)$$

Рассмотрим в качестве примера расчет предельных значений  $\Gamma_x$  при контроле качества сухих строительных смесей (ССС) плотностью менее  $1300 \text{ кг/м}^3$ . Оценка предельных значений была проведена по следующим показателям:

- плотность;
- подвижность;
- водоудерживающая способность;
- прочность на сжатие;
- водопоглощение при капиллярном подсосе.

При расчете принимаем, что законы распределения вероятностей параметров изделия являются нормальными. Предполагаем, что показатели качества находятся в поле допуска ( $a$  – нижняя граница,  $b$  – верхняя граница), среднее значение совпадает с серединой поля допуска, в поле допуска укладываются шесть значений среднеквадратического отклонения (6 сигм). Распределение случайной погрешности – нормальное с нулевым средним и СКО  $\frac{\Delta}{6}$ , где  $\Delta$  – нормативная погрешность измерения.

При работе с формулой (5), в которой подынтегральная функция при нормальном законе распределения погрешности не является аналитической, появляется необходимость применения численных методов с использованием возможностей среды Mathcad.

Результаты проведенных расчетов свидетельствуют, что при заданной вероятности  $P_d=0,95$  предельными значениями показателей качества являются  $a - 0,55\Delta$  и  $b + 0,55\Delta$ .

Таким образом, если значение любого из контролируемых параметров отклонится от границ допуска на 55 % от заданной нормативности погрешности, то с вероятностью 0,95 проверяемый объект можно считать годным.

Повышение достоверности контроля качества до 0,99 изменяет предельные значения до  $a - 0,77\Delta$  и  $b + 0,77\Delta$ .

Предельные значения показателей качества ССС приведены в таблице.

Пределные значения показателей качества ССС с достоверностью 95 % и 99 %

Показатель качества	Границы допуска		Погрешность, Δ	Пределные значения при достоверности 95 %		Пределные значения при достоверности 99 %	
	Нижняя <i>a</i>	Верхняя <i>b</i>		Нижнее	Верхнее	Нижнее	Верхнее
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	500	1300	18	490	1310	486	1313
Подвижность растворной смеси, см	8	12	0,5	7,7	12,3	7,615	12,387
Прочность при сжатии, МПа	2,5	5,0	0,075	2,46	5,04	2,44	5,06
Водопоглощение при капиллярном подсосе	0	0,4	0,006	0	0,4033	0	0,405

Таким образом, при контроле качества строительных материалов следует учитывать предполагаемую достоверность контроля и погрешность средств измерений, что позволит повысить объективность контроля.

#### Список литературы

1. Рубичев, Н.А. Достоверность допускового контроля качества / Н.А. Рубичев, В.Д. Фрумкин. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 172 с.
2. Фрумкин, В.Д. Достоверность контроля средств радиоизмерений и контрольные допуски / В.Д. Фрумкин, Н.А. Рубичев, А.Б. Котляр. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 86 с.
3. Логанина, В.И. Организация статистического приемочного контроля качества строительных изделий и конструкций / В.И. Логанина // Строительные материалы. – 2008. – № 8. – С. 98–99.
4. Серых, В.И. Многопараметрический контроль продукции: достоверность и затраты / В.И. Серых, С.П. Порватов, В.И. Сединин // Методы менеджмента качества. – 2010. – №5. – С.48–52.
5. Логанина, В.И. Статистические методы контроля и управления качеством продукции: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению 653500 «Строительство» / В.И. Логанина, А.А. Федосеев. – Ростов н/Д, 2007.
6. 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.
7. ГОСТ Р 8.563–2009. ГСИ. Методики (методы) измерения.
8. Логанина, В.И. Достоверность контроля качества строительных материалов и изделий / В.И. Логанина, А.Н. Круглова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 2. – С. 16–18.
9. РМГ 63–2003. ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации.
10. ГОСТ Р 8.731-2010. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Системы допускового контроля. Основные положения.

## References

1. Rubichev, N.A. Reliability of tolerance quality control / N.A. Rubichev, V.D. Frumkin. – M.: Publishing house of standards, 1990. – 172 p.
2. Frumkin, V.D. Reliability of control of means of radio measurements and control tolerances / V.D. Frumkin, H.A. Rubichev, A.B. Kotlyar. – M.: Publishing house of standards, 1975. – 86 p.
3. Loganina, V.I. Organization of statistical acceptance control of the quality of building products and structures / V.I. Loganina // *Building materials*. – 2008. – No. 8. – P. 98–99.
4. Serykh, V.I. Multiparameter control of products: reliability and costs / V.I. Serykh, S.P. Porvatov, V.I. Sedinin // *Methods of quality management*. – 2010. – No5. – P.48–52.
5. Loganina, V.I. Statistical methods of control and management of product quality textbook for students studying in the direction 653500 «Building» / V.I. Loganina, A.A. Fedoseev. – Rostov-on-Don, 2007.
6. Loganina, V.I. Statistical management of the production of construction products / V.I. Loganina, B.B. Khrustaleva, T.V. Uchaeva // *East European Journal of Advanced Technologies*. – 2013. – Vol. 1, No. 3 (61). – P. 65–67.
7. GOST R 8.563–2009. GSI. Methods (methods) of measurement.
8. Loganina, V.I. Reliability of quality control of building materials and products / V.I. Loganina, A.N. Kruglova // *Bulletin of the Belgorod State Technological University*. V.G. Shukhov. – 2014. – No. 2. – P. 16–18.
9. RMG 63-2003.GSI. Ensuring the effectiveness of measurements in the management of technological processes. Metrological examination of technical documentation.
10. GOST R 8.731-2010. State system for ensuring unity of measurements (GSI). Access Control Systems. Key Points.

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 69.04

*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

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

**Горенков Александр Олегович,**  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: alexandr.gorenckov@yandex.ru

**Безрукова Евгения Сергеевна,**  
аспирант  
E-mail: eugenia.bezr@gmail.com

*National Research Ogarev Mordovian 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 Sciences, Professor, Academician of  
the Russian Academy of Architectural and  
Construction Sciences  
E-mail: ntorm80@mail.ru

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

**Gorenkov Alexander Olegovich,**  
Postgraduate of the department «Building  
structures»  
E-mail: alexandr.gorenckov@yandex.ru

**Bezrukova Evgenia Sergeevna,**  
Postgraduate  
E-mail: eugenia.bezr@gmail.com

### АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНОВ ПРИ СЖАТИИ

В.П. Селяев, П.В. Селяев, А.О. Горенков, Е.С. Безрукова

Рассматривается метод подбора аппроксимирующей функции. Аппроксимирующие функции диаграмм деформирования дают возможность определить математические формулы для описания изменения касательных и секущих модулей деформации в зависимости от величины деформации, знание которых необходимо при расчёте изделий и элементов конструкций из физически нелинейных материалов. Этот метод дает возможность: определять необходимые параметры по результатам экспериментальных исследований свойств бетона склерометрическими методами; получать диаграмму деформирования бетона для любого микрообъема конструкции; изучать кинетику изменения диаграммы деформирования материала конструкции в процессе эксплуатации.

*Ключевые слова: бетон, деформация, напряжение, аппроксимирующая функция, диаграмма деформирования*

## ANALYTICAL DESCRIPTION OF CONCRETE DEFORMATION DIAGRAMS DURING COMPRESSION

V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, A.O. Gorenkov, E.S. Bezrukova

This article discusses a method for selecting an approximating function. Approximating functions of deformation diagrams make it possible to determine mathematical formulas for describing the changes in tangent and secant deformation moduli, depending on the strain, this information is necessary when calculating products and structural elements from physically nonlinear materials. This method enables: to determine the necessary parameters according to the results of experimental studies of concrete properties using sclerometric methods; to receive a diagram of concrete deformation for any microvolume of a structure; to study the kinetics of changes in the deformation diagram of the material of construction during operation.

*Keywords: concrete, deformation, stress, approximating function, deformation diagram*

Современные цементные и полимерные композиты характеризуются ярко выраженной физической нелинейностью при действии сжимающих напряжений. В теории сопротивления материалов с физически нелинейными свойствами особое внимание уделяется выбору исходной аналитической зависимости между напряжениями и деформациями. Безухов Н.И., анализируя методы упругого и пластического расчётов, пришел к выводу, что наиболее совершенным является «метод, который в основании своих расчетов кладёт действительный закон деформации материала, то есть истинную диаграмму «растяжения-сжатия»[1].

Однако при построении расчётных моделей следует учитывать, что в силу статической неоднородности материала, неоднозначных условий его работы в контрольном образце и реальной конструкции воспроизведение со стопроцентной точностью зависимости « $\sigma$ - $\epsilon$ », полученной в «стерильных» и эксплуатационных условиях работы конструкции, невозможно.

Поэтому при расчете НДС элементов конструкции реализуются два подхода. В первом случае предлагается рассматривать диаграммы деформирования, состоящие из двух и более линейных участков, в пределах которых характер деформирования материала принимается постоянным (линейным). Во втором случае рассматривается возможность подбора аппроксимирующей аналитической функции, которая должна быть монотонно изменяющейся, непрерывной, выпуклой, имеющей один экстремум и удобной для алгоритмизации.

Предложено несколько десятков функций для аналитического описания диаграммы деформирования цементного бетона, стальной арматуры, анализ и обоснование применения которых приведены в работах [2–7]. Экспериментальные данные о диаграммах деформирования полимербетонов содержатся в работах С.С. Давыдова, А.М. Иванова, А.И. Чебаненко, В.И. Соломатова, В.П. Селяева [3, 8–10]. Отмечается, что в отличие от цементных в полимерных бетонах при кратковременном нагружении не обнаруживается нижняя граница микротрещинообразования. До уровня напряжений  $\sigma_{bi} \approx (0,7 \div 0,9) \sigma_{bu}$  от временного сопротивления соблюдается строгая линейная зависимость между напряжениями и деформациями (рис. 1). Исключается накопление остаточных деформаций при однократном кратковременном нагружении от уровней, не превышающих уровень напряжений  $\sigma_{bi} = 0,7\sigma_{bu}$ . Объясняют этот факт замкнутостью порового пространства и высокой плотностью материала [9].

Характер деформирования полимербетонных образцов при сжатии не меняется после экспонирования полимербетонных образцов в агрессивных средах (см. рис.1). Можно предположить, что на линейном участке диаграммы происходит уплотнение структуры. Накопление разрушений в структуре начинается с момента нарушения пропорциональной зависимости между напряжениями и деформациями. Прогрессирующее накопление необратимых остаточных деформаций, вызванных механическим разрушением структурных связей в материале, происходит очень быстро на участке  $\sigma_{bi} - \sigma_{bu}$ . Следовательно, если произвести разгрузку образца, сжатого напряжением  $\sigma_{bi} > \sigma_{bu}$ , то остаточные деформации  $\Delta\epsilon$  по величине будут равны  $\Delta\epsilon = \epsilon(\sigma_{bi}) - \epsilon(\sigma_{bu})$ .

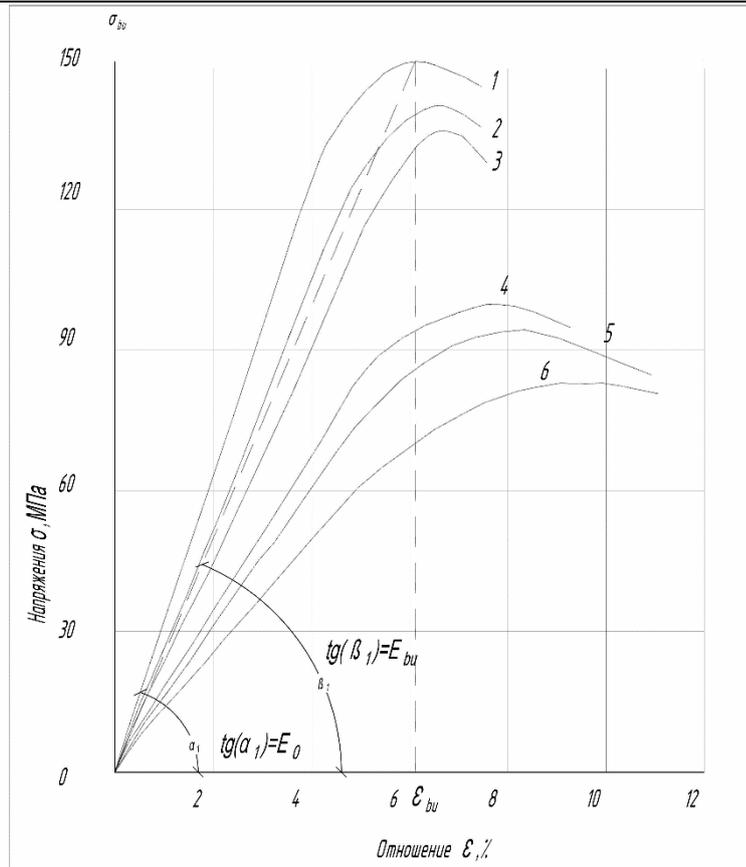


Рис. 1. Диаграммы деформирования при сжатии полиэфирного композита (длительность экспонирования в воде, сут: 1-0; 2-15; 4-175; 5-265; 6-420)

Целью исследования являлось обоснование аналитического описания диаграммы деформирования полимербетонов при сжатии с учётом выявленных экспериментально особенностей работы полимербетонов под нагрузкой и в агрессивной среде.

Результаты анализа экспериментальных исследований и литературных данных, накопленные при изучении физико-механических и реологических свойств цементных и полимерных бетонов, позволяют сформулировать основные принципы выбора аналитических функций для описания диаграммы деформирования.

Функциональная зависимость должна быть: непрерывной, дифференцируемой на рассматриваемом участке; монотонно изменяющейся, имеющей один экстремум; отражающей физические, реологические представления о структуре материала и механизме его разрушения; параметры аппроксимирующих функций должны определяться по экспериментальным данным с учетом граничных условий.

Современные информационные технологии дают возможность с достаточно высокой точностью аппроксимировать диаграммы деформирования несколькими полиномами в виде сплайн-функции или оцифровать экспериментальную диаграмму деформирования, представив ее в виде численного массива. Эти подходы обеспечивают высокую точность аппроксимации, но не отражают особенностей: строения структуры материала; изменения характера деформирования под действием эксплуатационных сред (температуры, влажности, химической активности и т.д.). Поэтому предлагаем диаграммы деформирования описывать аналитическими функциями  $\sigma=f(\epsilon, \alpha, \beta)$  (степенными, экспоненциальными, гиперболическими), которые содержат

два параметра  $\alpha$  и  $\beta$ , определяемые из граничных условий:  $\frac{d\sigma}{d\epsilon} = E_k = E_0$  при  $\epsilon \rightarrow 0$ ;

$\sigma = \sigma_{bu}$  при  $\epsilon = \epsilon_{bu}$  и  $E_k = 0$  при  $\epsilon = \epsilon_{su}$  и отражающие основные физические свойства и константы, представляющие свойства материала.

Для аппроксимации приняты аналитические функции, которые наиболее часто применяются при проведении анализа напряженно-деформированного состояния бетонов. Вид функций приведен в табл. 1.

Таблица 1

Аналитическое описание диаграмм деформирования при кратковременном нагружении бетона

№ п/п	Вид функции « $\sigma$ - $\varepsilon$ »	Аналитическое представление	Коэффициенты	
			$\alpha$	$\beta$
1	Бюльфинберга Г. В.	$\sigma_i = \alpha \varepsilon_i^\beta$	$\frac{\sigma_{bu}}{\varepsilon_{bu}^{E_k/E_c}}$	$\frac{E_k}{E_c}$
2, 3	Герстнера Ф. И.	$\sigma_i = \alpha \varepsilon_i - \beta \varepsilon_i^2$	$E_0$	$E_0 / 2\varepsilon_{bu}$
4, 5	Лукаша П. А. Ржаницина А. Р.	$\sigma_i = \alpha \varepsilon_i - \beta \varepsilon_i^3$	$E_0$	$E_0 / 3\varepsilon_{bu}^2$
6	Тимошенко С. П.	$\sigma_i = \frac{\varepsilon}{\alpha + \beta \varepsilon_i}$	$\frac{1}{E_0}$	$\left(\frac{1}{E_{bu}} - \frac{1}{E_0}\right) \frac{1}{\varepsilon_{bu}}$
7	Соколовского В. В	$\sigma_i = \frac{\alpha \varepsilon}{\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon_i}{\beta}\right)^2}}$	$E_0$	$\frac{\varepsilon_{su}}{\sqrt{\frac{E_0}{E_{su}} - 1}}$
8, 9	Экспоненциальная	$\sigma_i = \alpha \varepsilon_{exp} \left(-\frac{\varepsilon}{\beta}\right)$	$E_0$	$\varepsilon_{bu}$
10	ЕС	$\frac{\sigma_i}{\sigma_{su}} = \frac{\alpha \varepsilon_i - \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{bu}}\right)^2}{1 + \frac{\beta \varepsilon_i}{\varepsilon_{bu}}}$	$E_0 / E_{bu}$	$\beta = \alpha - 2$
11	Сен-Венана	$\sigma_i = \alpha \left[ 1 - \left( 1 - \left( \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{bu}} \right)^\beta \right) \right]$	$\sigma_{bu}$	$E_0 / E_{bu}$

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  определяются из граничных условий. Например, для функции Г.В. Бюльфингера (1) коэффициенты определены из условия

$$\beta_1 = \frac{E_k}{E_c} = \frac{\alpha \varepsilon^{\beta-1} \beta}{\alpha \varepsilon^{\beta-1}},$$

где  $E_c = \frac{\sigma(\varepsilon)}{\varepsilon}$  – секущий модуль упругости.

Тогда  $\alpha$  при условии, что  $\sigma = \sigma_{bu}$ , если  $\varepsilon = \varepsilon_{su}$ , будет равно  $\alpha_1 = \frac{\sigma_{bu}}{(\varepsilon_{bu})^{E_k/E_c}}$ .

Для функции Ф.И. Герстнера параметры  $\alpha$  и  $\beta$  можно определить из условий  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_k$  при  $\varepsilon \rightarrow 0$   $E_k = E_0 = \alpha_2$ , если  $\varepsilon_i = \varepsilon_{bu}$ , то  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$  и  $\beta_2 = E_0 / 2\varepsilon_{su}$ . Параметр  $\beta$  можно определить также из условия, согласно которому если  $\varepsilon_i = \varepsilon_{bu}$ , то  $\sigma = \sigma_{bu}$ . Тогда  $\beta_2' = (E_0 - E_{bu}) / \varepsilon_{bu}$ .

Применяя аналогичные граничные условия для функции П.А. Лукаша, имеем  $E_o = \alpha_3$ ; тогда  $\beta_3 = E / 3\varepsilon_{bu}^2$  и  $\beta_3' = (E_0 - E_{eu}) / \varepsilon_{bu}^2$ . Подобным образом определены параметры  $\alpha$  и  $\beta$  для всех функций, данные о которых приведены в табл. 1.

В табл. 2 представлены аппроксимирующие функции, аналитический вид которых приведен в табл. 1. Нумерация аналитических функций в табл. 1 соответствует нумерации аппроксимирующих функций в табл. 2, которые получены при различных граничных условиях.

Т а б л и ц а 2

Касательные и секущие модули деформации

№	Вид функции $\sigma = f(\varepsilon)$	Касательные модули $d\sigma = d\varepsilon(E_k)$	Секущие модули $\sigma/\varepsilon(E_c)$
1	$\sigma = \sigma_{bu} \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \right)^{\frac{1}{v}}$	$\frac{1}{v} \sigma_{bu} \frac{\varepsilon^{v-1}}{\varepsilon_{bu}^v}$	$\frac{\sigma_{bu}}{\varepsilon_{bu}} \varepsilon^{\frac{1}{v}-1}$
2	$\sigma = E_0 \varepsilon - \frac{E_0}{2\varepsilon_{eu}} \varepsilon^2$	$E_0 - 2 \frac{E_0}{2\varepsilon_{eu}} \varepsilon$	$E_0 - \frac{E_0}{2\varepsilon_{eu}} \varepsilon$
3	$\sigma = E_0 \varepsilon - \frac{E_0 - E_{bu}}{\varepsilon_{bu}} \varepsilon^2$	$E_0 - 2 \frac{E_0 - E_{bu}}{\varepsilon_{bu}} \varepsilon$	$E_0 - \frac{E_0 - E_{bu}}{\varepsilon_{bu}} \varepsilon$
4	$\sigma = E_0 \varepsilon - \frac{E_0}{3\varepsilon_{bu}^2} \varepsilon^3$	$E_0 - \frac{E_0}{\varepsilon_{bu}^2} \varepsilon^2$	$E_0 - \frac{E_0}{3\varepsilon_{bu}^2} \varepsilon^2$
5	$\sigma = E_0 \varepsilon - \frac{E_0 - E_{bu}}{\varepsilon_{bu}^2} \varepsilon^3$	$E_0 - 3 \frac{E_0 - E_{bu}}{\varepsilon_{bu}^2} \varepsilon^2$	$E_0 - \frac{E_0 - E_{bu}}{\varepsilon_{bu}^2} \varepsilon^2$
6	$\sigma = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{E_0} + \left( \frac{1}{E_{bu}} - \frac{1}{E_0} \right) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}}}$	$\frac{1}{\left[ \frac{1}{E_0} + \left( \frac{1}{E_{bu}} - \frac{1}{E_0} \right) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \right]^2}$	$\frac{1}{\frac{1}{E_0} + \left( \frac{1}{E_{bu}} - \frac{1}{E_0} \right) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}}}$
7	$\sigma = \frac{E_0 \varepsilon}{\sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \right)^2 \left[ \left( \frac{E_0}{E_{bu}} \right)^2 - 1 \right]}}$	$\frac{E_0}{\sqrt{\left\{ 1 + \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \right)^2 \left[ \left( \frac{E_0}{E_{bu}} \right)^2 - 1 \right] \right\}^3}}$	$\frac{E_0}{\sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \right)^2 \left[ \left( \frac{E_0}{E_{bu}} \right)^2 - 1 \right]}}$
8	$\sigma = E_0 \varepsilon \exp \left\{ - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \right\}$	$\frac{E_0 - \frac{E_0 \varepsilon}{\varepsilon_{bu}}}{\exp \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \right)}$	$E_0 \exp \left\{ - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \right\}$
9	$\sigma = E_0 \varepsilon \exp \left\{ - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \ln \frac{E_0}{E_{bu}} \right\}$	$\frac{E_0 - \frac{E_0 \varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \ln \frac{E_0}{E_{bu}}}{\exp \left\{ \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \ln \frac{E_0}{E_{bu}} \right\}}$	$E_0 \exp \left\{ - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \ln \frac{E_0}{E_{bu}} \right\}$
10	$\frac{\sigma}{\sigma_{bu}} = \frac{\frac{E_0}{E_{bu}} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \right)^2}{1 + \left( \frac{E_0}{E_{bu}} - 2 \right) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}}}$	$\frac{\frac{E_0}{E_{bu}} + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}^2} \left( \frac{E_0}{E_{bu}} - 2 \right)}{\left( 1 + \left( \frac{E_0}{E_{eu}} - 2 \right) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{eu}} \right)^2} \left( 1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \right)$	$\frac{\frac{E_0}{\varepsilon_{eu} E_{eu}} - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{eu}^2}}{1 + \left( \frac{E_0}{E_{eu}} - 2 \right) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{eu}}}$
11	$\sigma = \sigma_{eu} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{eu}} \right)^{\frac{E_0}{E_{eu}}} \right]$	$\frac{1}{\varepsilon_{bu}} \cdot \frac{E_0}{E_{bu}} \cdot \sigma_{eu} \left( 1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{eu}} \right)^{\frac{E_0}{E_{eu}} - 1}$	$\frac{E_0}{E_{eu}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{eu}} \right)^{\frac{E_0}{E_{eu}}} \right]$

Аппроксимирующие функции диаграмм деформирования дают возможность определить математические формулы для описания изменения касательных и секущих модулей деформации в зависимости от величины деформации, знание которых необходимо при расчёте изделий и элементов конструкций из физически нелинейных материалов.

Верификацию аналитических функций диаграмм деформирования производили методом сравнения диаграмм деформирования, полученных экспериментально и построенных по аппроксимирующим формулам путем проверки условия: если  $\varepsilon = \varepsilon_{bu}$ , то  $E_k = 0$ . Графическая интерпретация аналитических функций диаграмм деформирования представлена на рис. 2, 3.

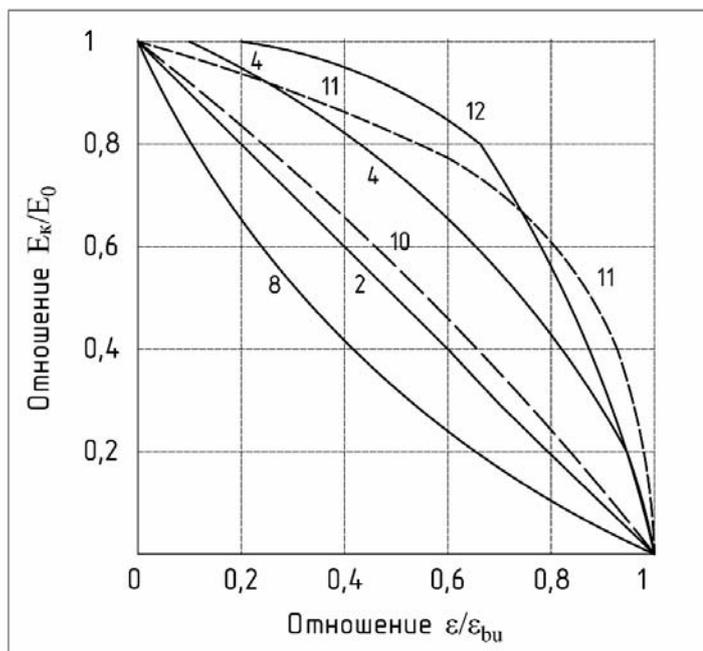


Рис. 2. Изменение касательного модуля деформаций в зависимости от  $\varepsilon / \varepsilon_{bu}$ .  
Номера графиков соответствуют табл. 2

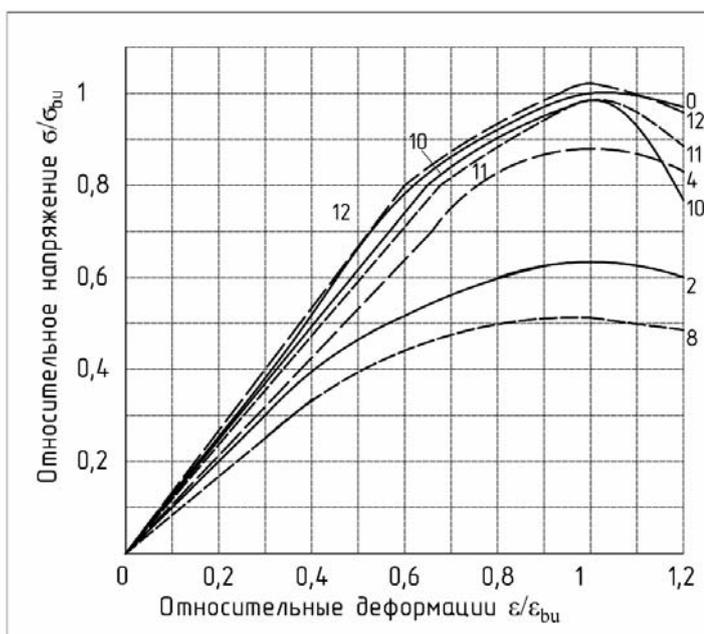


Рис. 3. Диаграмма деформирования в относительных координатах.  
Номера графиков соответствуют номерам функций в табл. 2

На первом этапе аппроксимирующие функции были проверены на соответствие условию, согласно которому производная от функции деформирования по  $\varepsilon$  должна быть равна 0 при  $\varepsilon = \varepsilon_{bu}$ . Этому граничному условию соответствуют функции: 2, 4, 8, 10, 11 (см. табл. 2 и рис. 2).

На втором этапе были построены диаграммы деформирования в относительных координатах  $\sigma / \sigma_{bu} \div \varepsilon / \varepsilon_{bu}$  (см. рис. 3). Из анализа графиков на рис. 3 следует, что аппроксимирующие функции 8, 2, 4 не соответствуют граничному условию, согласно которому если  $\varepsilon = \varepsilon_{bu}$ , то  $\sigma = \sigma_{bu}$ .

Функции 2, 4 являются степенными и из графиков на рис. 3 следует, что чем выше порядок степени, тем лучше аппроксимация. Для проверки этой гипотезы была проведена проверка функции пятой степени вида

$$\sigma_{12} = E_0 \varepsilon - \beta \varepsilon^5. \tag{1}$$

Применяя граничные условия из формулы (1), можно получить аппроксимирующую функцию вида

$$\sigma_{12} = E_0 \varepsilon - \frac{E_0}{5 \varepsilon_{bu}} \varepsilon^5. \tag{2}$$

Соответствующий касательный модуль деформирования  $E_k$  будет описываться функцией вида

$$E_k = E_0 - E_0 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \right)^4 = E_0 \left[ 1 - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \right)^4 \right]. \tag{3}$$

Диаграмма « $\sigma$ - $\varepsilon$ » (рис. 3 график 12), построенная с учетом экспериментальных данных (график 1 рис. 1) и функциональной зависимости (2), достаточно точно описывает экспериментальную кривую (0 на рис. 3). При построении графика 12 функцию 2 представили в относительных координатах  $\sigma / \sigma_{bu} \div \varepsilon / \varepsilon_{bu}$ :

$$\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{bu}} = \frac{E_0 \varepsilon}{E_{bu} \varepsilon_{bu}} \left[ 1 - \frac{1}{5} \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \right)^4 \right], \tag{4}$$

где  $E_0 = 30 \times 10^3$  Мпа;  $E_{bu} = 23$  Мпа определены по экспериментальным данным (график 1 рис. 1).

Функция (2) хорошо описывает диаграмму деформирования бетона благодаря тому, что соотношение  $E_0 / E_{bu} = 1,3$ . Также функция Ф.И. Герстнера удовлетворяет требованиям аппроксимации диаграмм деформирования цементного бетона благодаря соотношению  $E_0 / E_{bu} = 2$ .

Анализ диаграмм деформирования, представленных на рис. 1, показывает, что под действием агрессивных сред функциональная зависимость между напряжениями и относительными деформациями сохраняется; соотношение  $E_0 / E_{bu}$  можно принять равным 1,25 (см. табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Изменение во времени модуля упругости  $E_0$  и предельного значения секущего модуля деформаций  $E_{bu}$  при сжатии полиэфирного бетона под действием агрессивной среды

Показатель	Номер диаграммы по рис. 1/сутки					
	1/0	2/15	3/30	4/175	5/265	6/400
$E_0 \cdot 10^{-3}$	30	25	20	16	14	11
$E_{bu} \cdot 10^{-3}$	23	20	19	11,9	10,5	8
$E_0 / E_{bu}$	1,3	1,25	1,05	1,3	1,3	1,375
$E_{bu} / E_0$	0,77	0,8	0,95	0,74	0,75	0,73

Средние значения равны  $E_0/E_{bu} = 1,35$ ;  $E_{bu}/E_0 = 0,77$ .

Предлагаемый метод подбора аппроксимирующей функции дает возможность: определять параметры  $\alpha$  и  $\beta$  по результатам экспериментальных исследований свойств бетона склерометрическими методами; получать диаграммы деформирования бетона для любого микрообъема конструкции; изучать кинетику изменения диаграммы деформирования материала конструкции в процессе эксплуатации.

### Список литературы

1. Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. – Изд. 2, испр. и доп. – М., 1968. – 512 с.
2. Соломатов, В.И. Химическое сопротивление материалов / В.И. Соломатов, В.П. Селяев, Ю.А. Соколова. – М.: РААСН, 2001. – 284 с.
3. Селяев, В.П. Физико-химические основы механики разрушения цементных композитов / В.П. Селяев, П.В. Селяев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. – 220 с.
4. Федоров, В.С. Основы обеспечения пожарной безопасности зданий / В.С. Федоров. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004. – 176 с.
5. Мурашкин, Г.В. Моделирование диаграммы деформирования бетона / Г.В. Мурашкин, В.Г. Мурашкин // Изв. Орл. гос. техн. ун-та. Сер. Строительство. Транспорт. – 2007. – № 3/15. – С. 86 – 88.
6. Ржаницын, А.Р. Составные стержни и пластинки / А.Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1986. — 316 с.
7. Елистратов, В.Н. Учет физической нелинейности бетона при расчете сжатых железобетонных элементов / В.Н. Елистратов // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: материалы 15-й междунар. науч.-техн. конф., г. Саранск, 26-28 дек. 2016 г. / МГУ им. Н. П. Огарева. – Саранск, 2016. – С. 302–306.
8. Давыдов, С.С. Проектирование бетонных и железобетонных конструкций / С.С. Давыдов. – М., 1939. – 148 с.
9. Иванов, А.М. Применение пластмасс в строительных конструкциях и частях зданий / А.М. Иванов, Д.В. Мартинец, В.И. Мартемьянов, К.Я. Алгазинов. – М.: Высшая школа. 1965. – 312 с.
10. Чебаненко, А.И. Армополимербетонные строительные конструкции / А.И. Чебаненко. – М.: Стройиздат, 1988. – 440 с.

### References

1. Bezukhov, N.I. Fundamentals of the theory of elasticity, plasticity and creep / N.I. Bezukhov. – Ed. 2, rev. and add. – M., 1968. – 512 p.
2. Solomatov, V.I. Chemical resistance of materials / V.I. Solomatov, V.P. Selyaev, Yu.A. Sokolova. – M.: RAASN, 2001. – 284 p.
3. Selyaev, V.P. Physicochemical foundations of fracture mechanics of cement composites / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev. – Saransk: Publishing house of Mordovs. University, 2018. – 220 p.
4. Fedorov, V.S. Fundamentals of ensuring fire safety of buildings / V.S. Fedorov. – M.: Publishing house of the Association of building universities, 2004. – 176 p.
5. Murashkin, G.V. Modeling of concrete deformation diagram / G.V. Murashkin, V.G. Murashkin // Izv. Eagle. state tech. un-that. Ser. Building. Transport. – 2007. – №. 3/15. – P. 86–88.
6. Rzhantsyn, A.R. Composite rods and plates / A.R. Rzhantsyn.– M.: Stroyizdat, 1986. – 316 p.
7. Elistratov, V.N. Accounting for physical nonlinearity of concrete when calculating compressed reinforced concrete elements / V.N. Elistratov // Topical issues of architecture and construction: materials of the 15th international. scientific and technical Conf., Saransk, December 26-28. – 2016 / Moscow State University N.P. Ogareva. – Saransk, 2016. – P. 302–306.

8. Davydov, S.S. Design of concrete and reinforced concrete structures / S.S. Davydov. – М., 1939. – 148 п.
9. Иванов, А.М. The use of plastics in building structures and parts of buildings / А.М. Иванов, D.V. Martinets, V.I. Martemyanov, К. Ya. Algazinov. – М.: Higher school, 1965. – 312 п.
10. Chebanenko, A.I. Armopolymer concrete building structures / A.I. Chebanenko. – М.: Stroyizdat, 1988. – 440 п.

УДК 69.04

*Национальный исследовательский  
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,  
академик РААСН  
E-mail: ntorm80@mail.ru

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

**Горенков Александр Олегович**,  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: alexandr.gorenckov@yandex.ru

**Безрукова Евгения Сергеевна**,  
аспирант  
E-mail: eugenia.bezr@gmail.com

**Кечуткина Евгения Львовна**,  
инженер  
E-mail: kechytkina85@mai.ru

*National Research Ogarev Mordovian 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 Sciences, Professor, Academician of  
the Russian Academy of Architectural and  
Construction Sciences  
E-mail: ntorm80@mail.ru

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

**Gorenkov Alexander Olegovich**,  
Postgraduate of the department «Building  
structures»  
E-mail: alexandr.gorenckov@yandex.ru

**Bezrukova Evgenia Sergeevna**,  
Postgraduate  
E-mail: eugenia.bezr@gmail.com

**Kechytkina Evgenya Lvovna**,  
Engineer  
E-mail: kechytkina85@mai.ru

## ФРАКТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА С УЧЕТОМ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА СТРУКТУРЫ

В.П. Селяев, П.В. Селяев, А.О. Горенков, Е.С. Безрукова, Е.Л. Кечуткина

Рассматривается возможность описания масштабного эффекта на основе фрактальной геометрии Б. Мандельброта. На основе гипотезы о масштабной инвариантности структуры разработана фрактальная модель, согласно которой прочность материала зависит от размера дефектов, масштабного фактора и фрактальной размерности. Предложен новый способ определения фрактальной размерности, как характеристики однородности, внутреннего порядка структуры материала.

Приведены результаты анализа экспериментальных данных, опубликованных в научной литературе, которые подтверждают адекватность модели.

*Ключевые слова: фрактал, модель, бетон, разрушение, фрактальная размерность, прочность, структура, дефект*

## FRactal Model of Concrete Strength Taking into Account the Scale Effect of the Structure

V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, A.O. Gorenkov, E.S. Bezrukova, E.L. Kechutkina

This article discusses the possibility of describing a large-scale effect based on B. Mandelbrot's fractal geometry. Based on the hypothesis of scale invariance of the structure, a fractal model has been developed, according to which the strength of the material depends on the size of the defects, scale factor, and fractal dimension. A new method is proposed for determining fractal dimension as a characteristic of homogeneity, the internal order of the structure of the material.

The results of experimental data analysis published in scientific literature are given. They confirm the adequacy of the model.

*Keywords: fractal, model, concrete, fracture, fractal dimension, strength, structure, defect*

Прочность бетона обычно определяют в лабораторных условиях на образцах малых размеров по сравнению с действительными конструкциями. Эти данные используют для определения расчетных и нормативных сопротивлений бетона, для расчета элементов зданий и сооружений.

Однако экспериментально установлено, что существует расхождение прочностных свойств, определенных для конкретных конструкций и путем испытания стандартных образцов. Это явление объяснили масштабным эффектом. Очевидно, что проявление масштабного эффекта влияет на надежность, долговечность строительных конструкций и его следует учитывать в процессе расчета и конструирования зданий и сооружений. Для этого необходимо объяснить физическую сущность этого явления и предложить аналитические методы, позволяющие учитывать масштабный эффект при проектировании строительных конструкций.

В соответствии с законом подобия, установленным В. Кирпичевым [1], геометрически подобные тела из одинакового материала, изготовленные и испытанные в одинаковых условиях, должны иметь одинаковую прочность [2, 3]. Однако многочисленные экспериментальные исследования показали, что прочность геометрически подобных образцов может зависеть от их размеров. Это явление названо масштабным эффектом [4–11]. Природу масштабного эффекта объясняют прежде всего наличием дефектов в объеме и на поверхности твердых тел.

Иоффе А.Ф. [5], Александров А.П., Журков С.Н. [6] объясняют природу масштабного эффекта наличием дефектов, которые провоцируют склонность материала к хрупкому разрушению.

Одинг И.А. [8] считает, что проявление масштабного эффекта зависит от технологии изготовления образцов различных размеров.

Статистическая природа масштабного эффекта, основанная на модели слабого звена, рассматривается в работах W.A. Weibull, В.В. Болотина [7, 11].

Черепанов Г.П. [9] объясняет наличие масштабного эффекта размерами и количеством структурных элементов, образующих объем образца.

Кайфман М.И. [4] предложил различать масштабные эффекты двух видов: объемный, связан со структурной неоднородностью в объеме; поверхностный, связан с качеством обработки поверхности.

Предложено несколько аналитических функций, описывающих зависимость прочности  $R$  от масштабного размера (объема –  $v$ , диаметра –  $d$ ).

Вейбулл В. предложил в 1939г. функцию вида:

$$R = \sigma_0 + \sigma_s \left( \frac{V_0}{V} \right)^{\frac{1}{2}} \left( 1 + \frac{1}{\alpha} \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – const материала (минимальная прочность);  $\sigma_s$  – const напряженного состояния;  $\alpha$  – характеристика степени однородности материала.

Болотин В.В. развил модель В. Вейбулла и предложил функцию вида:

$$R_{ba} = R_{ba0} \left[ a + b \left( \frac{V_0}{V} \right)^{1/\beta} \right]; \quad (2)$$

здесь  $R_{ba}$ ,  $R_{ba0}$  – прочность образца объемом  $V$  и стандартного  $V_0$ ;  $a$ ,  $b$  и  $\beta$  – эмпирические коэффициенты.

Александров А.П. и Журков С.Н. для прочности волокон диаметром  $d$  предложили функцию вида:

$$R = a + v / d. \quad (3)$$

Конторова Т.А., Френкель Я.И. предложили для образцов:

$$\text{– малого размера} \quad R = a + b / V; \quad (4)$$

$$- \text{большого размера} \quad R = R_0 - \sqrt{A \lg V - B}. \quad (5)$$

Протодеяконов М.М. для описания масштабного эффекта горных пород предложил функцию:

$$R = R_m (d + mb) / (d + b), \quad (6)$$

где  $R_m$  – прочность трещиноватого массива;  $d, b$  – эмпирические коэффициенты;  $m$  – коэффициент трещиноватости;  $d$  – диаметр образца.

Недостатком приведенных функций является то, что они получены из анализа моделей, не отражающих структурные и механические особенности строения и свойств материала.

Современные представления о принципах строения структуры сложных систем, основанные на аксиомах фрактальной геометрии природы, дают возможность описать масштабный эффект с учетом объективных детерминированных показателей свойств материала.

Мандельброт Б. в основу фрактальной геометрии природы заложил две аксиомы – о многомасштабности строения структуры сложных систем и о подобии структур на каждом масштабном уровне. Объективной оценкой подобия структур является фрактальная размерность  $D$ . Основным закон Мандельброта записывается в виде функции:

$$L_i = L_0 \chi^{d-D},$$

где  $L_i$  – характеристика структуры на  $i$ -м масштабном уровне;  $L_0$  – значение характеристики в евклидовой системе;  $d$  – размерность в евклидовом пространстве;  $D$  – фрактальная размерность.

Представим структуру бетона в виде фрактальной системы из структурных элементов, в каждом из которых содержится дефект – трещина длиной  $\ell_i$ . Разрушение структурного элемента происходит при растяжении (1) и при сжатии (2) при выполнении условий соответственно:

$$1) \ell_1 = \ell_0; \alpha = 90^\circ; \quad 2) \ell_2 = \ell_0; \alpha = 45^\circ;$$

где  $\ell_0$  – длина трещины разрушения, которая зависит от технологии изготовления бетона, крупности заполнителя, условий хранения и эксплуатации изделия;  $\alpha$  – угол между осью трещины и силовыми линиями.

Так как трещина формируется в композите с фрактальной структурой, её длина будет равна:

$$\ell_0(a) = \ell_0 a^{d-D}, \quad (8)$$

где  $a$  – масштабный уровень структуры.

Тогда из анализа фрактальной модели Гриффитса [12] получим:

$$R_{btia} = \frac{k_{1i}}{\sqrt{0,5\pi\ell_{0i}}} \alpha_i^{(1-D)}, \quad (9)$$

$$R_{bia} = \frac{4k_{2i}}{\sqrt{0,5\pi\ell_{0i}}(1-\gamma)} \alpha_i^{(1-D)}, \quad (10)$$

где  $k_{1i}, k_{2i}$  – коэффициенты интенсивности напряжений при растяжении (1), сдвиге (2) бетона на  $i$ -м масштабном уровне  $d=1$ .

Предполагаем, что на стандартном масштабном уровне  $\alpha_0$  прочность при растяжении и сжатии определяется соответствующими функциями:

$$R_{btio} = \frac{k_{1i}}{\sqrt{0,5\pi\ell_{0i}}}; R_{btio} = \frac{4k_{2i}}{\sqrt{0,5\pi\ell_{0i}}(1-\gamma)}. \quad (11)$$

Масштабный уровень  $\alpha_i$  представим отношением  $\alpha = V_i / V_0$ , где  $V_i, V_0$  – геометрические характеристики  $i$ -го и стандартного  $i=0$  масштабного уровня. Тогда зависимость прочности от масштабного фактора будем выражать функциями вида:

$$R_{btia} = R_{btio} \left( \frac{V_i}{V_0} \right)^{0,5(1-D)}; R_{bia} = R_{bio} \left( \frac{V_i}{V_0} \right)^{0,5(1-D)}. \quad (12)$$

Полученные формулы дают возможность оценить прочность бетона при растяжении и сжатии на каждом  $i$ -м масштабном уровне с учетом: размеров характерного дефекта (длины трещины  $\ell_{0i}$ ); структуры (образца); параметра структурной неоднородности (фрактальная размерность  $D$ ); геометрических масштабных характеристик  $\alpha$  образцов (объем –  $V$ ; диаметр –  $d$ ; длина –  $L$ ).

Если принять в качестве стандартного образца кубик с размером ребра  $L=15$  см и фрактальную размерность  $D=1,5$  (по результатам экспериментальных исследований), то прочность на сжатие при условии  $V_0 = L = 15$ ;  $V_i = L_i$  будет определяться по формуле

$$R_{bia} = R_{bio} \cdot 1,97L_i^{-0,25}; R_{bio} = R_b \quad (13)$$

Если принять  $L_0 = 10$  см, то имеем

$$R_{bia} = R_b (10) \cdot 1,75 \cdot L_i^{-0,25} \quad (14)$$

Результаты определения прочности кубов из цементных композитов в зависимости от размера ребра приведены в таблице. Прочность на сжатие определялась по формулам (2), (13), (14).

Изменение прочности  $R_{bia} / R_{bi0}$  кубов из цементных композитов в зависимости от размеров ребра (масштабного эффекта)

N п/п	$R_{bia} / R_{bi0}$ Вид и номер формулы	Размеры куба, см.							
		0,00 1	0,01	0,1	1,0	10	15	20	40
1	$1,97L_i^{-0,25}$ (13)	11,1	6,23	3,5	1,97	1,1	1,0	0,93	0,788
2	$1,75L_i^{-0,25}$ (14)	10,0	5,6	3,16	1,77	1,0	0,89	0,84	0,7
3	$0,58 + 0,42 \left( \frac{V_0}{V} \right)^{\frac{1}{3}}$ (2)	8,98	4,68	2,48	1,48	1,0	0,86	0,79	0,685
4	$1,97L_i^{-0,5}$	650	19,7	6,15	1,97	0,62	0,51	0,44	0,3

Болотиным В.В. приведены результаты анализа экспериментальных данных, полученных Эмпергером, Бухгарцем, Гувером, Г.Д. Цискрелы [11], и определены значения коэффициентов  $a = 0,58$ ,  $b = 0,42$  в уравнении (2). На рис. 1 и в таблице представлены значения относительной прочности, полученные по этой формуле. Срав-

нение результатов вычислений прочности по формулам (2), (13), (14) показывает, что они хорошо совпадают в диапазоне изменения ребра кубика от 10 до 40 см.

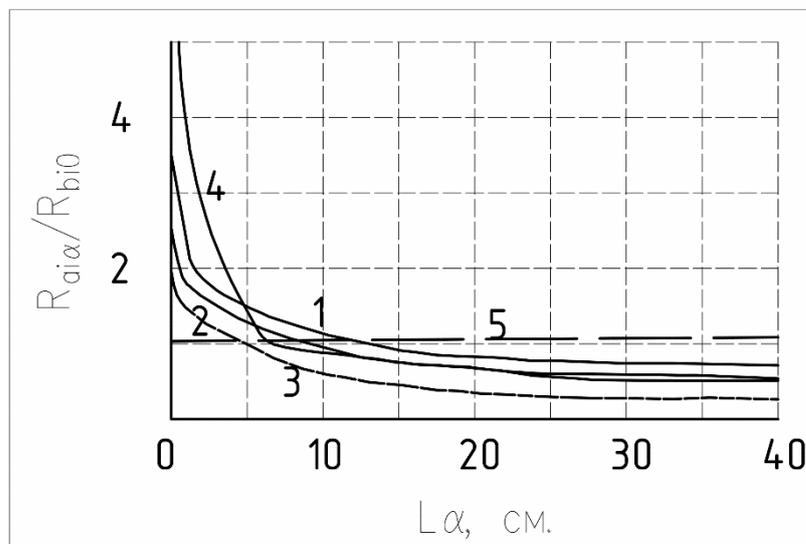


Рис. 1. Зависимость прочности от размеров куба:  
1 – по формуле (13); 2 – по формуле (14); 3 – по формуле (2);  
4 – по формуле (12) при  $D=2$ ,  $V_0 = L_0 = 15$  см; 5 – по формуле (12) при  $D=1$

В формулах (12) однородность структуры материала оценивается фрактальной размерностью, значения которой зависят от принятой модели – линейной, плоской, объемной; от однородности структуры материала.

В предложенной модели  $1 < D < 2$ , если  $D = 1$ , то структура материала однородна и прочность не зависит от масштабного фактора, если  $D=2$ , то масштабный фактор проявляется более сильно (см. рис.1, строка 4).

В работе Г.Ф. Бабнюк, В.Ф. Пунтус [13] приведены экспериментальные данные о проявлении масштабного эффекта при оценке прочности модельных материалов, которые представляют собой цементные композиты с наполнителем из горелой земли, песка и гипса. Были испытаны образцы в виде призмы, цилиндров, кубов различных размеров и предложена аппроксимирующая функция вида:

$$y = a \frac{x+b}{x-c}. \quad (15)$$

Результаты (рис. 2), полученные в ходе эксперимента [13], были обработаны с применением аппроксимирующих функций (12) и (15). Установлено: результаты эксперимента, представленные в двойных логарифмических координатах, хорошо ложатся на прямую (рис. 3) при фрактальной размерности  $D=1,4$ ; фрактальную размерность можно определить по формуле  $D = \Delta \log \left( \frac{R_i}{R_0} \right) / \Delta \log \left( \frac{L_i}{L_0} \right)$ ; аппроксимирующая функция (12) достаточно точно описывает экспериментальные данные; функция (15) предполагает наличие затухающего характера падения прочности с увеличением размеров образцов, что не всегда подтверждается экспериментальными данными [14].

В работе Ильницкой Е.И. [14] приведены результаты испытаний образцов горных пород: габбро, мрамора, туфа. Были испытаны образцы: цилиндры с различной площадью поперечного сечения, высота которых принималась равной  $h = 2\sqrt{F}$ . Результаты эксперимента приведены на рис. 4. Обработка результатов эксперимента в двойных логарифмических координатах (рис. 5) позволила определить фрактальную размерность, характеризующую структуру габбро, мрамора, туфа, которая равна соответственно 1,24, 1,25, 1,6.

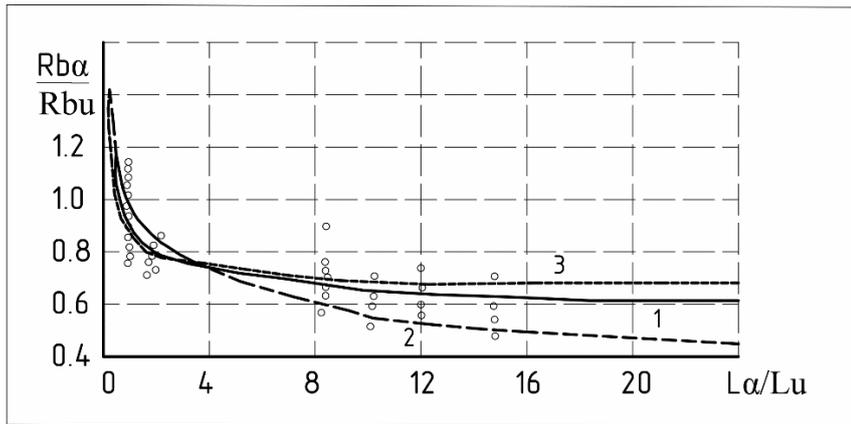


Рис. 2. Изменение прочности от масштабного эффекта:  
1 – экспериментальные данные (13), 2 – по формуле (12), 3 – по формуле (15)

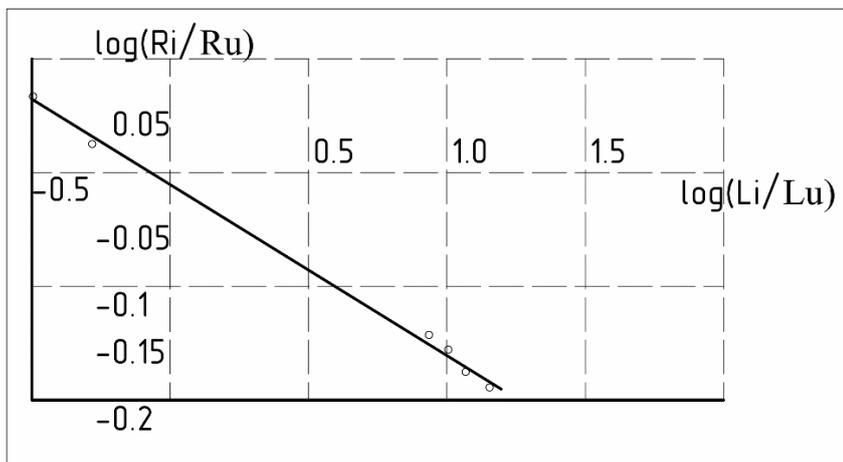


Рис. 3. Линеаризация экспериментальных данных в двойных логарифмических координатах в соответствии с функцией (12)

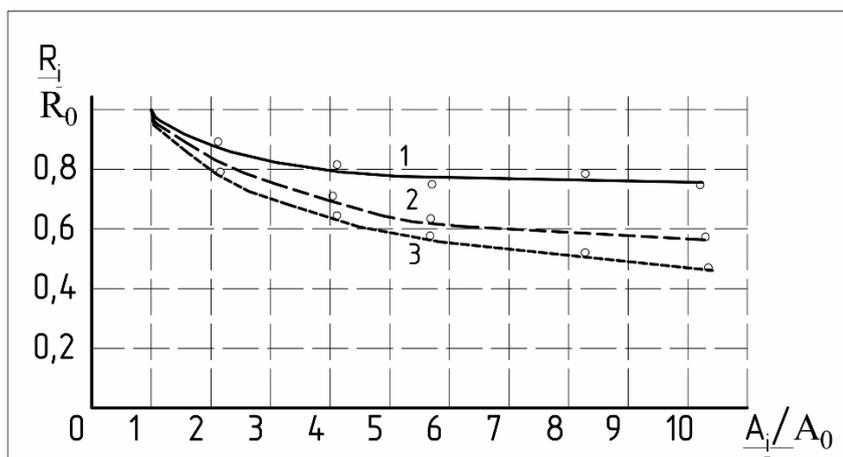


Рис. 4. Изменение прочности при сжатии габбро (1), мрамора (2), туфа (3) с учетом изменения площади поперечного сечения образцов

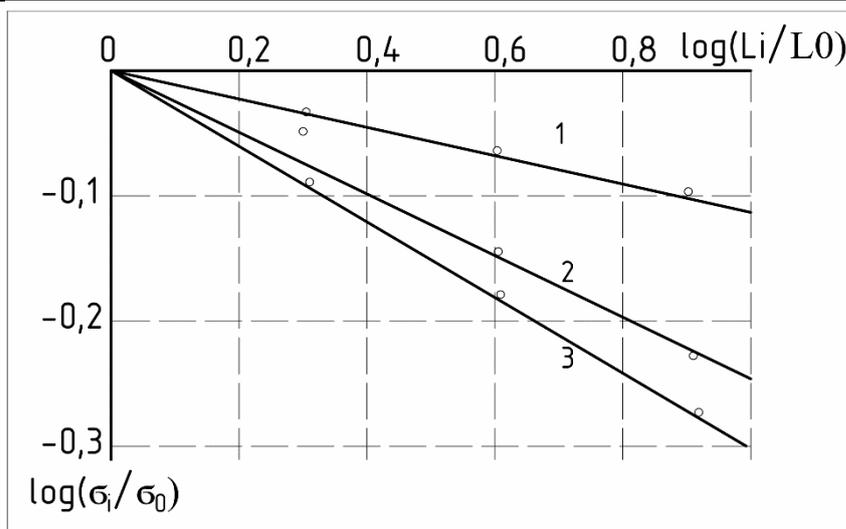


Рис. 5. Линеаризация графиков на рис. 4, габбро (1), мрамор (2), туф (3)

Так как фрактальная размерность является характеристикой беспорядка (неоднородностей) в структуре материала и меняется в пределах  $1 < D < 2$ , то можно заключить, что наиболее однородную структуру имеют образцы из габбро, наиболее дефектная структура у туфа.

Применяя функции (12) с учетом соответствующих значений  $D$ , производили сопоставление экспериментальных и расчетных данных изменения прочности горных пород с увеличением площади поперечного сечения, которое показало хорошую сходимость.

**Вывод.** Показана возможность объяснения масштабного эффекта на основе фрактальной геометрии Б. Мандельброта. Установлено, что физическая сущность масштабного эффекта заключается в масштабной инвариантности строения структуры на каждом масштабном уровне структуры бетона, следовательно, подобны и свойства. Экспериментальные данные, опубликованные в научной литературе, подтверждают адекватность предложенной модели не только для бетона, но и для горных пород. Предложен новый способ определения фрактальной размерности, основанный на экспериментальных данных испытаний образцов различных размеров.

#### Список литературы

1. Кирпичев, В.П. О подобии при упругих явлениях / В.П. Кирпичев // Записки Русского технического общества. – 1876. – №3. – С. 162–165.
2. Давыденков, Н.Н. Некоторые проблемы механики материалов / Н.Н. Давыденков. – М.: Газетно-журнальное издательство, 1943. – 312 с.
3. Bamschinger J. Mitt. Mech-Techn. Laboratorium D.Techn. Schule. – Munchen, 1884. – 150 p.
4. Кайфман, М.И. Главный масштабный эффект в горных породах и углях / М.И. Кайфман // Проблема механизации горных работ. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – С. 39-56.
5. Иоффе, А.Ф. Деформация и прочность кристаллов / А.Ф. Иоффе, М.В. Кирпичев, А.И. Левитская // Журнал русского физико-химического общества. – 1924. – №2. – С. 286–293.
6. Александров, А.П. Явление хрупкого разрыва / А.П. Александров, С.Н. Журков. – М.: ГТТИИ, 1933. – 51 с.
7. Weibull, W.A.A. Statistical theory of strength of materials / W.A.A. Weibull // Ing. Vetenskaps akad. Hand. – 1939. – №151. – P. 55–62.
8. Одинг, И.А. Допустимые напряжения в машиностроении и циклическая прочность материалов / И.А. Одинг. – М.: Машгиз., 1947. – 184 с.

9. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
10. Протоdjяконов, М.М. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве / М.М. Протоdjяконов, С.Е. Чирков. – М.: Наука, 1964. – 69 с.
11. Болотин, В.В. Статистические методы в строительной механике / В.В. Болотин. – М.: Наука, 1961. – 202 с.
12. Селяев, В.П. Физико-химические основы механики разрушения цементных композитов / В.П. Селяев, П.В. Селяев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. – 220 с.
13. Шашенко, А.Н. Масштабный эффект в горных породах / А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвйткова, С.В. Крушель. – Донецк: Норд-Пресс, 2004. – 126 с.
14. Ильницкая, Е.И. Влияние масштабного фактора на прочностные свойства горных пород / Е.И. Ильницкая. – М.: Изд-во АН СССР, 1972.

### References

1. Kirpichev, V.P. On similarity in elastic phenomena / V.P. Kirpichev // Notes of the Russian Technical Society. – 1876. – №. 3. – P. 162–165.
2. Davydenkov, N.N. Some problems in material mechanics / N.N. Davydenkov. – М.: Newspaper and magazine publishing house, 1943. – 312 p.
3. Bamschinger J. Mitt. Mech-Techn. Laboratorium D. Techn. Schule. – Munchen, 1884. – 150 p.
4. Kaifman, M.I. The main large-scale effect in rocks and coals / M.I. Kaifman // Problem of mining mechanization. – М.: Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1963. – P. 39–56.
5. Ioffe, A.F. Deformation and strength of crystals / A.F. Ioffe, M.V. Kirpichev, A.I. Levitskaya // Journal of the Russian Physico-Chemical Society. – 1924. – №. 2. – P. 286–293.
6. Alexandrov, A.P. The phenomenon of fragile rupture / A.P. Alexandrov, S.N. Zhurkov. – М.: GTTI, 1933. – 51 p.
7. Weibull, W.A.A. Statistical theory of strength of materials / W.A.A. Weibull // Ing. Vetenskaps akad. Hand. – 1939. – №. 151. – P. 55–62.
8. Oding, I.A. Allowable stresses in mechanical engineering and cyclic strength of materials / I.A. Oding. – М.: Mashgiz, 1947. – 184 p.
9. Cherepanov, G.P. Brittle fracture mechanics / G.P. Cherepanov. – М.: Nauka, 1974. – 640 p.
10. Protodyakonov, M.M. Fracturing and strength of rocks in the massif / M.M. Protodyakonov, S.E. Chirkov. – М.: Nauka, 1964. – 69 p.
11. Bolotin, V.V. Statistical methods in structural mechanics / V.V. Bolotin. – М.: Nauka, 1961. – 202 p.
12. Selyaev, V.P. Physicochemical foundations of fracture mechanics of cement composites / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev. – Saransk: Publishing house of Mordovs. University, 2018. – 220 p.
13. Shashenko, A.N. Scale effect in rocks / A.N. Shashenko, E.A. Sdvtikova, S.V. Krushel-Donetsk: Nord-Press, 2004. – 126 p.
14. Ilitskaya, E.I. The influence of the scale factor on the strength properties of rocks / E.I. Ilitskaya. – М.: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1972.

УДК 624.04

*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

**Монахов Владимир Андреевич,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Механика»  
E-mail: monahovnn@mail.ru

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

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Monakhov Vladimir Andreevich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Mechanics»  
E-mail: monahovnn@mail.ru

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

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНФИГУРАЦИИ СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ВНЕШНЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В.А. Монахов, М.Б. Зайцев

Предлагается алгоритм построения конфигурации механической модели стержневой системы, полученной при её дискретизации. Описание топологической структуры модели в исходном положении базируется на формировании графа модели и сопутствующей ему матрицы инцидентности. Композиция матричного преобразования векторов узловых перемещений при переходе от глобальных координат к локальным в сочетании с расширенной матрицей инцидентности позволяет установить приращения перемещений каждого конечного элемента в направлении оси элемента и перпендикулярном ей. Зная последние, несложно определить углы наклона каждого конечного элемента, а также сосредоточенные изгибные деформации в расчетных сечениях стержневой системы в зависимости от узловых перемещений при заданной нагрузке, сформировав тем самым геометрическую матрицу. Пользуясь полученной матрицей, можно выполнять численные расчёты стержневых систем по прочности и несущей способности.

*Ключевые слова: стержневая система, конфигурация модели, конечные элементы, граф рамы, матрица инцидентности, вектор узловых перемещений, перекосы элементов, геометрическая матрица*

## METHOD FOR DETERMINING CONFIGURATION OF THE ROD SYSTEM UNDER EXTERNAL INFLUENCE

V.A. Monakhov, M.B. Zaytsev

An algorithm for constructing a configuration of a mechanical model of a rod system obtained during its discretization is proposed. A description of the topological structure of the model in the initial position is based on the formation of the model graph and its accompanying incidence matrix. The composition of the matrix transformation of node displacement vectors in the transition from global to local coordinates in combination with an extended incidence matrix allows to set the increments of movements of each finite element in the direction of the element axis and perpendicular to it. Knowing it, it is easy to determine the angles of inclination of each finite element, as well as the concentrated bending deformations in the calculated cross sections of the rod system, depending on the nodal displacements at a given load, thus forming a geometric matrix. Using the resulting matrix, you can perform numerical calculations of rod systems for strength and load-bearing capacity.

*Keywords: rod system, model configuration, finite elements, frame graph, incidence matrix, nodal displacement vector, element skew, geometric matrix*

Известно, что определение внутренних усилий и перемещений в элементах стержневых систем в матричной форме при статических расчетах, а также расчетах на устойчивость, динамических и т.д. связано с формированием матриц состояния [1, 2]. На основе принципа двойственности  $V \equiv H^T \equiv \Lambda^{-1}$ , где  $V$  – матрица уравнений равновесия,  $H$  – геометрическая матрица,  $\Lambda$  – матрица влияния изгибающих моментов, для численного анализа напряжённо-деформированного состояния стержневых систем достаточно сформировать одну из них.

Поставим задачу формирования в автоматическом режиме геометрической матрицы  $H$  для определения конфигурации стержневой системы при внешнем воздействии.

Представляя упругую стержневую систему в виде связанного в местах дискретизации (узлах) набора ограниченного числа конечных элементов (КЭ) (рис. 1,а), схему перемещений модели механической системы можно описать матричным соотношением  $\bar{\gamma} = \Gamma \bar{\zeta}$ , где  $\bar{\gamma}$  – вектор-столбец, состоящий из шести пар абсолютных удлинений  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) и перекосов  $\chi_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) элементов,  $\Gamma$  – матрица преобразования перемещений,  $\bar{\zeta}$  – вектор-столбец узловых линейных перемещений в горизонтальном и вертикальном направлениях в каждом узле в глобальной системе координат  $\eta\Omega\theta$  (рис. 1,б); порядок вектора  $\bar{\zeta}$  равен удвоенному числу узлов принятой дискретной модели стержневой системы.

После того как для стержневой системы установлено преобразование  $\Gamma$ , то несложно перейти к геометрической матрице  $H$ , связывающей, в частности, вектор обобщённых деформаций  $\bar{\omega}$ , составленный из 6 пар продольных  $\varepsilon_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) и изгибных  $\chi_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) деформаций КЭ, сосредоточенных в узлах согласно  $\bar{\omega} = H \bar{\zeta}$ . Матрица  $H$ , очевидно, определяет конфигурацию стержневой системы в деформированном состоянии. Формирование матрицы  $H$  обычно осуществляется в общем случае вручную статическим или кинематическим способом [2, 3].

В рассматриваемой статье предлагается выполнять построение матрицы в автоматическом режиме с применением ПЭВМ. С этой целью топологическая структура механической модели описывается с помощью её графа, с вершинами которого ассоциируются конечные элементы, а с дугами – «узлы», т. е. расчётные сечения, в которых отыскиваются деформации (рис. 1,в) [3]. Ориентация графа определяется выбором направлений дуг графа [4]. Далее составляется матрица инцидентности, соответствующая данному графу:

$$S_{(6 \times 9)} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

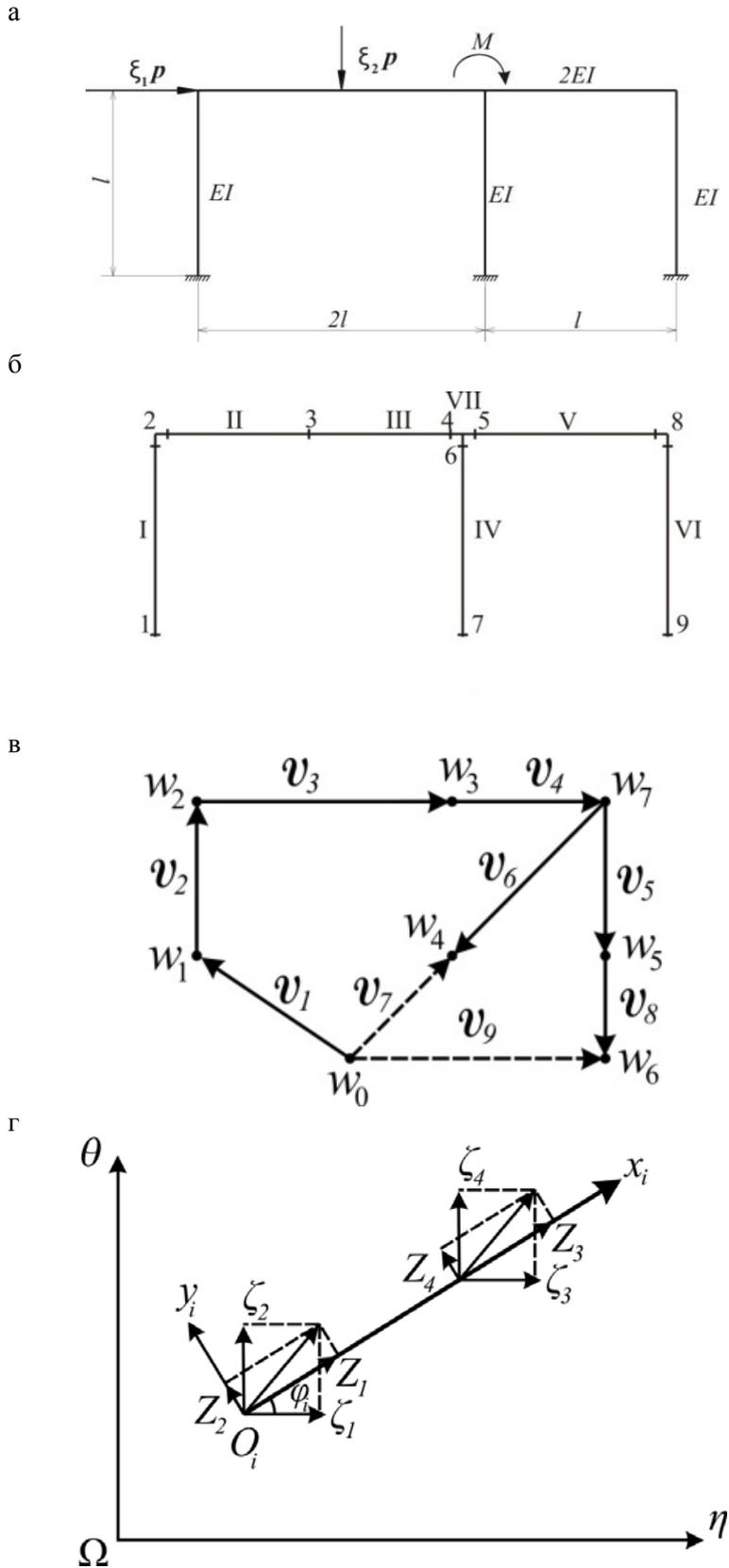


Рис. 1. Заданная стержневая система:  
 а – расчётная схема рамы; б – дискретная модель рамы; в – граф модели;  
 г – обозначение перемещений в глобальной и локальной системах координат



$$G_{(6 \times 14)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Принимая во внимание ещё и неподвижность опор ( $\zeta_1 = \zeta_2 = \zeta_9 = \zeta_{10} = \zeta_{13} = \zeta_{14} = 0$ ), в матрице  $G_{(6 \times 14)}$  следует опустить также два крайних столбца с каждой стороны и ещё два – девятый и десятый – из середины; кроме того, необходимо убрать и пятый столбец – вследствие непрерывности ригеля в третьем сечении. Таким образом, остаётся прямоугольная матрица размером 6 на 7

$$G_{0(6 \times 7)} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Данная матрица позволяет найти *перекосы стержней* в зависимости от узловых линейных перемещений  $\bar{\zeta}$ , а именно  $\bar{\chi}_{(6)} = G_{0(6 \times 7)} \bar{\zeta}_{(7)}$ . Здесь компонентами вектора  $\bar{\zeta}_{(7)}$  являются узловые перемещения  $\zeta_3, \zeta_4, \zeta_6, \zeta_7, \zeta_8, \zeta_{11}, \zeta_{12}$ . В результате умножения матрицы  $G_{0(6 \times 7)}$  на диагональную матрицу, обратную матрице длин элементов  $L_{(6 \times 6)}$ , находят матрицу тангенсов углов поворота элементов. Ограничиваясь малыми перемещениями стержневой системы, можно считать её матрицей углов поворота и обозначить  $A_{(6 \times 7)}$ . Затем умножив транспонированную матрицу инцидентности  $S_{(9 \times 6)}^T$  на матрицу  $A_{(6 \times 7)}$ , несложно определить разницу углов поворота смежных элементов в каждом узле рамы

$$H_{0(9 \times 7)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{l}.$$

Поскольку осевые деформации ригеля не учитываются, то, очевидно,  $\zeta_3 = \zeta_7 = \zeta_{11}$ , и тогда можно совместить 4 и 6 столбцы с первым. Игнорируя также продольные деформации в стойках, из этой матрицы следует исключить 2, 5 и 7 столбцы. В итоге матрица  $H_0$  сокращается до двух столбцов (см. ниже первые два

столбца матрицы  $H$ ). Дополнив её третьим столбцом, соответствующим вращению среднего узла на угол  $\vartheta_3 = 1$ , формируют геометрическую матрицу:

$$H_{(9 \times 3)} = \begin{bmatrix} 1/l & 0 & 0 \\ -1/l & -1/l & 0 \\ 0 & 2/l & 0 \\ 0 & -1/l & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1/l & 0 & 1 \\ -1/l & 0 & 0 \\ 1/l & 0 & 0 \\ 1/l & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

с помощью которой находят сосредоточенные деформации изгиба в узлах стержневой системы по формуле  $\bar{\mathbf{x}}_{(9)} = H_{(9 \times 3)} \bar{\mathbf{\vartheta}}_{(3)}$ ; здесь  $\bar{\mathbf{\vartheta}}_{(3)} = (\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3)^T$  – вектор узловых перемещений в новых обозначениях, где  $\vartheta_1 = \zeta_3$ ,  $\vartheta_2 = \zeta_6$ .

Следует отметить, что угол  $\vartheta_3$ , наряду с линейными перемещениями  $\vartheta_1, \vartheta_2$ , направления которых совпадают с направлениями внешних сил  $\xi_1 p, \xi_2 p$ , относится к независимым перемещениям рассматриваемой стержневой системы (рис. 2, а, б).

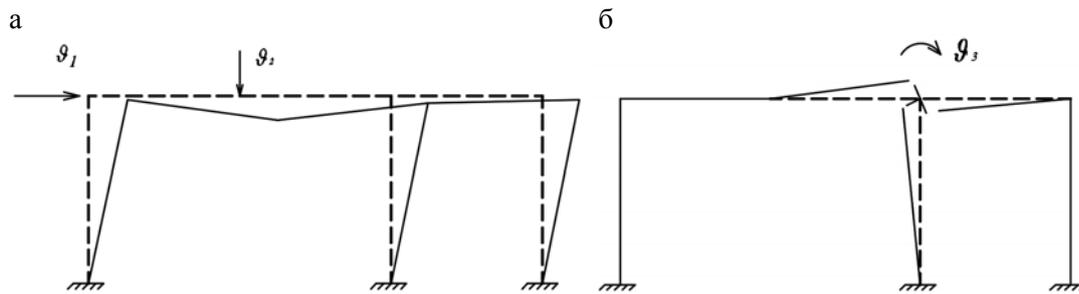


Рис. 2. Схема деформаций стержневой системы:  
а – от линейных перемещений узлов; б – при повороте среднего узла на угол  $\vartheta_3$

### Выводы

1. Представлена методика построения конфигурации механической модели стержневой системы, полученной на основе геометрической матрицы, сформированной в автоматическом режиме.
2. Полученная матрица позволяет определять НДС стержневых систем при расчетах на прочность, устойчивость [4-5] и т.д.

### Список литературы

1. Монахов, В.А. Алгоритм расчёта рамы на устойчивость на основе дискретной модели расщеплённого стержня / В.А. Монахов, Р. Саакян, А. Урин // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №2.
2. Монахов, В.А. Расчет стержневых систем с использованием теории графов в среде «Matlab» / В.А. Монахов, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2016. – №3. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhumala/no3/stroitel'naya-mehanika/3.13/at\\_download/file](http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhumala/no3/stroitel'naya-mehanika/3.13/at_download/file).

3. Монахов, В.А. Приложение принципа двойственности к формированию матрицы равновесия стержневой системы / В.А. Монахов, В.В. Зернов, О.Ф. Тульчинская // Материалы Международной научно-технической конференции. – Пенза: ПГУАС, 2014. – С. 124–133.
4. Зернов, В.В. Определение критической нагрузки для стропильных ферм в упругой и упругопластической стадиях работы / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, Н.Н. Ласков // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 4. – С. 85–89.
5. Зернов, В.В. Анализ устойчивости стержневых систем в упруго-пластической стадии работы / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, Ю.В. Анурьева // Моделирование и механика конструкций. – 2017. – №6. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no6/stroitelnaya-mehanika/6.4/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no6/stroitelnaya-mehanika/6.4/at_download/file)

#### References

1. Monakhov, V.A. Algorithm for calculating the frame for stability based on a discrete model of a split rod / V.A. Monakhov, R. Sahakian, A. Urin // Regional architecture and construction. – 2017. – №2.
2. Monakhov, V.A. Calculation of rod systems using graph theory in the Matlab environment / V.A. Monakhov, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2016. – No. 3. – Systems. requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no3/stroitelnaya-mehanika/3.13/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no3/stroitelnaya-mehanika/3.13/at_download/file).
3. Monakhov, V.A. Application of the duality principle to the formation of the equilibrium matrix of the rod system / V.A. Monakhov, V.V. Zernov, O.F. Tulchinskaya // Materials of the International scientific and technical conference. – Penza: PGUAS, 2014. – P. 124–133.
4. Zernov, V.V. Determining the critical load for trusses in elastic and elastic-plastic stages of work / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev, N.N. Laskov // Regional architecture and construction. – 2014. – No. 4. – P. 85–89.
5. Zernov, V.V. Analysis of stability of rod systems in the elastic-plastic stage of work / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev, Yu.V. Anurieva // Modeling and mechanics of structures. – 2017. – No. 6. – Systems. requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no6/stroitelnaya-mehanika/6.4/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no6/stroitelnaya-mehanika/6.4/at_download/file)

УДК 624.044.2

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

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

**Шацкая Галина Сергеевна,**  
аспирант кафедры «Механика»  
E-mail: no62name110@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

**Shatskaya Galina Sergeevna,**  
Postgraduate student of the department  
«Mechanics»  
E-mail: no62name110@mail.ru

## ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ПОЛУПЛОСКОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НОРМАЛЬНЫХ И КАСАТЕЛЬНЫХ НАГРУЗОК

С.В. Бакушев, Г.С. Шацкая

Рассматриваются вопросы определения перемещений в упругой полуплоскости, на дневной поверхности которой действуют сосредоточенные и распределённые нормальные и касательные нагрузки. Для определения перемещений предлагается численно-аналитический метод, в соответствии с которым нормальные и касательные напряжения, а также линейные и угловые деформации в полуплоскости определяются по известным аналитическим формулам, а перемещения – методом конечных разностей. Для этого расчётная область, на внутренних границах которой перемещения принимаются равными нулю, покрывается сеткой. Перемещения в узлах расчётной сетки определяются на основании геометрических уравнений Коши и известных в узлах сетки деформаций. В результате расчёта вертикальные и горизонтальные перемещения определяются в узлах расчётной сетки, отстоящих от левой, правой и нижней границ расчётной области на два шага. Для оценки точности определения перемещений выполняется сравнение углов сдвига в узлах сетки, вычисленных методом конечных разностей и полученных аналитически. Рассмотрен числовой пример.

*Ключевые слова: упругая полуплоскость, нормальные и касательные нагрузки, горизонтальные и вертикальные перемещения, метод конечных разностей*

## NUMERICAL-ANALYTICAL DETERMINATION OF DISPLACEMENTS IN SEMI-PLANE UNDER THE ACTION OF NORMAL AND TANGENTIAL LOADS

S.V. Bakushev, G.S. Shatskaya

The authors consider the issues of determination of movements in elastic half-plane on original ground of which concentrated and distributed normal and tangent loads act. In order to determine the displacements, a numerical-analytical method is proposed, according to which normal and shear stresses, as well as linear and angular deformations in half-plane are determined by known analytical formulae, and displacements are determined by the method of finite differences. For this computational domain, at internal boundaries of which movements are assumed equal to zero, is covered with a grid. The movements in the computational grid nodes are determined on the geometric Cauchy equations and the deformations known in the mesh nodes. As a result of the calculation, vertical and horizontal movements are determined in the nodes of computational grid spaced from the left, right and lower boundaries of the computational domain by two steps. To estimate the accuracy

of motion calculation, shear angles are compared in mesh nodes calculated by finite difference method and got analytically. A numerical example is reviewed.

*Keywords: elastic half-plane, normal and tangent loads, horizontal and vertical movements, the finite difference method*

**Введение.** Напряжённо-деформированное состояние тонкой упругой полуплоскости, на дневной поверхности которой действуют нормальные либо касательные сосредоточенные силы или нормальные либо касательные равномерно распределённые нагрузки, определяется по известным аналитическим формулам [1]. Используя принцип суперпозиции, нетрудно найти напряжения и деформации в упругой полуплоскости от произвольной совокупности нормальных и касательных сосредоточенных сил и нагрузок, действующих на её дневной поверхности. Определение же перемещений внутри полуплоскости либо прогибов её дневной поверхности является задачей нетривиальной даже в случае, когда на её поверхности действуют только нормальные либо только касательные сосредоточенные силы или только нормальные либо только касательные равномерно распределённые нагрузки. Задача определения перемещений существенно усложняется, если на дневной поверхности упругой полуплоскости действует произвольная совокупность нормальных и касательных сосредоточенных сил и нагрузок. Кроме того, при аналитическом определении перемещений в упругой полуплоскости отсутствует принципиальная возможность определения абсолютных значений перемещений [2].

В последние годы решению данной задачи посвящены многие научные работы. Так, в работе [3] рассмотрен расчёт напряжённо-деформированного состояния упругой полуплоскости в терминах функции перемещений. Получен аналог бигармонического уравнения для функции перемещений, через которую выражены как вертикальное и горизонтальное перемещения упругой полуплоскости, так и нормальные и касательные напряжения. Представляя функцию перемещений в виде произведения двух функций, одна из которых зависит только от одной пространственной координаты (функция распределения), а другая только от другой пространственной координаты (функция прогибов), решение бигармонического уравнения сводим к интегрированию трёх (с учётом уравнений переходных процессов) обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. В статье [4] представлены полученные методом комплексных потенциалов аналитические решения задач об определении полей напряжений, деформаций и перемещений в упругой однородной и изотропной полуплоскости, находящейся под действием нормальной нагрузки, распределённой по полосе. Рассмотрены случаи равномерно распределённой нагрузки и нагрузки, изменяющейся по закону треугольника. В работах [5–7] приводятся аналитические решения задачи об определении напряжённо-деформированного состояния грунтового массива, находящегося в условиях двумерной задачи, для различных форм перемещений участка границы полуплоскости: равномерного, линейного, квадратичного и асимптотически затухающего на бесконечности. Решение получено на основе применения методов теории функций комплексного переменного. В работе [8] получены комплексные потенциалы Колосова – Мухелишвили для сил и краевых дислокаций, распределённых по отрезкам прямых, параллельных границе однородной изотропной упругой полуплоскости. Искомые функции построены на основе обобщённого решения М.А. Грекова для одиночных сил и краевых дислокаций в неограниченной плоскости. Данные выражения полностью определяют напряжённо-деформированное состояние упругой полуплоскости при действии указанных особенностей. В статьях [9, 10] рассматривается применение метода конечных элементов (МКЭ) при исследовании воздействия равномерно распределённых нормальных и касательных усилий на упругую полуплоскость с целью исследования влияния характера и вида конечно-элементной сетки на точность решения.

Данная работа посвящена определению перемещений в тонкой бесконечно протяжённой вниз и в стороны полуплоскости, по верхней свободной границе которой (дневной поверхности) действуют нормальные и касательные нагрузки.

**Основные расчётные соотношения.** Напряжённое состояние тонкой, бесконечно протяжённой в направлениях  $x > 0$  и  $-\infty < y < \infty$  полуплоскости при воздействии на её дневной грани сосредоточенных и распределённых нагрузок определяется по известным формулам [1]. В частности, если действует сосредоточенная сила перпендикулярно к дневной поверхности  $x = 0$  (рис. 1), то напряжения определяются по формулам:

$$\sigma_x = -\frac{2F_x}{\pi} \frac{x^3}{(x^2 + y^2)^2}; \quad \sigma_y = -\frac{2F_x}{\pi} \frac{xy^2}{(x^2 + y^2)^2}; \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = -\frac{2F_x}{\pi} \frac{x^2y}{(x^2 + y^2)^2}. \quad (1)$$

Если сосредоточенная сила действует параллельно дневной поверхности  $x = 0$  (рис. 2), то напряжения будут равны:

$$\sigma_x = -\frac{2F_x}{\pi} \frac{yx^2}{(x^2 + y^2)^2}; \quad \sigma_y = -\frac{2F_x}{\pi} \frac{y^3}{(x^2 + y^2)^2}; \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = -\frac{2F_x}{\pi} \frac{xy^2}{(x^2 + y^2)^2}. \quad (2)$$

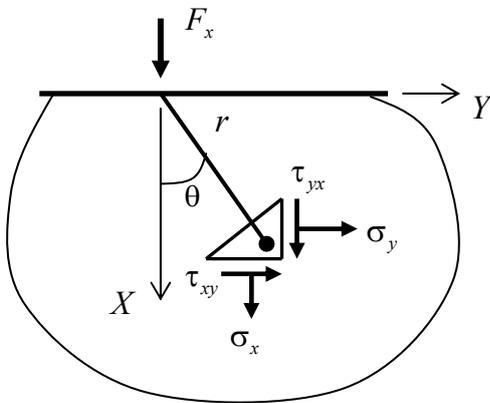


Рис. 1. Нормальная нагрузка на полуплоскость

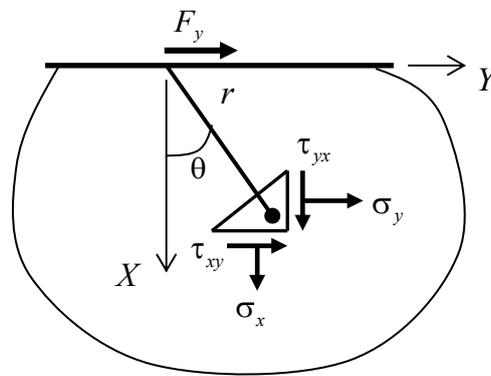


Рис. 2. Касательная нагрузка на полуплоскость

Если на полуплоскость на ограниченном участке  $y_n \leq y \leq y_k$  действует равномерно распределённая нагрузка перпендикулярно к дневной поверхности  $x = 0$  (рис. 3), то для напряжений имеют место формулы:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{q_x}{\pi} \left[ \operatorname{atan} \frac{y-y_n}{x} - \operatorname{atan} \frac{y-y_k}{x} + \frac{x(y-y_n)}{x^2 + (y-y_n)^2} - \frac{x(y-y_k)}{x^2 + (y-y_k)^2} \right]; \\ \sigma_y &= -\frac{q_x}{\pi} \left[ \operatorname{atan} \frac{y-y_n}{x} - \operatorname{atan} \frac{y-y_k}{x} - \frac{x(y-y_n)}{x^2 + (y-y_n)^2} + \frac{x(y-y_k)}{x^2 + (y-y_k)^2} \right]; \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= -\frac{q_x}{\pi} \left[ \frac{x(y-y_n)}{x^2 + (y-y_n)^2} - \frac{x(y-y_k)}{x^2 + (y-y_k)^2} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Если равномерно распределённая нагрузки действует на ограниченном участке  $y_n \leq y \leq y_k$  параллельно дневной поверхности  $x = 0$  (рис. 4), то напряжения определяются по формулам:

$$\sigma_x = \frac{q_y}{\pi} \left[ \frac{(y-y_H)^2}{x^2+(y-y_H)^2} - \frac{(y-y_K)^2}{x^2+(y-y_K)^2} \right];$$

$$\sigma_y = -\frac{2q_y}{\pi} \left\{ \ln \frac{\sqrt{x^2+(y-y_K)^2}}{\sqrt{x^2+(y-y_H)^2}} + \frac{1}{2} \left[ \frac{(y-y_H)^2}{x^2+(y-y_H)^2} - \frac{(y-y_K)^2}{x^2+(y-y_K)^2} \right] \right\};$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\frac{q_y}{\pi} \left[ \operatorname{atan} \frac{y-y_H}{x} - \operatorname{atan} \frac{y-y_K}{x} - \frac{x(y-y_H)}{x^2+(y-y_H)^2} + \frac{x(y-y_K)}{x^2+(y-y_K)^2} \right].$$
(4)

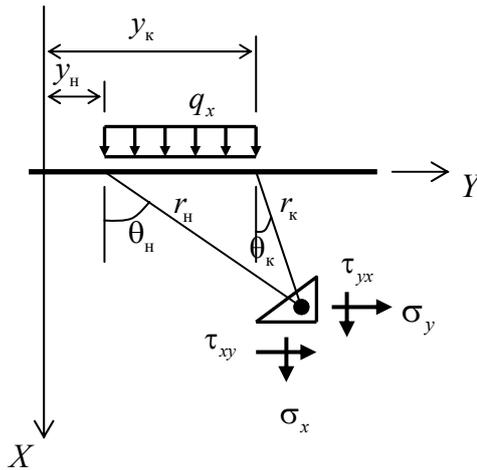


Рис. 3. Нормальная равномерно распределённая нагрузка на полуплоскость

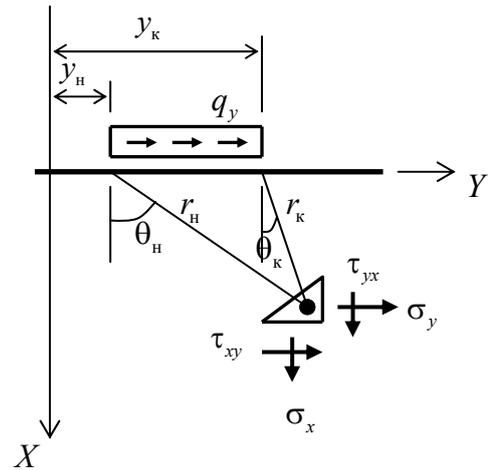


Рис. 4. Касательная равномерно распределённая нагрузка на полуплоскость

Для определения деформаций можно воспользоваться обобщённым законом Гука:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \mu \sigma_y); \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \mu \sigma_x); \quad \gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy}. \quad (5)$$

Таким образом, определение напряжений и деформаций в полуплоскости никаких затруднений не вызывает. Гораздо сложнее дело обстоит с определением перемещений, поскольку определение перемещений связано с интегрированием и, следовательно, с определением произвольных постоянных интегрирования из каких-либо дополнительных условий.

**Численно-аналитический метод определения перемещений.** В данной работе предлагается численно-аналитический метод для определения перемещений в полуплоскости. В основе предлагаемого метода лежит метод конечных разностей. Суть метода заключается в том, что напряжения и деформации в полуплоскости вычисляются по аналитическим формулам (1) – (5), представленным выше, а перемещения определяются методом конечных разностей с использованием формул Коши:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (6)$$

Алгоритм метода конечных разностей для определения перемещений будет следующим.

1. Выделяем расчётную область прямоугольной формы так, чтобы перемещения  $u$  и  $v$  на нижней и боковых границах области можно было принять равными нулю.

2. Расчётную область покрываем сеткой с шагом  $\Delta x$  вдоль оси  $X$  и с шагом  $\Delta y$  вдоль оси  $Y$ .

3. Узлы сетки нумеруем от  $-1$  до  $n$  в направлении оси  $X$  и от  $0$  до  $m$  в направлении оси  $Y$  (рис. 5).

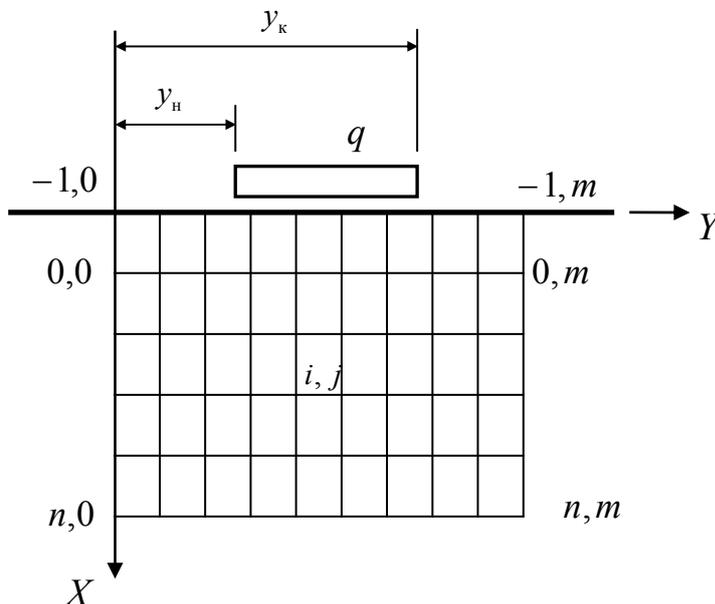


Рис. 5. Расчётная сеточная область

4. В узлах расчётной сеточной области с номерами от  $(0,0)$  до  $(n,m)$ , то есть игнорируя узлы, расположенные на поверхности полупространства, вычисляем напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$  по формулам (1) – (4).

5. Используя формулы обобщённого закона Гука (5), вычисляем в узлах расчётной области с номерами от  $(0,0)$  до  $(n,m)$  линейные  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  и угловые  $\gamma_{xy}$  деформации.

6. В каждом внутреннем узле расчётной сеточной области с номерами от  $(0,0)$  до  $(n,m)$  записываем геометрические соотношения – соотношения Коши – в конечных разностях с погрешностью порядка  $O(h^2)$ :

$$\varepsilon_{i,j}^x = \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x}; \quad \varepsilon_{i,j}^y = \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{2\Delta y}; \quad \gamma_{i,j}^{xy} = \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2\Delta y} + \frac{v_{i+1,j} - v_{i-1,j}}{2\Delta x}. \quad (7)$$

Здесь  $i = 1, 2, \dots, n-1$ ;  $j = 1, 2, \dots, m-2$ .

7. Для вычисления перемещений в узлах расчётной сетки используем соотношения (7<sub>1</sub>) и (7<sub>2</sub>). При этом для узлов с номерами  $(1,1) - (n-1, \frac{m}{2})$  расчёт выполняется по формулам

$$u_{i-1,j} = u_{i+1,j} - 2\Delta x \varepsilon_{i,j}^x; \quad v_{i,j+1} = v_{i,j-1} + 2\Delta y \varepsilon_{i,j}^y. \quad (8)$$

Для узлов с номерами  $(1, \frac{m}{2}) - (n-1, m-1)$  расчёт производится по формулам

$$u_{i-1,j} = u_{i+1,j} - 2\Delta x \varepsilon_{i,j}^x; \quad v_{i,j-1} = v_{i,j+1} - 2\Delta y \varepsilon_{i,j}^y. \quad (9)$$

Вполне понятно, что вычисления по формулам (8) начинаются с нижнего левого узла с номером  $(n-1, 1)$  расчётной сеточной области. Вычисления по формулам (9) начинаются с нижнего правого узла с номером  $(n-1, m-1)$ . Таким образом, вертикальное  $u$  и горизонтальное  $v$  перемещения будут вычислены в узлах с номерами  $(1, 2) - (n-2, m-2)$ . При этом в узлах с номерами  $(i, 1)$ ;  $(i, m)$ ;  $(n, j)$ ;  $(n-1, 2)$ ;  $(n-1, m-1)$  перемещения принимаются равными нулю:  $u_{i,j} = 0$ ;  $v_{i,j} = 0$ .

8. Для оценки погрешности вычислений можно, во-первых, воспользоваться соотношением (5<sub>3</sub>) либо, во-вторых, выполнить двойной перерасчёт с уменьшением шага расчётной сетки как в направлении оси  $X$ , так и в направлении оси  $Y$ .

З а м е ч а н и е. При достаточно мелкой сетке эпюра вертикальных перемещений  $u$ , построенная для номеров  $(1, 2) - (1, m-2)$ , будет приближённо совпадать с эпюрой прогибов дневной поверхности полуплоскости.

**Пример расчёта.** Рассмотрим бесконечно протяжённую вниз и в стороны полуплоскость, материал которой характеризуется модулем упругости  $E = 20$  ГПа и коэффициентом поперечной деформации  $\mu = 0,35$ . В качестве расчётной принимаем прямоугольную область размерами  $10 \times 10$  м. Расчётную область покрываем сеткой.

При этом принимаем  $n = 200$ ,  $m = 200$ . Тогда шаг сетки  $\Delta x = \Delta y = \frac{l}{m} = 0,05$  м. В соответствии с алгоритмом построения расчётной сетки при действии на полуплоскость сосредоточенных сил  $x_0 = \Delta x$ ,  $y_0 = -\frac{l}{2} = -5$  м; при действии на полуплоскость распределённых нагрузок  $x_0 = \Delta x$ ,  $y_0 = 0$  м. При этом  $l_n = 4$  м,  $l_k = 6$  м.

Координаты узлов расчётной сетки вычисляем по формулам:

$$x_i = x_0 + \Delta x \cdot i; \quad y_j = y_0 + \Delta y \cdot j; \quad i = 0, 1, \dots, n; \quad j = 0, 1, \dots, m.$$

Результаты расчёта показаны на рис. 6–9.

1. Действие на полуплоскость сосредоточенной силы  $F_x = 1000$  Н перпендикулярно к дневной поверхности. Эпюры вертикальных и горизонтальных перемещений показаны на рис. 6.

2. Действие на полуплоскость сосредоточенной силы  $F_y = 1000$  Н параллельно дневной поверхности. Эпюры вертикальных и горизонтальных перемещений показаны на рис. 7.

3. Действие на полуплоскость равномерно распределённой нагрузки интенсивности  $q_x = 1000$  Н/м перпендикулярно к дневной поверхности. Эпюры вертикальных и горизонтальных перемещений показаны на рис. 8.

4. Действие на полуплоскость равномерно-распределённой нагрузки интенсивности  $q_y = 1000$  Н/м параллельно дневной поверхности. Эпюры вертикальных и горизонтальных перемещений показаны на рис. 9.

Все эпюры построены для горизонтального сечения с номером  $i = 50$  и для вертикального сечения с номером  $j = 50$ .

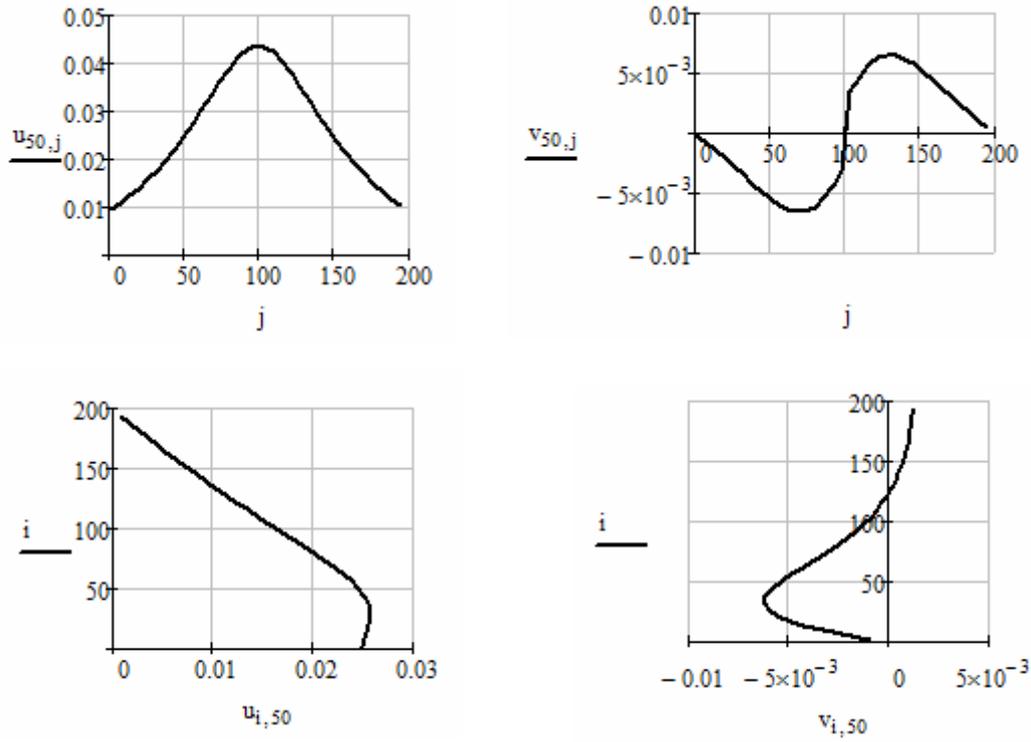


Рис. 6. Эпюры вертикальных и горизонтальных перемещений при действии на полуплоскость сосредоточенной силы перпендикулярно к дневной поверхности

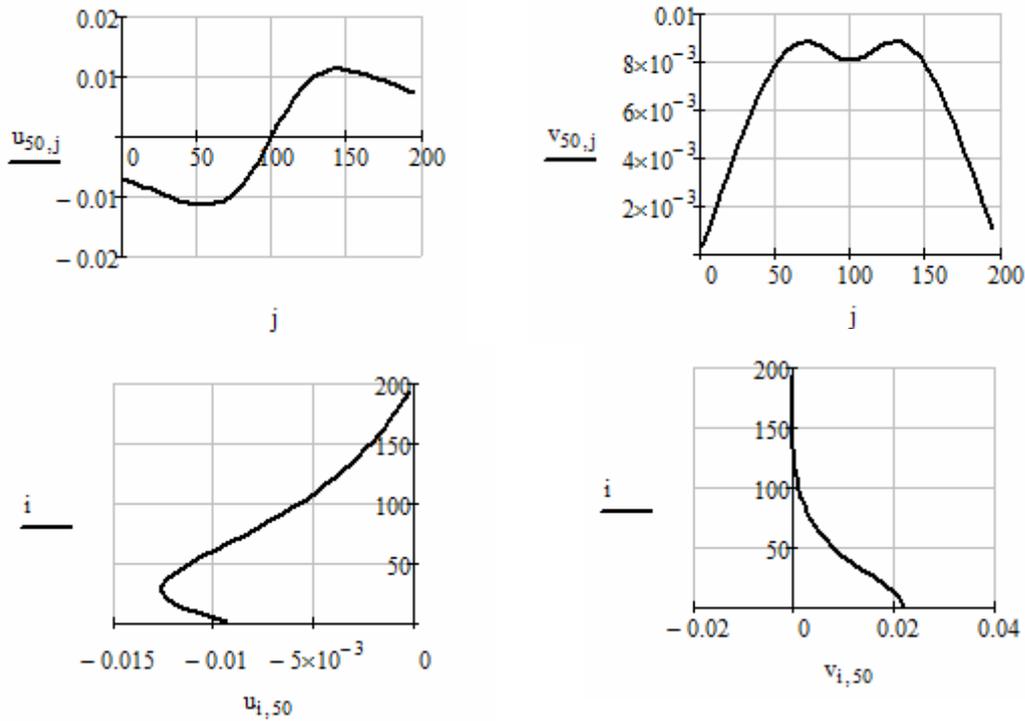


Рис. 7. Эпюры вертикальных и горизонтальных перемещений при действии на полуплоскость сосредоточенной силы параллельно дневной поверхности

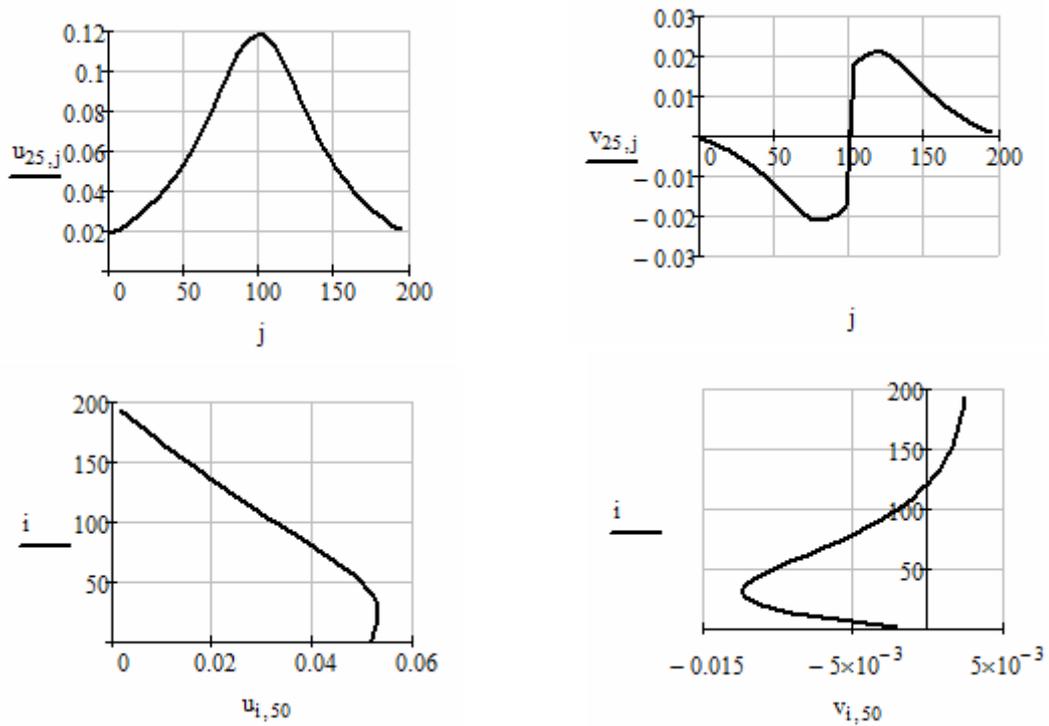


Рис. 8. Эпюры вертикальных и горизонтальных перемещений при действии на полуплоскость равномерно распределённой нормальной нагрузки

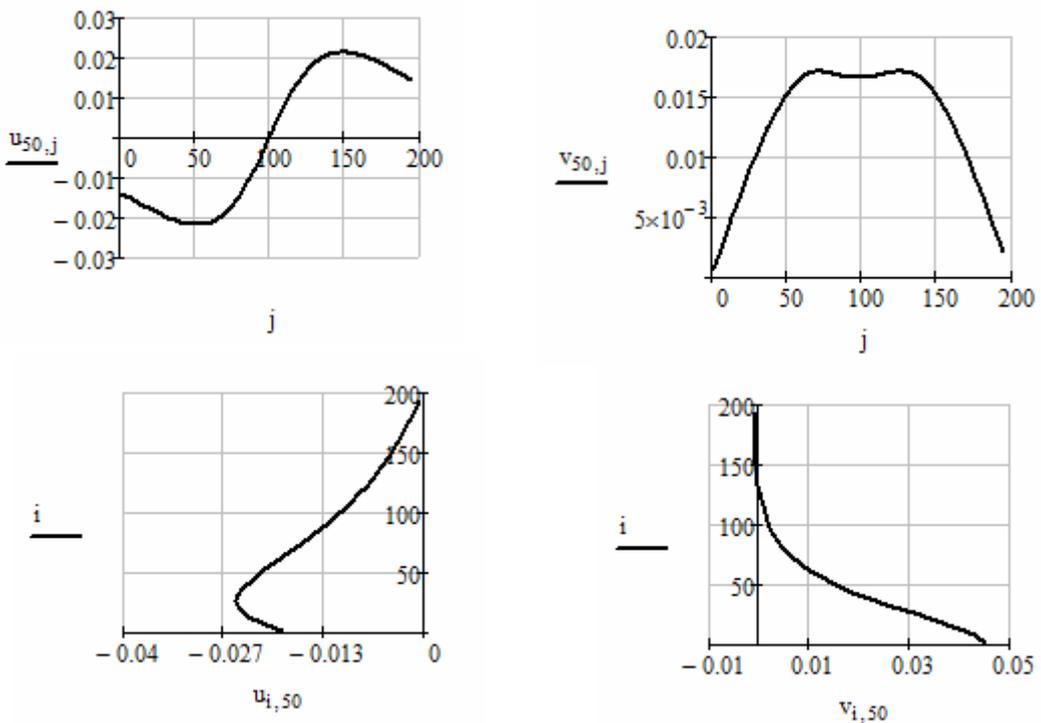


Рис. 9. Эпюры вертикальных и горизонтальных перемещений при действии на полуплоскость равномерно распределённой касательной нагрузки

Оценку погрешности построения эпюр перемещений методом конечных разностей выполним путём сравнения углов сдвига в узлах сетки, вычисленных с использованием аналитического выражения (5<sub>3</sub>) и вычисленных численно методом конечных разностей с использованием выражения (7<sub>3</sub>). Величины разности в углах сдвига в узлах расчётной сетки для горизонтального сечения с номером  $i = 50$  показаны на рис. 10.

Исследования показывают, что погрешность определения перемещений в полуплоскости методом конечных разностей, вообще говоря, значительна, причём для нагрузки, действующей перпендикулярно дневной поверхности полуплоскости, она меньше, чем для нагрузки, действующей параллельно её дневной поверхности.

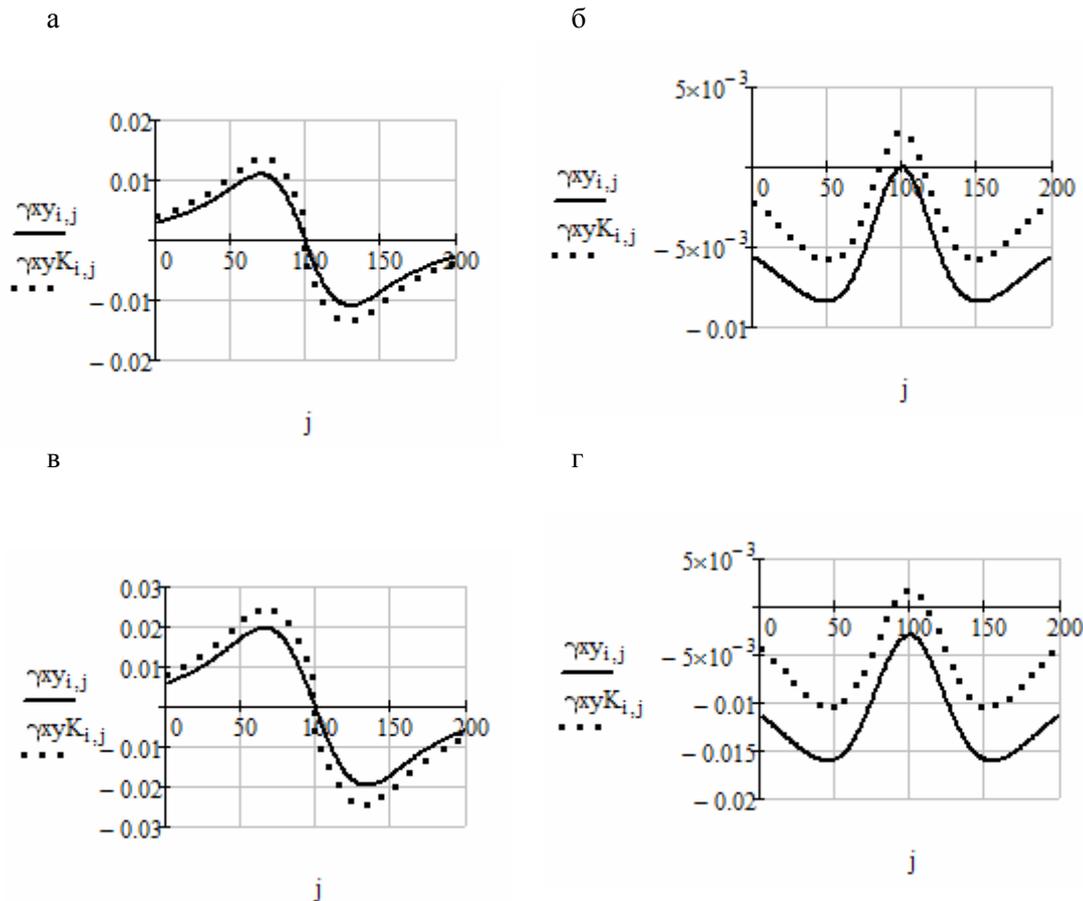


рис. 10. Эпюры углов сдвига:

- а – действие сосредоточенной силы перпендикулярно к дневной поверхности полуплоскости;
  - б – действие сосредоточенной силы параллельно дневной поверхности полуплоскости;
  - в – действие равномерно распределённой нагрузки перпендикулярно к дневной поверхности полуплоскости;
  - г – действие равномерно распределённой нагрузки параллельно дневной поверхности полуплоскости;
- сплошная линия – угол сдвига, построенный методом конечных разностей;  
 точечная линия – угол сдвига, построенный по формуле (5<sub>3</sub>)

**Заключение и выводы**

1. Предложенный численно-аналитический метод определения перемещений может быть использован при определении перемещений, осадок и прогибов упругой полуплоскости, на дневной поверхности которой действует произвольная совокупность сосредоточенных сил и распределённых нагрузок.

2. Погрешность вычисления перемещений предложенным численно-аналитическим методом может быть значительной в зависимости от вида действующей нагрузки.

## Список литературы

1. Киселёв, В.А. Плоская задача теории упругости / В.А. Киселёв. – М.: Высш. школа, 1976. – 151 с.
2. Плотникова, А.Ю. Инженерные модели упругого основания / А.Ю. Плотникова, Ю.Г. Плотников // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. – 2011. – Т. 2. – С. 112–116.
3. Ахажанов, С.Б. Напряжённо-деформированное состояние упругой полуплоскости / С.Б. Ахажанов // Математические методы и модели в строительстве, архитектуре и дизайне: сб. – Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. – С. 67–73.
4. Богомолов, А.Н. О напряжённом состоянии однородной упругой полуплоскости при действии полосовой нагрузки / А.Н. Богомолов, А.Н. Ушаков, О.А. Богомолова, А.В. Соловьев // Городские агломерации на оползневых территориях: материалы V Международной конференции по геотехнике. – 2010. – С. 297–318.
5. Богомолов, А.Н. Напряжённо-деформированное состояние упругой полуплоскости при нелинейном перемещении участка её границы / А.Н. Богомолов, О.А. Богомолова, А.Н. Ушаков, В.В. Подтелков // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году: сборник научных трудов Российской академии архитектуры и строительных наук. – М., 2018. – С. 124–133. – DOI: 10.22337/9785432302663-124-133.
6. Богомолов, А.Н. О напряжённо-деформированном состоянии упругой полуплоскости при нелинейном перемещении участка её границы / А.Н. Богомолов, О.А. Богомолова, А.Н. Ушаков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 2. – С. 75–86. – DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.07.
7. Богомолов, А.Н. О напряжённо-деформированном состоянии упругой полуплоскости при асимптотическом затухании перемещений на бесконечности / А.Н. Богомолов, О.А. Богомолова, А.Н. Ушаков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 9, № 2. – С. 5–19. – DOI: 10.15593/2224-9826/2018.2.01.
8. Еваева, Е.С. Силы и краевые дислокации, распределённые по отрезкам, параллельным границе полуплоскости / Е.С. Еваева, Ю.Г. Пронина // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2016): сборник трудов IX Международной конференции. – 2016. – С. 128–130.
9. Мартянова, А.Е. Применение МКЭ при исследовании скольжения цилиндра по упругой полуплоскости в условиях плоской задачи / А.Е. Мартянова // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2008. – № 2 (43). – С. 17–22.
10. Мартянова, А.Е. Применение МКЭ при исследовании воздействия равномерно распределённых усилий на упругую полуплоскость / А.Е. Мартянова // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2007. – № 4 (39). – С. 192–196.

## References

1. Kiselev, V.A. The flat challenge of elasticity theory / V.A. Kiselev. – M.: Higher Educational Institutions, 1976. – 151 c.
2. Plotnikova, A.Y. Engineering models of the elastic foundation / A.Y. Plotnikova, Y.G. Plotnikov // New ideas of the new century: materials of the international scientific conference FAD TOSU. – 2011. – Vol. 2. – P. 112–116.
3. Akhazhanov, S.B. Stress-deformed state of elastic semi-flat / S.B. Akhazhanov // Mathematical methods and models in construction, architecture and design: col. – Samara: Samara State Architectural and Construction University, 2015. – P. 67–73.

4. Bogomolov, A.N. On the tense state of homogeneous elastic semi-flatat at the action of the band load / A.N. Bogomolov, A.N. Ushakov, O.A. Bogomolova, A.V. Solov'ev // Urban agglomerations in landslide areas: materials V International Conference on Geoengineering. – 2010. – P. 297–318.
5. Bogomolov, A.N. Stress-Strain State of an Elastic Half-Plane With Nonlinear Displacement of a Part of its Boundary / A.N. Bogomolov, O.A. Bogomolova, A.N. Ushakov, V.V. Podtelkov // RAASN's fundamental, search and applied research on the scientific development of the architecture, urban planning and construction industry of the Russian Federation in 2017: collection of scientific papers of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences. – M., 2018. – P. 124–133. – DOI: 10.22337/9785432302663-124-133.
6. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Ushakov A.N. On the stress-strain state of an elastic half-plane with the nonlinear movement of the plot boundaries / A.N. Bogomolov, O.A. Bogomolova, A.N. Ushakov // Herald of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture. – 2017. – Vol. 8, № 2. – P. 75–86. – DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.07.
7. Bogomolov, A.N. On the stress-strain state of an elastic half-plane with the asymptotic attenuation of the displacements at infinity / A.N. Bogomolov, O.A. Bogomolova, A.N. Ushakov // Herald of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture. – 2018. – Vol. 9, № 2. – P. 5–19. – DOI: 10.15593/2224-9826/2018.2.01.
8. Evseeva, E.S. Forces and edge deployments, distributed by segments parallel to the boundary of the half-plane / E.S. Evseeva, Yu.G. Pronina // Modern methods of the work, theory and computer techu (PMTUKT-2016): Collection of works IX international conference. – 2016. – P. 128–130.
9. Martjanova, A.E. The FEM application at the research of a sliding cylindrical contact with an elastic half-plane in conditions of a plane problem / A.E. Martjanova // Herald of Astrakhan State Technical University. – 2008. – № 2 (43). – P. 17–22.
10. Martjanova, A. E. The application of finite-element method at the research of evenly distributed pressure influence on elastic half-plane / A.E. Martjanova // Herald of Astrakhan State Technical University. – 2007. – № 4 (39). – P. 192–196.

УДК [72+69] : 620.91 – 049.35

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

**Береговой Александр Маркович,**  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Городское  
строительство и архитектура»  
E-mail: ambereg@rambler.ru

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

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Beregovoy Aleksander Markovich,**  
Doctor of Sciences,  
Professor of the department «Urban  
Construction and Architecture»  
E-mail: ambereg@rambler.ru

**Beregovoy Vitaliy Aleksandrovich,**  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Technology of Building Materials  
and Wood Processing»  
E-mail: vabereg@rambler.ru

## ВОПРОСЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВАРИАбельНОСТИ ВОЗДУХОПРОНИЦАНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

А.М. Береговой, В.А. Береговой

По результатам натурных обследований тепловой защиты гражданских зданий выполнен анализ основных причин повышенной воздухопроницаемости ограждающих конструкций. Путем моделирования процесса воздухопроницаемости дана оценка его влияния на тепловые потери здания в холодное время года. Рассмотрены особенности эксфильтрации воздуха через верхние участки наружных ограждений и его инфильтрации через наружные стены панельной конструкции, а также через стены с пониженным значением сопротивления воздухопроницанию.

*Ключевые слова: энергосбережение, наружные ограждения, моделирование, воздухопроницаемость, тепловые потери*

## ENERGY SAVING ISSUES IN CONDITIONS OF VARIABILITY OF AIR PERMEABILITY OF ENCLOSING STRUCTURES

A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy

Based on the results of field surveys of thermal protection of civil buildings, the analysis of the main causes of increased air permeability of enclosing structures was performed. By modeling the process of air permeability, an assessment of its impact on the heat loss of a building in cold season is given. The features of air exfiltration through the upper sections of external enclosure structures and its infiltration through the outer walls of a panel structure, as well as through walls with a reduced value of air resistance are considered.

*Keywords: energy saving, external enclosure structures, modeling, air permeability, heat loss*

В нормативной литературе и работах [1–3] отмечается, что с понижением сопротивления воздухопроницанию наружных ограждений возрастают тепловые потери здания. Однако в ряде случаев этот механизм массопереноса носит более сложный характер, указывающий на возможность возникновения эффекта энергосбережения при инфильтрации воздуха через капиллярно-пористую структуру материала конструкции.

Натурные обследования тепловой защиты гражданских зданий в г. Пензе подтвердили, что значительный рост тепловых потерь на отдельных давно эксплуатируемых и даже недавно построенных объектах связан с повышенной воздухопроницаемостью

наружных ограждающих конструкций, которая носила неконтролируемый характер [4] (см. таблицу).

Неконтролируемая воздухопроницаемость вертикальных ограждающих конструкций

Наружные ограждения	Основные причины неконтролируемой воздухопроницаемости
Панельные стены	Потеря герметичности стыков
Кирпичные стены	Пустошовка кирпичной кладки
Деревянные окна	Коробление элементов переплетов и рамы

При низких температурах воздуха и повышенном ветровом напоре увеличение тепловых потерь через панельные стены может быть вызвано ухудшением эластичности герметизирующих прокладок или нарушением целостности и растрескиванием мастичной заделки стыков. Неплотное заполнение цементно-песчаным раствором швов кирпичной кладки приводит к остужению ее массива и понижению сопротивления теплопередаче стены. В деревянных оконных конструкциях суммарная площадь щелей в местах примыкания переплетов к раме и стекол к переплету становится основной причиной проникновения большого объема холодного воздуха в межстекольное пространство окна и внутрь помещения.

Проникновение больших объемов холодного воздуха через кирпичные стены наблюдалось при обследовании вновь возведенного 10-этажного жилого дома, имеющего слой наружной тепловой изоляции из пенополистирола. Причина понижения тепловой защиты такой ограждающей конструкции заключалась в наличии значительной пустошовки в кирпичной кладке и неплотном примыкании плит утеплителя друг к другу с образованием щелей шириной до 3-5 мм. Защитный слой цементно-песчаной штукатурки имел толщину всего в несколько миллиметров и поэтому обладал малым сопротивлением воздухопроницанию. Это являлось причиной снижения температуры поверхности откосов окон и других участков наружной стены до значений ниже температуры точки росы.

Коробление элементов деревянных окон в домах старой застройки и зданиях типовых серий 1960-х и 1970-х годов увеличило инфильтрацию холодного воздуха и послужило одной из причин массовой замены этих конструкций на более герметичные стеклопакеты.

Задача проведенного исследования заключалась в оценке влияния на тепловые потери здания неконтролируемой воздухопроницаемости наружных ограждений, а также эксфильтрации и инфильтрации воздуха через массив этих конструкций в холодное время года.

В процессе неконтролируемой воздухопроницаемости через панельные стены расчет количества проникающего воздуха и возникающих теплопотерь можно определить по модели, основанной на расчетах Богословского В.Н.

$$\Delta p = -0,8 \left[ -9,81(\rho_n - \rho_b)H - 0,6 (0,6 \cdot V^2 \cdot \rho_n) / 2 \right]; \quad (1)$$

$$I_{ок} = S \cdot \Delta p^{2/3}; \quad (2)$$

$$I_{ст} = \Delta p / R_{u2}; \quad (3)$$

$$Q_{инф} = (\Sigma A \cdot c_{вj} \cdot F + \Sigma A \cdot c_{вj} \cdot l) \cdot (t_b - t_n), \quad (4)$$

где  $\Delta p$  – разность давления воздуха снаружи и внутри помещения;  $I_{ок}$  – количество воздуха, фильтрующегося через 1 м<sup>2</sup> окна;  $I_{ст}$  – количество воздуха, фильтрующегося через 1 м стыкового соединения;  $Q_{инф}$  – затраты тепла на нагрев инфильтрационного воздуха.

Расчеты по этой модели выполнены при следующих условиях:

– здание 2-этажное из керамзитобетонных панелей с высотой этажа 3 м;

- коэффициент воздухопроницаемости материала стены  $s=0,39$  кг/(м<sup>2</sup>·ч·Па);
- сопротивление воздухопроницанию и теплопередаче панели толщиной 0,28 м составляет соответственно  $R_u=196$  м<sup>2</sup>·ч·Па/кг и  $R_0 = 3,18$  м<sup>2</sup>·°C/Вт;
- площадь наружной стены  $F_o=24$  м<sup>2</sup>, площадь проемов конструкций окон с раздельными деревянными переплетами  $F_{ок}=3$  м<sup>2</sup>;
- сопротивление воздухопроницанию стыковых соединений общей длиной  $l=24$  м равно  $R_{u2}=40$  м<sup>2</sup>·ч·Па/кг;
- температура окружающей среды  $t_n = -29^\circ\text{C}$ ,  $t_b = 20^\circ\text{C}$ , скорость ветра  $v_n=5,6$  м/с.

Результаты расчетов показали [5], что дополнительные затраты тепла на нагрев инфильтрационного воздуха равны 153 Вт, тогда как трансмиссионные тепловые потери через эту стену, выполненные в условиях стационарной теплопередачи, составляют величину на порядок меньше. Это подтверждает большое влияние неконтролируемой воздухопроницаемости наружных ограждений на уменьшение энергосбережения здания.

Оценка влияния на тепловые потери здания эксфильтрации и инфильтрации воздуха проводилась по следующей модели (уравнения соответственно (5)–(9) и (10)–(14):

$$\Delta p = 0,55H (\gamma_n - \gamma_b) + 0,03\gamma_n v^2, \quad (5)$$

$$q = (t_b - t_n) / R_o, \quad (6)$$

$$\tau_b = t_n + (t_b - t_n) \cdot \frac{e^{c_n \cdot w \cdot R} - 1}{e^{c_n \cdot w \cdot R_0} - 1}, \quad (7)$$

$$\omega = \Delta p / R_u, \quad (8)$$

$$R_u = R_{u1} + R_{u2} + \dots + R_{un}; \quad (9)$$

$$\Delta P = -0,8 \cdot \left[ -g \cdot (\gamma_n - \gamma_b) \cdot H - 0,6 \frac{(0,6 \cdot v)^2 \cdot \gamma_n}{2} \right], \quad (10)$$

$$\tau_b = t_n + (t_b - t_n) \cdot \frac{e^{c_n \cdot w \cdot R} - 1}{e^{c_n \cdot w \cdot R_0} - 1}, \quad (11)$$

$$q_u = \frac{c_b \cdot w \cdot e^{c_n \cdot w \cdot R}}{e^{c_n \cdot w \cdot R_0} - 1} \cdot (t_b - t_n), \quad (12)$$

$$\Delta Q_{\text{вент}} = 0,28 \cdot \Delta w_{\text{вент}} \cdot \gamma_n \cdot c_b \cdot (t_b - t_n), \quad (13)$$

$$w_{\text{инф}} = \Delta P / \sum R_n. \quad (14)$$

Моделирование процесса эксфильтрации воздуха через верхние участки наружных ограждений здания показало, что, как и в случае неконтролируемой воздухопроницаемости, происходит значительный рост тепловых потерь с увеличением этажности здания, если конструкция имеет небольшое сопротивление воздухопроницанию  $R_u$ . Так, например, для  $R_u = 0,25$  м<sup>2</sup>·ч·Па/кг величина тепловых потерь может быть в 3,5 раза больше той, которая определяется по стандартной методике, а в 4-этажном здании она увеличивается в три раза по сравнению с одноэтажным [6].

Однако, в отличие от неконтролируемой воздухопроницаемости и эксфильтрации, при инфильтрации воздуха, как показали исследования [7], возможно возникновение энергосберегающего эффекта, который, как и при рассмотрении процесса эксфиль-

трации воздуха, повышается с увеличением высоты здания, а также с уменьшением сопротивления воздухопроницанию  $R_n$  ограждения.

Так, при  $R_n = 35 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{кг}$  приближенный эффект экономии тепла может составить для 2-этажного и 12-этажного зданий соответственно 3 и 10 %.

Таким образом, причиной больших тепловых потерь здания может быть не только неконтролируемая воздухопроницаемость через наружные ограждающие конструкции, но и эксфильтрация воздуха через верхние участки этих ограждений, имеющих небольшое сопротивление воздухопроницанию. При инфильтрации холодного воздуха через массив таких конструкций может наблюдаться эффект энергосбережения, который, как и в процессе эксфильтрации, возрастает с повышением этажности здания и уменьшением сопротивления воздухопроницанию наружного ограждения.

### Список литературы

1. ГОСТ 31167–2009. Здания и сооружения. – URL: [docs.cntd.ru.document/1200082249](https://docs.cntd.ru/document/1200082249) (дата обращения: 14.08.20).
2. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23–02–2003. – М.: НИИСФ РААСН, 2012. – 95 с.
3. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций. – URL: [docs.cntd.ru/document/1200095525](https://docs.cntd.ru/document/1200095525) (дата обращения: 14.08.20).
4. Береговой, А.М. Наружные ограждающие конструкции в системе воздухообмена жилого многоэтажного здания / А.М. Береговой, М.А. Дерина // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: [www.science-education.ru/121-17257](http://www.science-education.ru/121-17257) (дата обращения: 04.02.2015).
5. Дерина, М.А. Повышение тепловой эффективности малоэтажных гражданских зданий: дис. ... канд. техн. наук / М.А. Дерина. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 172 с.
6. Береговой, А.М. Оценка тепловых потерь при эксфильтрации воздуха через пористую структуру материала ограждения / А.М. Береговой, М.А. Дерина, В.А. Береговой, А.В. Мальцев // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2. – С. 79–83.
7. Береговой, А.М. Эффект энергосбережения в помещении с естественной вентиляцией в условиях инфильтрации воздуха через наружную стену / А.М. Береговой, А.В. Мальцев, М.А. Дерина, А.В. Гречишкин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №3. – С. 140–144.

### Reference

1. GOST 31167–2009. Buildings and constructions. – URL: [docs.cntd.ru.document/1200082249](https://docs.cntd.ru/document/1200082249) (access date: 14.08.20).
2. SP 50.13330.2012. Thermal protection of buildings. Actualized edition of SNiP 23–02–2003. – М.: NIISFRAASN, 2012. – 95 p.
3. Air permeability of enclosure structures. – URL: [docs.cntd.ru/document/1200095525](https://docs.cntd.ru/document/1200095525) (access date: 14.08.20).
4. Beregovoy A.M., Derina M.A. External enclosing structures in the air exchange system of a residential high-rise building // Modern Problems of Science and Education. – 2015. – № 1. – URL: [www.science-education.ru/121-17257](http://www.science-education.ru/121-17257) (access date: 4.02.2015).
5. Derina, M.A. Improving the thermal efficiency of low-rise civil buildings: dis. ... cand. of Sciences / M. A. Derina. – Penza: PGUAS, 2016. – 172 p.
6. Beregovoy, A.M. Evaluation of heat losses during exfiltration of air through the porous structure of the material of the enclosure structure / A. M. Beregovoy, M. A. Derina, V. A. Beregovoy, A.V. Maltsev // Regional architecture and engineering. – 2014. – No.2. – P. 79–83.
7. Beregovoy, A.M. The effect of energy saving in room with natural ventilation in terms of air infiltration through exterior wall / A.M. Beregovoy, A. V. Maltsev, M.A. Derina, A.V. Grechishkin // Regional architecture and engineering. – 2013. – №3. – P. 140–144.

УДК 692.421.4

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

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

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

Penza State University of Architecture  
and Construction

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

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

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

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ СКЛАДА ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ СТАНЦИИ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

И.С. Гучкин, Н.Н. Ласьков

Рассматриваются результаты обследования на складе химических реагентов железобетонных плит перекрытия, длительно (более 30 лет) подвергавшихся воздействию агрессивной среды. Анализируется степень влияния агрессивной среды на прочность бетона. Приводятся данные расчета прочности плит после усиления. Предлагается способ усиления плит наращиванием сечения бетона и дополнительным армированием. Дается последовательность монтажа элементов усиления.

*Ключевые слова:* плита перекрытия, агрессивная химическая среда, коррозия бетона и арматуры, комплексное усиление, наращивание сечения бетона, дополнительное армирование, расчет

## THE RESULTS OF INSPECTION AND REINFORCEMENT OF CONCRETE SLABS FLOOR OF CHEMICAL REAGENTS STORAGE OF TREATMENT STATION

I.S. Guchkin, N.N. Laskov

The results of the survey of reinforced concrete slabs of the chemical reagents storage, which have been exposed to aggressive environment for a long time (more than 30 years), are considered. The degree of aggressive medium influence on concrete strength is analyzed. The calculation of the strength of the slabs after reinforcement is given. A method of reinforcing slabs by increasing concrete cross-section and additional reinforcement is proposed. A sequence of reinforcement elements installation is given.

*Keywords:* floor slab, aggressive chemical medium, corrosion of concrete and reinforcement, complex reinforcement, concrete cross-section growth, additional reinforcement, calculation

Здание склада химических реагентов ППО «ЭВТ» 2-этажное, кирпичное с подвальным помещением. Перекрытия сборные железобетонные из ребристых плит.

**Характеристика агрессивной среды и анализ факторов, влияющих на коррозию бетона и арматуры.** Номенклатура рабочих жидкостей, в течение 30 лет поступавших в здание склада, включает более 10 наименований. На отметке -4,8 м в подвальном помещении расположены склад реагентов и приемные резервуары, которые предназначены для хранения отработанного хромового ангидрида, щелочных растворов гидроксидов натрия и калия, отработанных растворов электролитов неорганических кислот ( $H_2SO_4$ , HCL), растворов солей-цианидов кадмия и цинка, бисуль-

фита натрия, хлорида железа ( $\text{Fe}^{3+}$ ). Для нейтрализации кислых растворов постоянно использовалось известковое молоко, приготовленное в гидравлических мешалках.

В помещениях первого этажа на отметке 0,00 м расположено реагентное хозяйство, жидкие растворы которого в основном аналогичны растворам склада реагентов. Дополнительно к перечисленным агрессивным жидкостям здесь имеются две емкости с раствором гипохлорита серной кислоты и кислотнo-щелочными усредненными стоками гальванических цехов.

Газообразная фаза в помещении реагентного хозяйства представлена сложной смесью газов, состоящих в основном из  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$ . Из гипохлорита натрия и хлорной извести в кислой среде идет выделение в воздушную среду активного хлора. При взаимодействии сернистого ангидрида и хлора с парами воды в воздухе образуются соответствующие кислоты: сернистая, серная, хлорноватистая и соляная. Этому способствует и повышенная относительная влажность воздуха, достигающая в осенний и зимний периоды 85 – 95 %.

Воздействие агрессивных жидкостей и газов привело к различным видам коррозии бетона [1] и язвенной коррозии арматуры.

В процессе обследования из поверхностных слоев бетона плит подвального перекрытия были взяты пробы цементного камня (раствора), на которых выполнен качественный, а для некоторых проб количественный химический анализ [2] на присутствие и содержание анионов  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ . При этом установлено, что наиболее значительному коррозионному воздействию подвержено подвальное перекрытие над приемными резервуарами и насосами. В местах расположения баков отработанных электролитов и кислот, за счет растворения и конденсации кислых газов в воздухе и взаимодействия их с продуктами гидратации клинкерных минералов бетона, со стороны подвала развивалась газовая коррозия, а со стороны первого этажа, в результате проникания через трещины в керамических полах растворов бисульфитов натрия и серной кислоты, – кислотная. В целом же, воздействие на цементный камень ионов  $\text{SO}_3^{2-}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  привело к кислотной, сульфатной и сульфатоалюминатно-гипсовой коррозии бетона.

Результаты исследования проб бетона свидетельствуют о доминирующем процессе сульфатной коррозии. Степень сульфатизации бетона в слое толщиной 8 мм от поверхности плиты оказалась равной 18 %, что близко к критическому значению, равному 20-25 %. Характерными повреждениями плит являются отслоение защитного слоя и коррозия рабочей арматуры в полке, продольных и поперечных ребрах (рис. 1).

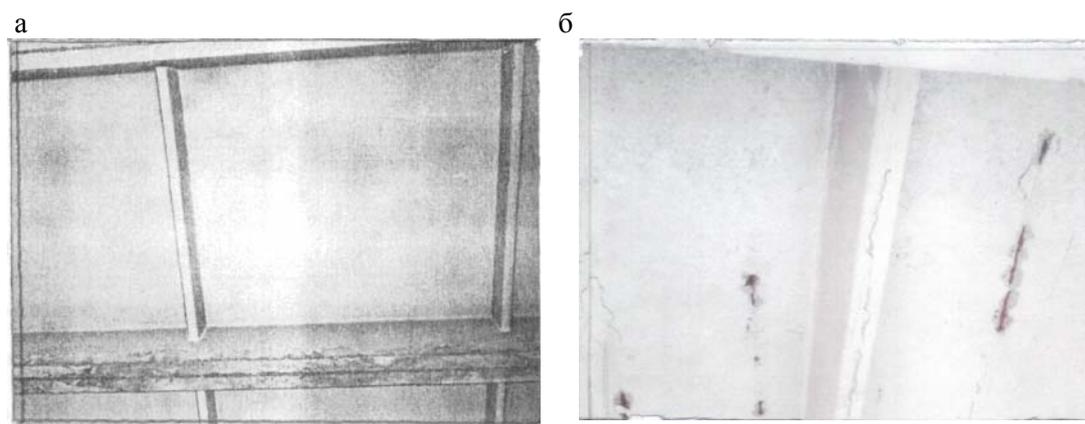


Рис. 1. Характерные повреждения элементов плит:  
а – продольного ребра; б – поперечного ребра и полки

По результатам определения прочности бетона методом вдавливания сферического штампа [3] прочность бетона на боковой поверхности продольных и поперечных ребер находится в пределах 9-14 МПа, в полке (сверху) – 16-18 МПа, а в местах протечек раствора кислот – 6-9 МПа. Коррозия рабочей арматуры продольных ребер примерно составляет 12-20 % площади поперечного сечения.

**Усиление плит**
*Исходные данные*

Сборные ребристые плиты перекрытия нагружены равномерно распределенной нагрузкой и опираются на полки ригелей. Размеры плит в плане  $1,5 \times 5,55$  м (расчетная длина  $l_0=5,45$  м), высота сечения 0,4 м. Проектная марка бетона М200. По результатам неразрушающего контроля прочность бетона поверхностного слоя толщиной до 15 мм (в полке и ребрах) составляет 9-18 МПа.

Рабочая арматура продольных ребер:

- продольная – 2  $\varnothing$  25 АП (по одному стержню в ребре), коррозия стержней в пределах 12-20 % площади сечения;
- поперечная –  $\varnothing$  8 АІ с шагом 150 мм.

Рабочая арматура поперечных ребер:

- продольная –  $\varnothing$  20 АП, коррозия стержней 12-20 % по площади сечения;
- поперечная –  $\varnothing$  8 АІ с шагом 100 мм.

Учитывая масштабные повреждения плит (наличие трещин, коррозия бетона и арматуры), усиление выполняем сверху слоем армированного бетона класса В15 ( $R_b=8,5$  МПа,  $\gamma_{bt}=0,9$ ,  $R_{bt}=0,9$  МПа), а в шве между смежными продольными ребрами – добавочной арматурой из двух стержней диаметром 16 мм класса А400 ( $R_s=355$  МПа,  $A_{s,i} = 4,02$  см<sup>2</sup>). Плиту рассчитываем на прочность в стадии после усиления. Расчетные сечения плиты и армирование показаны на рис. 2.

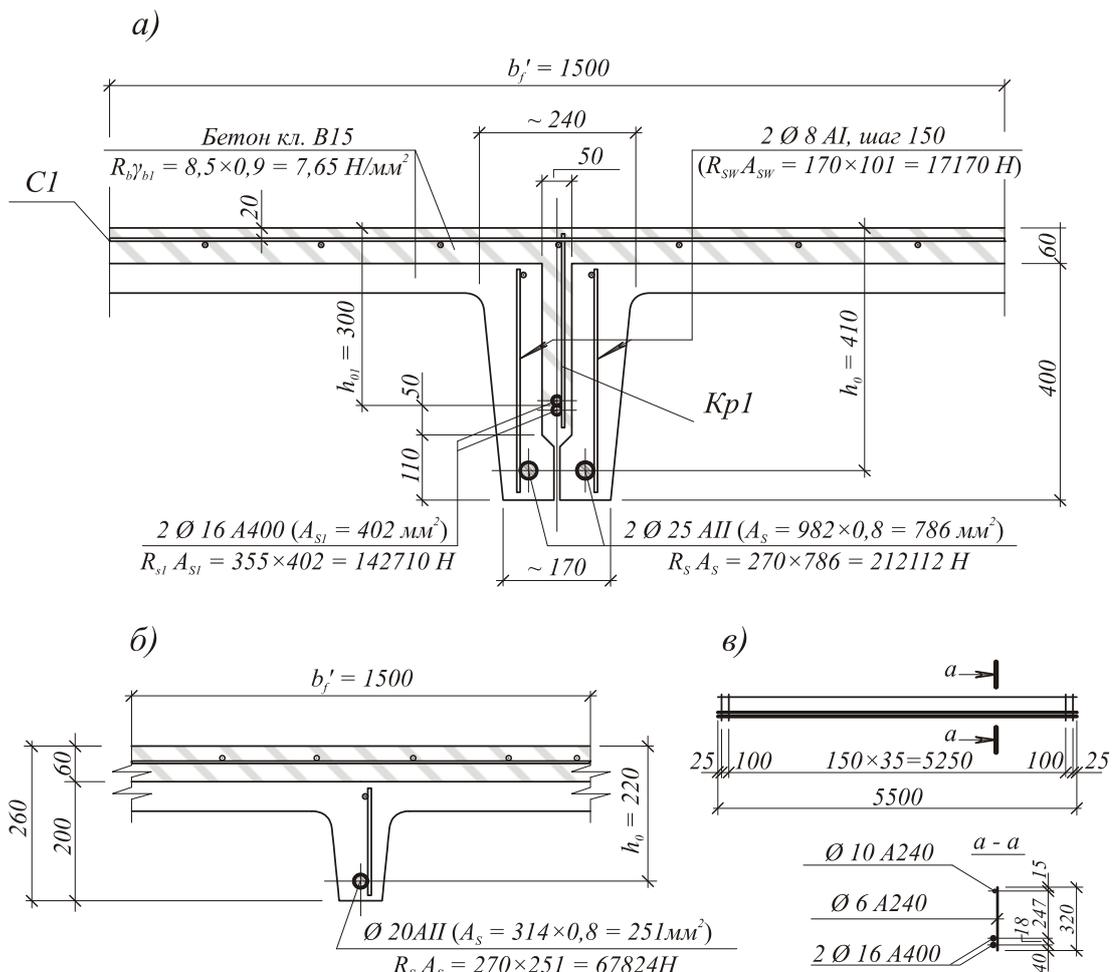


Рис.2. Усиление плиты (основной вариант):

а – расчетное сечение продольных ребер; б – то же поперечных ребер;

в – арматурный каркас усиления Кр1

**Расчетные нагрузки на плиту, кН/м<sup>2</sup>:**

От пола:

кислотоупорная плитка $\delta = 30$ мм, $D = 1800$	$0,03 \times 18 \times 1,2 = 0,65$
цем.-песч. стяжка $\delta = 10$ мм, $D = 1800$	$0,01 \times 18 \times 1,3 = 0,23$
2 слоя рубероида	0,07
цем.-песч. стяжка $\delta = 15$ мм, $D = 1800$	$0,15 \times 18 \times 1,3 = 0,85$
керамзитобетон $\delta = 45$ мм, $D = 1400$	$0,45 \times 14 \times 1,3 = 0,82$
армированная набетонка $\delta = 60$ мм, $D = 2500$	$0,06 \times 25 \times 1,1 = 1,65$
Собственный вес плиты	$2,70 \times 1,1 = 2,97$
Временная по всей площади перекрытия	$2 \times 1,2 = 2,40$
Эквивалентная от двух емкостей, включая их собственный вес	10,80

 Всего  $g = 20,44$ 
**Расчетная несущая способность усиленного сечения плиты при изгибе**

Высота сжатой зоны

$$x = \frac{R_s A_s + R_{s1} A_{s1}}{R_b \gamma_{b1} b'_f} = \frac{212112 + 142710}{7,65 \times 1500} = 31 \text{ мм.}$$

Расчетный изгибающий момент, воспринимаемый усиленным сечением:

$$M = R_s A_s \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + R_{s1} A_{s1} \left( h_{01} - \frac{x}{2} \right) =$$

$$= \left[ 212112 \times \left( 410 - \frac{31}{2} \right) + 142710 \times \left( 300 - \frac{31}{2} \right) \right] \times 10^{-6} = 83,68 + 40,6 = 124,28 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Расчетная погонная нагрузка на плиту

$$q = \frac{8M}{l_0^2} = \frac{8 \times 124,28}{5,45^2} = 33,47 \text{ кН/м.}$$

Полная расчетная равномерно распределенная нагрузка на плиту

$$g_1 = \frac{q}{b_f} = \frac{33,47}{1,5} = 22,32 \text{ кН/м}^2 > 20,44 \text{ кН/м}^2 \quad - \quad \text{несущая способность}$$

обеспечена.

**Проверка несущей способности поперечного ребра плиты на изгиб с учетом набетонки**

Высота сжатой зоны

$$x = \frac{R_s A_s}{R_b \gamma_{b1} b'_f} = \frac{67824}{7,65 \times 1500} = 5,9 \text{ мм.}$$

Расчетный изгибающий момент, воспринимаемый поперечным ребром:

$$M = R_s A_s \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) = 67824 \times \left( 220 - \frac{5,9}{2} \right) \times 10^{-6} = 14,72 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Приближенный (в запас прочности) изгибающий момент от расчетной погонной нагрузки, приходящейся на поперечное ребро, при шаге ребер 1,5 м

$$\frac{22,32 \times 1,5 \times 1,5^2}{8} = 9,42 \text{ кН} \cdot \text{м} < M = 14,72 \text{ кН} \cdot \text{м} \quad - \quad \text{прочность обеспечена.}$$

**Расчет усиленной плиты на поперечную силу**

$$q = 33,47 \text{ кН/м};$$

$$Q_{\max} = 0,5 \times 33,47 \times 5,45 = 91,20 \text{ кН}.$$

$$\text{Бетон класса В15} - R_{bt} \cdot \gamma_{b1} = 0,75 \times 0,9 = 0,675 \text{ Н/мм}^2 = 675 \text{ кН/м}^2.$$

Припорная поперечная арматура плиты (принята по конструктивному минимуму без учета дополнительных стержней в усиленном шве) – 2 Ø 8 АІ, шаг  $s_w = 0,15 \text{ м}$ ;

$$R_{sw} = 170 \text{ Н/мм}^2; A_{sw} = 101 \text{ мм}^2; R_{sw} A_{sw} = 17170 \text{ Н} = 17,17 \text{ кН}.$$

Расчетная усредненная ширина двух ребер и армированного шва

$$b = (0,24 + 0,17) \times 0,5 = 0,205 \text{ м}.$$

Поскольку

$$Q_{\max} = 91,20 \text{ кН} < 2,5 R_{bt} b h_0 = 2,5 \times 675 \times 0,205 \times 0,41 = 141,8 \text{ кН}, \text{ но}$$

$$Q_{\max} > 0,5 R_{bt} b h_0 + 3 h_0 q = 0,5 \times 675 \times 0,205 \times 0,41 + 3 \times 0,41 \times 33,47 = 74,67 \text{ кН},$$

проверка плиты на действие поперечной силы необходима.

$$\text{Момент среза } M_b = 1,5 R_{bt} b h_0^2 = 1,5 \times 675 \times 0,205 \times 0,41^2 = 34,89 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Погонное усилие, воспринимаемое поперечной арматурой:

$$q_{sw} = \frac{R_{sw} A_{sw}}{s_w} = \frac{17,17}{0,15} = 114,5 \text{ кН/м} > 0,25 R_{bt} b = 0,25 \times 675 \times 0,205 = 34,6 \text{ кН/м}.$$

$$\text{При } q_{sw} = 114,5 \text{ кН/м} < 2 R_{bt} b = 2 \times 675 \times 0,205 = 276,7 \text{ кН/м}$$

$$\text{плечо среза } c = \sqrt{M_b / q} = \sqrt{34,89 / 41,62} = 0,915 \text{ м} < 3 h_0;$$

длина проекции опасной наклонной трещины  $c_0 = c$ , но не более  $2 h_0 = 2 \times 0,41 = 0,82 \text{ м}$  – принимаем  $c_0 = 0,82 \text{ м}$ .

Расчетная поперечная сила

$$Q = Q_{\max} - qc = 91,2 - 33,47 \times 0,915 = 60,58 \text{ кН}.$$

Поперечная сила, воспринимаемая бетоном:

$$Q_b = M_b / c = 34,89 / 0,915 = 38,13 \text{ кН} < 2,5 R_{bt} b h_0 = 141,8 \text{ кН} \text{ и} \\ > 0,5 R_{bt} b h_0 = 28,37 \text{ кН}.$$

Поперечная сила, воспринимаемая поперечной арматурой:

$$Q_{sw} = 0,75 q_{sw} c_0 = 0,75 \times 114,5 \times 0,82 = 70,4 \text{ кН}.$$

$Q_b + Q_{sw} = 38,13 + 70,4 = 108,5 \text{ кН} > Q = 69,58 \text{ кН}$  – прочность опасного наклонного сечения плиты обеспечена.

Прочность наклонной полосы между наклонными трещинами также обеспечена:  $0,3 R_{bt} \gamma_{b1} b h_0 = 0,3 \times 7,65 \times 10^3 \times 0,205 \times 0,41 = 192,9 \text{ кН} > Q_{\max} = 91,2 \text{ кН}$ .

**Существенный запас прочности плиты по наклонному сечению позволяет ее усилить, не применяя каркас К1, при этом дополнительные рабочие стержни 2Ø16А400 можно разместить под плитой, приварив к стержням продольные ребра в соответствии с рис.3 (резервный вариант усиления).**

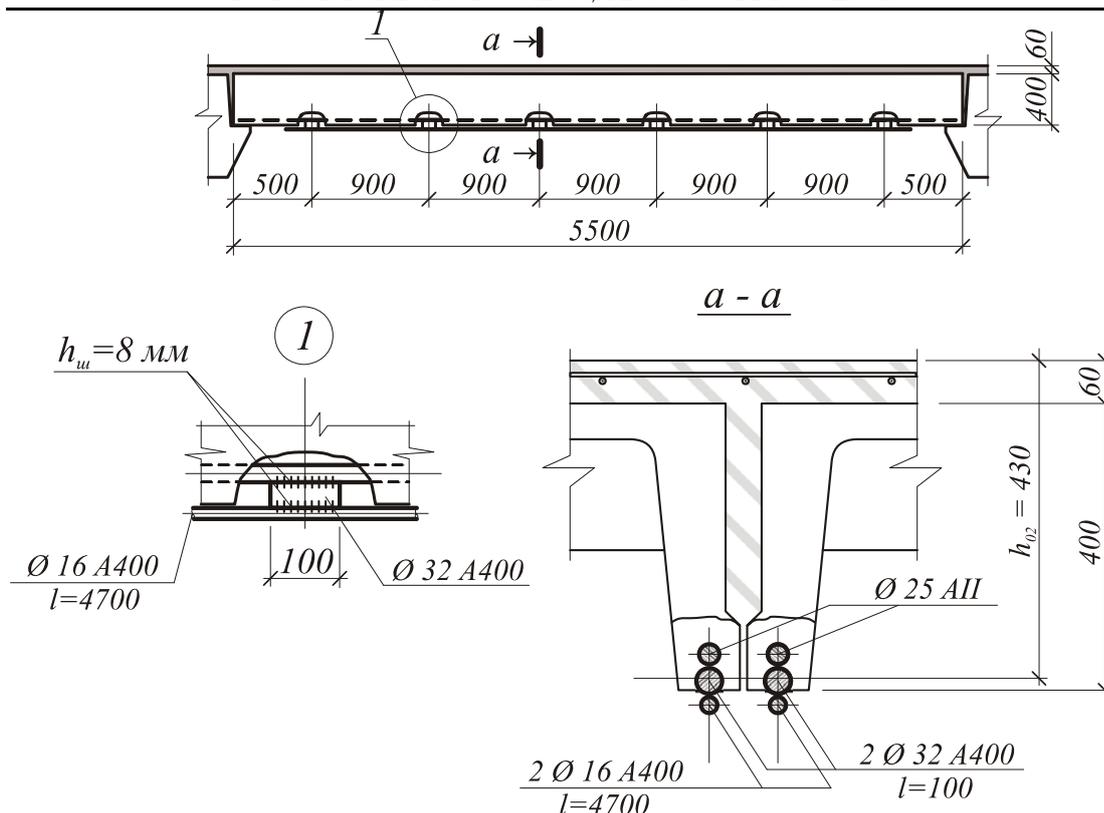


Рис. 3. Усиление плиты набетонкой в полке и добавочной арматурой в продольных ребрах (резервный вариант)

*Проверка прочности сечения плиты*

Полезная высота усиленного сечения  $h_{02} = 430$  мм.

Высота сжатой зоны

$$x = \frac{R_S A_S m_1 + R_{S1} A_{S1} m_2}{R_b \gamma_{b1} b'_f} = \frac{212112 \times 0,75 + 142710 \times 0,85}{7,65 \times 1500} = 24,4 \text{ мм.}$$

Расчетный изгибающий момент, воспринимаемый усиленным сечением:

$$\begin{aligned} M &= R_S A_S m_1 \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + R_{S1} A_{S1} m_2 \left( h_{02} - \frac{x}{2} \right) = \\ &= \left[ 159084 \times \left( 410 - \frac{24,4}{2} \right) + 121303,5 \times \left( 430 - \frac{24,4}{2} \right) \right] \times 10^{-6} = \\ &= 63,28 + 50,7 = 113,98 \text{ кН} \cdot \text{м}, \end{aligned}$$

где  $m_1 = 0,75$  – коэффициент, учитывающий повреждение рабочей арматуры при подварке стержней;  $m_2 = 0,85$  – коэффициент условий работы приваренных стержней.

Полная расчетная равномерно распределенная нагрузка на плиту

$$g_2 = \frac{8M}{l_0^2 b_f} = \frac{8 \times 113,98}{5,45^2 \times 1,5} = 20,47 \text{ кН/м}^2 > g = 20,44 \text{ кН/м}^2 \text{ – несущая способность}$$

обеспечена.

### Последовательность работ по усилению плит

1. Подготовительные работы:

- вскрываются полы и очищаются от раствора швы между плитами; делается насечка, увлажняется поверхность полки и швов; на участках с признаками коррозии

арматуры вскрывается защитный слой бетона; поверхность арматуры обрабатывается преобразователем ржавчины, и наносится защитное покрытие.

#### 2. Усиление плит:

- устанавливается арматурный каркас Кр1, затем укладывается бетон в швы и на полку; восстанавливается конструкция пола (основной вариант);
- укладывается бетон в швы и на полку, затем к рабочей арматуре продольных ребер привариваются стержни усиления и наносится защитное покрытие (резервный вариант).

#### Выводы

Обобщены и проанализированы результаты обследования железобетонного перекрытия.

Изучено физическое состояние железобетонных плит после длительной эксплуатации в агрессивной среде.

Исследованы параметры агрессивной среды и степень ее влияния на коррозию бетона и арматуры.

Установлены участки плит, наиболее подверженные разрушению от коррозии.

На основании результатов обследования и поверочных расчетов прочности разработаны способы усиления плит.

#### Рекомендации

- **В помещениях подвала и первого этажа устроить приточно-вытяжную вентиляцию.**
- **В конструкции пола использовать кислотоупорную плитку.**
- **В набетонке применять глиноземистый или пуццолановый портландцемент.**

#### Список литературы

1. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 528 с.
2. Danilov, A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 5-8. – С. 219–225.
3. Гучкин, И.С. Техническая эксплуатация и реконструкция зданий / И.С. Гучкин. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 312 с.

#### References

1. Bazhenov, Yu.M. Concrete Technology / Yu.M. Bazhenov. – M.: DIA Publishing House, 2011. – 528 p.
2. Danilov, A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 5-8. – С. 219–225.
3. Guchkin, I.S. Technical operation and reconstruction of buildings / I.S. Guchkin. – M.: DIA Publishing House, 2016. – 312 p.

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

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

ООО «МонГрад»

Россия, 440068, Пенза,  
ул.Терновского, 214

**Лаштанкин Алексей Сергеевич,**  
директор  
E-mail: as@mongrad.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Garkin Igor Nikolaevich,**  
Associate Professor of the department  
«Quality Management and Technology  
of Building Production»  
E-mail: igor\_garkin@mail.ru

"MonGrad"

Russia, 440068, Penza, 214, Ternovsky St.

**Lashtankin Alexey Sergeyevich**  
Director  
E-mail: as@mongrad.ru

## ЦИКЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК НА ВЫНОСЛИВОСТЬ

И.Н. Гарькин, А.С. Лаштанкин

Приводятся исследования разработанных подкрановых конструкций. Анализируются результаты циклических испытаний на выносливость для разработанной авторами амортизирующей подкрановой балки замкнутого профиля. Показывается преимущество использования таких балок (с замкнутым профилем) и арочного кранового рельса по сравнению со стандартными профилями.

*Ключевые слова: строительные конструкции, подкрановая балка, циклические испытания, выносливость, долговечность*

## CYCLIC TESTS OF CRANE BEAMS ON ENDURANCE

I.N. Garkin, A.S. Lashtankin

Some studies of developed crane structures are presented. The results of cyclic endurance tests for a shock-absorbing crane beam of a closed profile developed by the authors are analyzed. The advantage of using such beams (with a closed profile) and an arched crane rail in comparison with standard profiles is shown.

*Keywords: building constructions, crane beam, cyclic tests, endurance, durability, regression line*

Высокий уровень износа подкрановых конструкций на предприятиях реального сектора экономики [1] обуславливает необходимость разработки новых видов подкрановых балок и конструкций. Один из перспективных способов создания подкрановых балок с улучшенными характеристиками – изготовление подкрановых балок с замкнутым профилем. Авторами были проведены исследования по изучению характеристик подобной подкрановой конструкции.

Цель исследования – изучить влияние на выносливость напряжённого состояния в верхней части амортизирующей балки. Для реализации этой цели были поставлены следующие задачи:

- разработать амортизирующую балку в 1/2 натуральной величины;
- исследовать влияние на выносливость балки при подвижных сосредоточенных воздействиях колёс крана при циклических испытаниях.

Испытания проводились на специально разработанном стенде (все возможности и преимущества стенда для циклических испытаний приведены в [2, 3]; общий вид стенда – на рис.1).

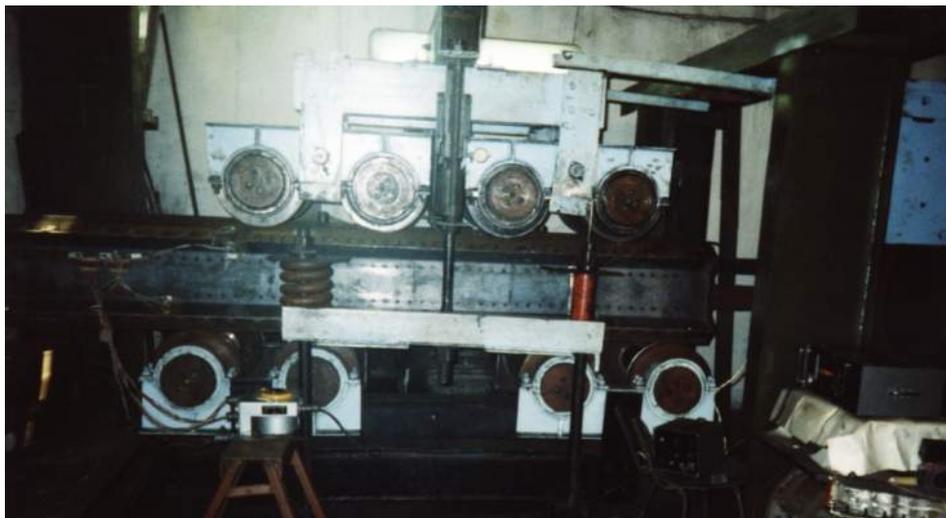


Рис. 1. Общий вид стенда для испытания балок на выносливость

Геометрические характеристики испытываемых балок: длина модели балки 3000 мм; сечение рельса – уголок 80×8, сечение затяжки из листа 200×3 мм; сечение балки: горизонтальный участок 40×2 мм, наклонный участок 72×2 мм, вертикальный участок 202×2 мм (рис. 2).

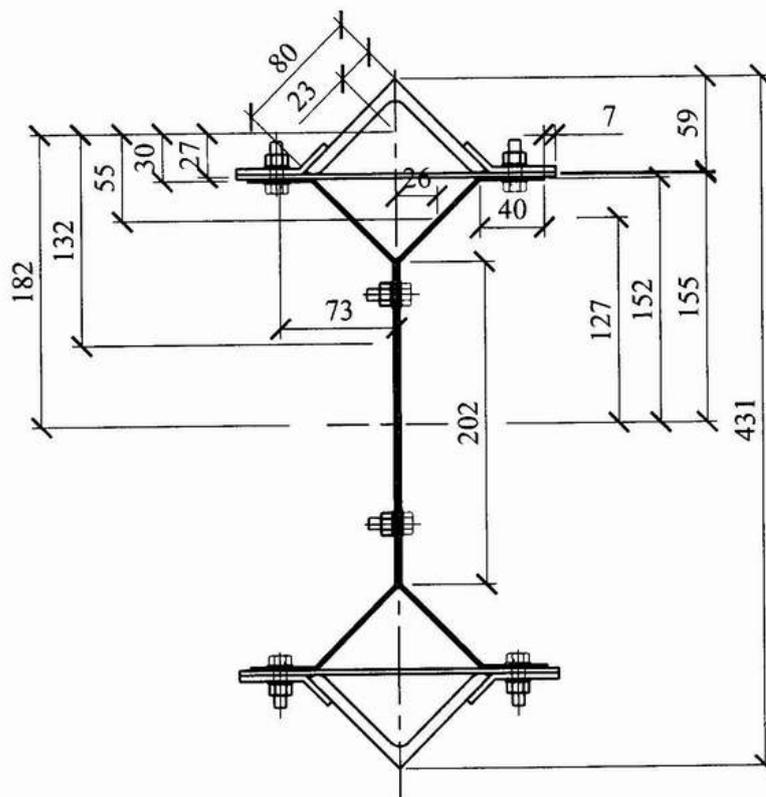


Рис. 2. Геометрические размеры испытываемой амортизирующей балки

Перед сборкой амортизирующей балки из гнутых элементов поверхности сплачивания обрабатывались шлифовальной машинкой. Для установки в стенд две балки Б-1 фиксировались между собой в блок с вертикальным уклоном 1:10 для имитации горизонтальной составляющей нагрузки от колёс крана с помощью связей, талрепов, тормозной конструкции и узла крепления головки шатуна (рис.3). Для записи изменения деформаций при проведении испытаний использовался автоматический из-

меритель деформаций ЦТК-1 в комплекте со стопозиционным переключателем АП-3. Циклическим воздействиям колёс кранов подвергались пять локальных участков каждой балки длиной  $2 \cdot (480 + 700) = 2360$ , что составляет  $2360/3000 \cdot 100 \% = 79 \%$  пролёта балки. При этом реализуется наибольший размах колебаний сдвигающих напряжений в подрельсовой зоне балок и происходит полная смена циклов локальных сдвигов от напряжений:  $\tau_{2\max}^{loc}$  и  $\tau_{xy}^{loc}$  (рис. 4).

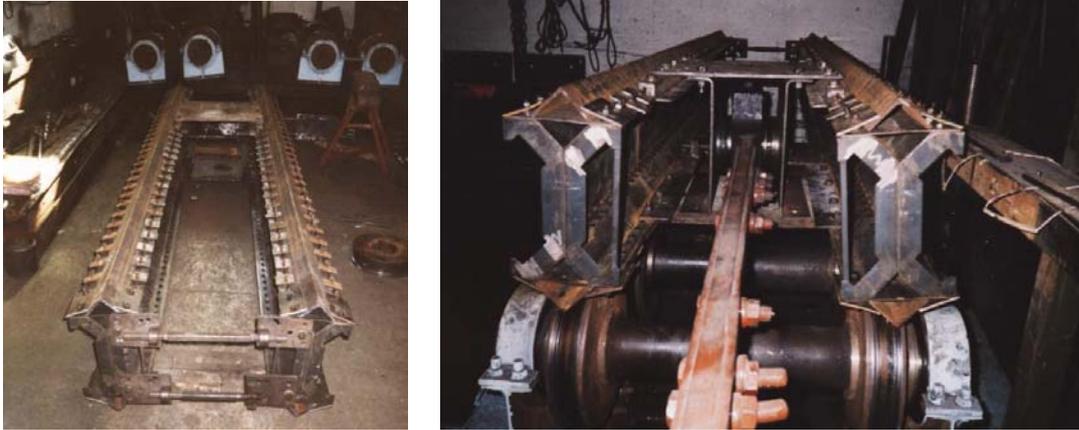


Рис. 3. Экспериментальные балки в блоке перед испытаниями

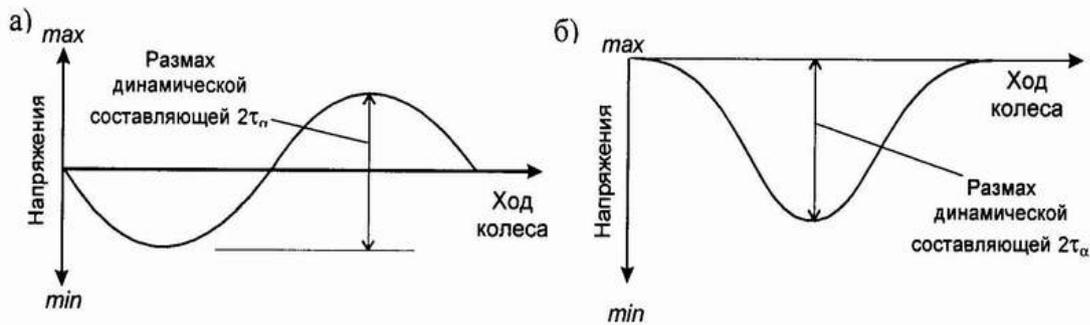


Рис. 4. Схема полной смены циклов колебаний локальных сдвигающих напряжений при одном цикле движений колёс кранов:

а – напряжения  $\tau_{xy}$ ; б – напряжения  $\tau_{2\max}$

Прокатные балки имеют максимальную высоту сечения, равную  $h = 1$  м, и относительно малый момент сопротивления  $W_x$ , из-за чего применять их можно для кранов грузоподъемностью до 30 т при пролёте не более 6 м. Поэтому на действующих предприятиях чаще всего эксплуатируют сварные подкрановые балки. Предел выносливости для сварных балок, имеющих наименьший ресурс К-образного шва при отнулёвых колебаниях сдвигающих напряжений на базе шести миллионов циклов прокатываний колёс кранов, равен  $R_{\text{пред вынос}} = 46,9$  МПа [4,5].

Предел выносливости для прокатных балок при отнулёвых колебаниях на базе шести миллионов циклов прокатывания колёс кранов – 88 МПа. То есть в  $88/46,9 = 1,876$  раза прокатные балки выносливее сварных балок без амортизирующей способности. По данным усталостных испытаний составных балок построены линии влияния колебаний напряжений в подрельсовых зонах балки (рис. 5-14).

P-1 (рельс, фасад)

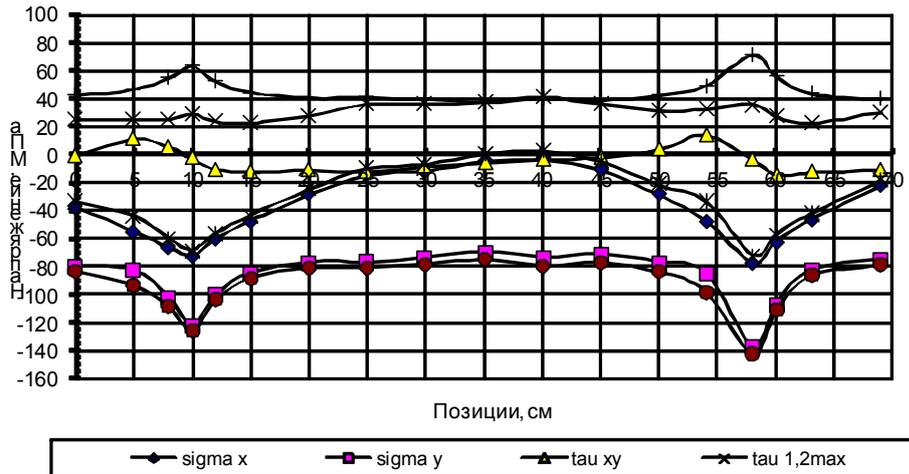


Рис. 5. Линии влияния колебаний напряжений в рельсе (розетка P-1)

P-2 (верх наклон, фасад)

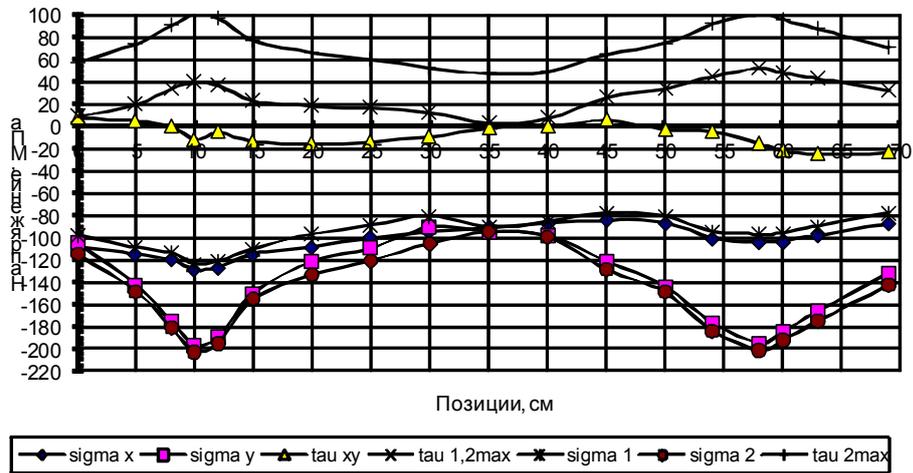


Рис. 6. Линии влияния колебаний напряжений в наклонной верхней части стенки (розетка P-2)

P-3 (верх стенка, фасад)

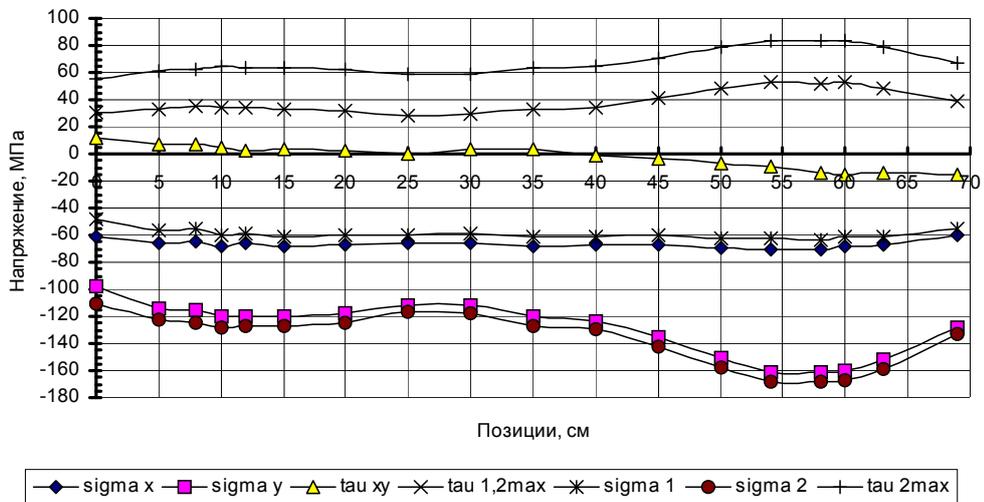


Рис. 7. Линии влияния колебаний напряжений в вертикальной верхней части стенки (розетка P-3)

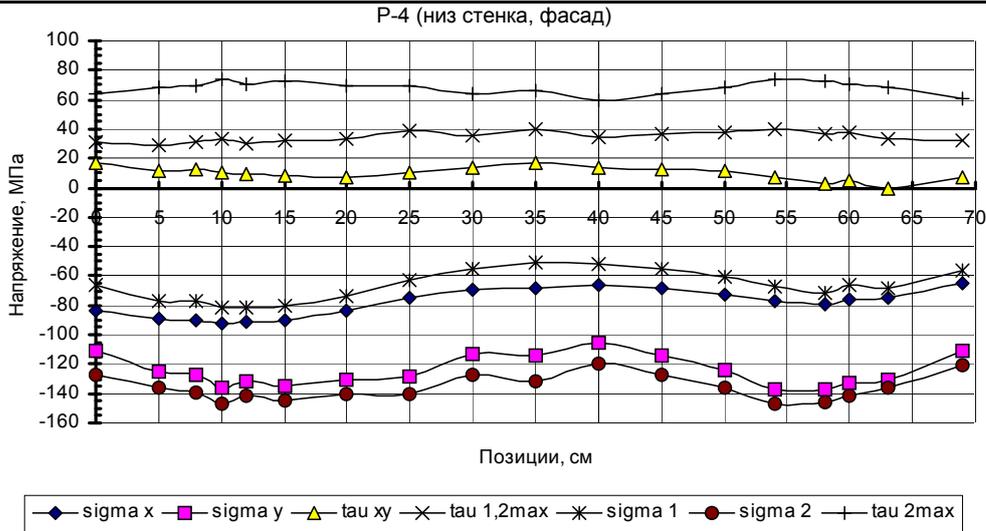


Рис. 8. Линии влияния колебаний напряжений в вертикальной нижней части стенки (розетка Р-4)

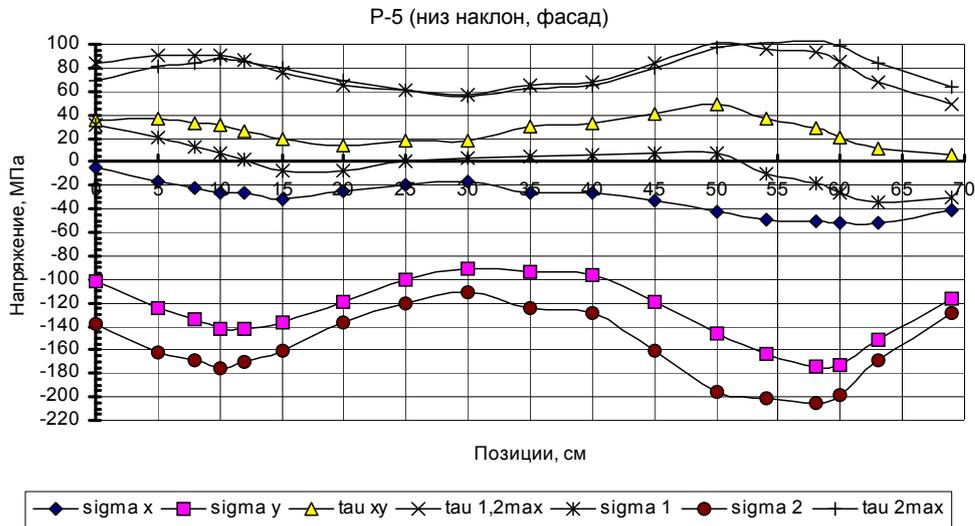


Рис. 9. Линии влияния колебаний напряжений в наклонной нижней части стенки (розетка Р-5)

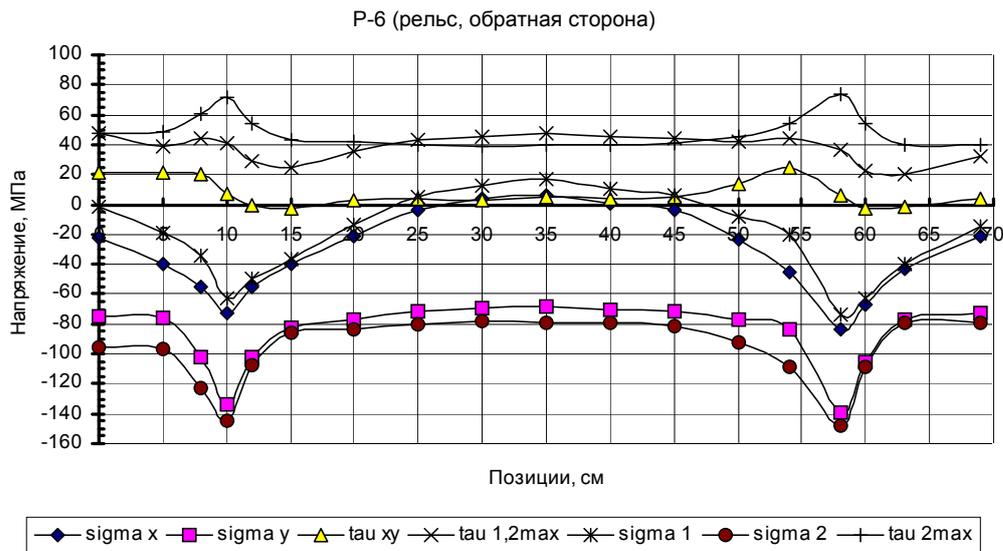


Рис. 10. Линии влияния колебаний напряжений в рельсе (розетка Р-6)

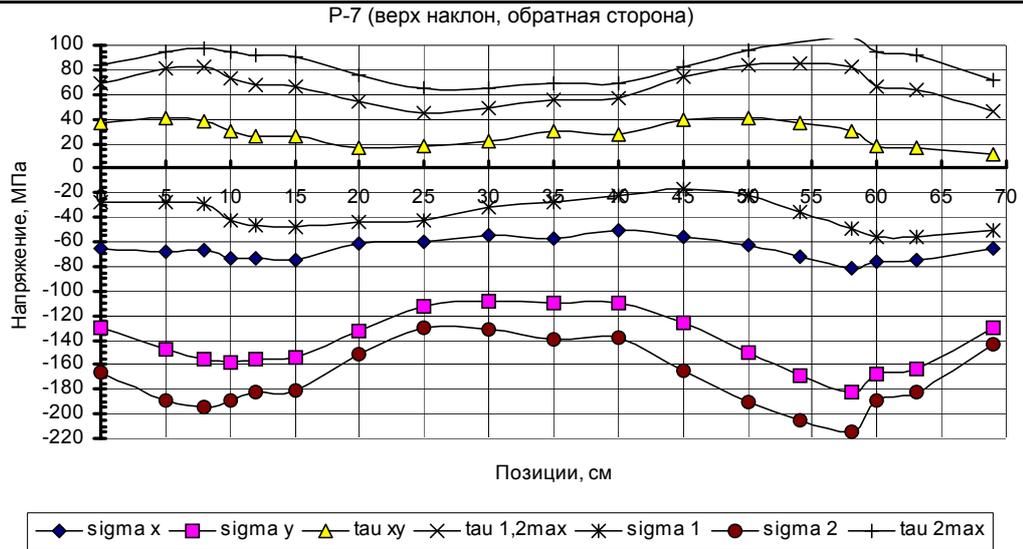


Рис. 11. Линии влияния колебаний напряжений в наклонной верхней части стенки (розетка P-7)

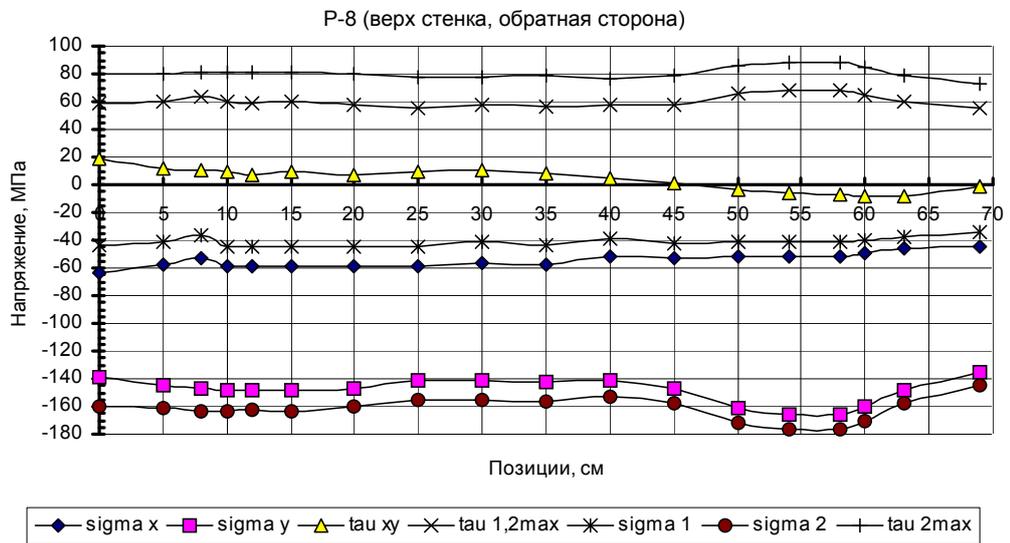


Рис. 12. Линии влияния колебаний напряжений в вертикальной верхней части стенки (розетка P-8)

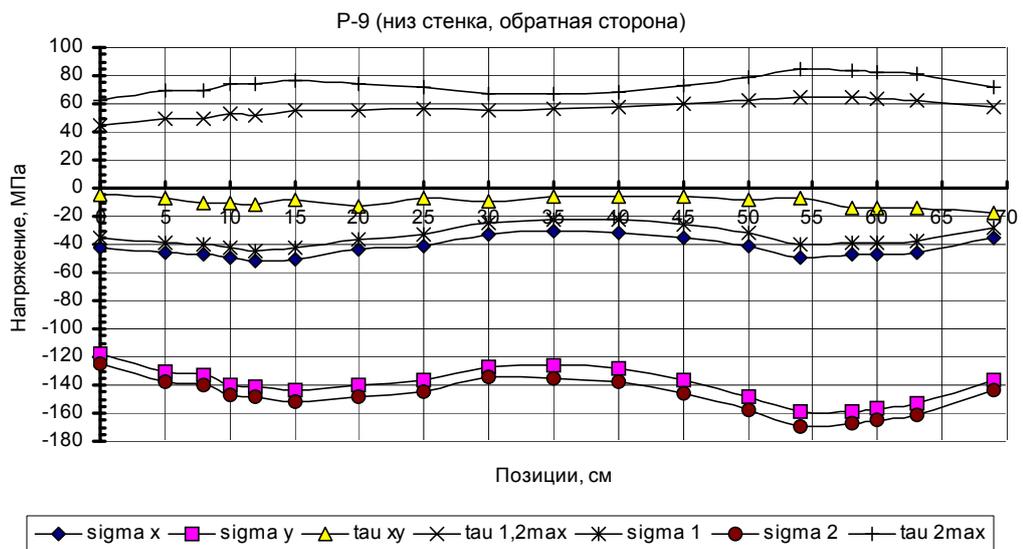


Рис. 13. Линии влияния колебаний напряжений в вертикальной нижней части стенки (розетка P-9)

Р-10 (низ наклон, обратная сторона)

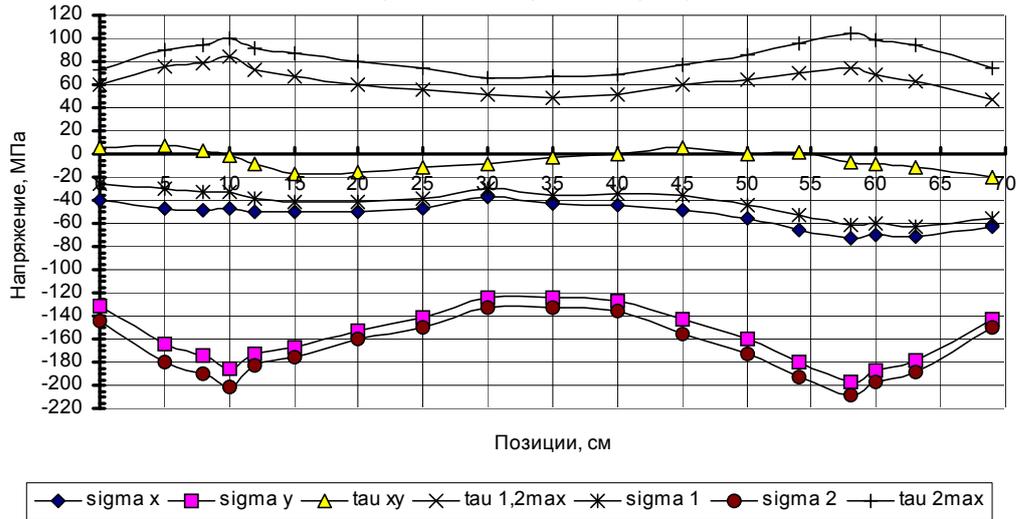


Рис. 14. Линии влияния колебаний напряжений в наклонной нижней части стенки (розетка Р-10)

Контактные напряжения под колесом были велики, и происходили интенсивный износ и истирание этой зоны (рис. 15, 16). Очевидно, что наличие главы у реального рельса и прокат его из износостойкой стали в несколько раз снизят износ.

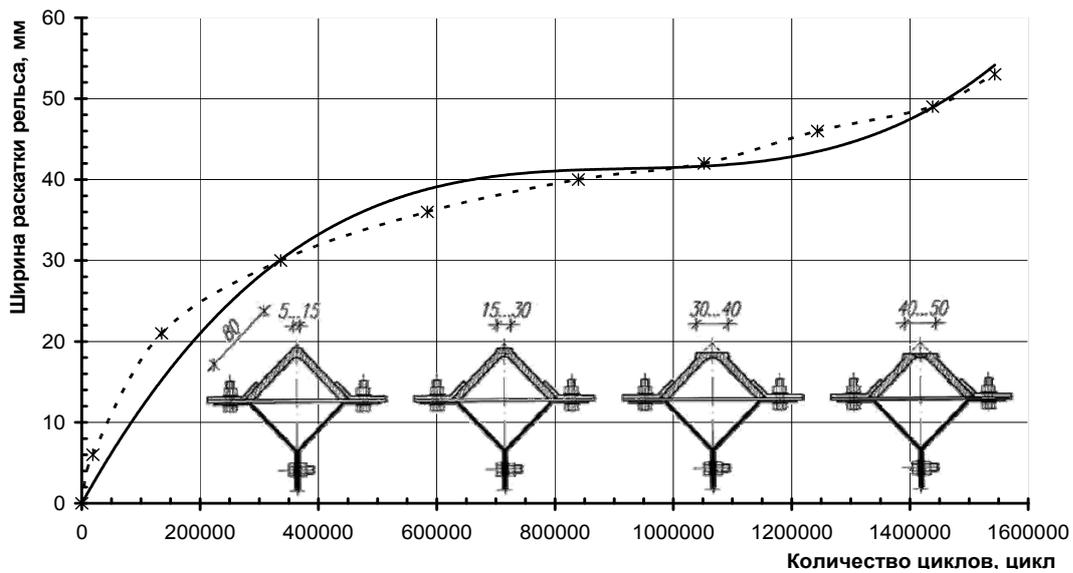


Рис. 15. Зависимость ширины раскатки рельса от циклов нагружения

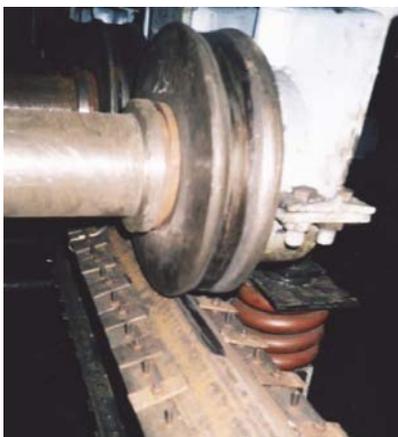


Рис. 16. Износ рельса

На гладком участке, где непосредственно наклеены датчики, концентраторы отсутствуют, следовательно, в месте наклейки тензорезисторов появление усталостных трещин возможно лишь при напряжениях, близких к пределу текучести, а такого уровня напряжения при проведении эксперимента не достигали. Непосредственно в зоне закругления величину напряжений померить не удалось. Несмотря на то что концентрация напряжений невелика, она все же присутствует (наклеп, остаточные напряжения от изгиба) и неблагоприятно влияет на выносливость.

Максимальные напряжения составили:  $\sigma_2=207$  МПа,  $\sigma_y=204$  МПа и  $\tau_{2max}=102$  МПа > 88 МПа, поэтому можно говорить о том, что усталостные трещины (рис. 17) возникли при относительно значительных амплитудах колебаний сдвигающих напряжений  $\tau_{2max}$ .



Рис. 17. Усталостная трещина в составной балке в подрельсовой зоне

В балке возникла усталостная трещина после прохождения 3,3 млн циклов. Обычные сварные балки с полным проваром и с плавным сопряжением стенки и пояса выдерживают 700-800 тысяч циклов при таком же уровне напряжений. Отсюда следует, что работоспособность амортизирующих подкрановых балок из гнутых профилей в 4 раза выше, чем сварных.

Усталостные испытания подтвердили высокую выносливость составных балок, предел выносливости которых можно ориентировочно принимать как для прокатных балок сплошного сечения или балок с поясами из тавров, то есть  $R_v=88$  МПа на базе  $6 \cdot 10^6$  циклов прокатывания колёс кранов. По данным, полученным при циклических испытаниях, стало возможным нанести на график линии регрессии, сформированный Неждановым К.К. [7], очередную точку с маркировкой «ГН», которая означает составную балку из гнутых (прокатных) профилей (рис. 18).

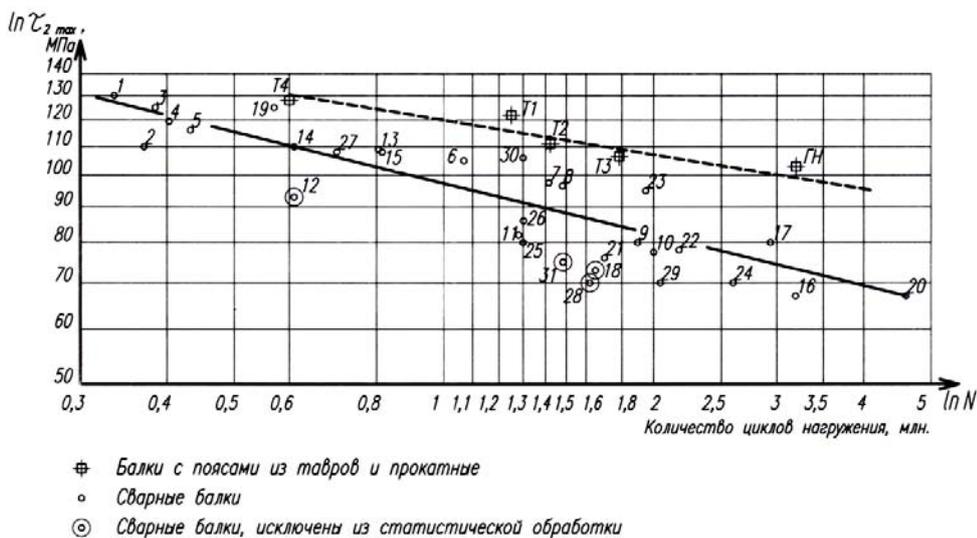


Рис. 18. Линии регрессии для сварных и прокатных балок

Эта точка хорошо ложится на линию регрессии для балок с поясами из тавров; регрессионная зависимость имеет вид

$$\tau = 119,5797 \cdot N^{-0,16097},$$

где  $N$  – количество циклов нагружения (в млн).

Отсюда несложно получить пределы выносливости для различного количества циклов нагружения:

$R_v=88,0$  МПа на базе  $6 \cdot 10^6$  циклов нагружений;

$R_v=95,7$  МПа на базе  $4 \cdot 10^6$  циклов нагружений;

$R_v=107$  МПа на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов нагружений.

Линия регрессии наглядно демонстрирует, что долговечность составных подкрановых балок на порядок выше долговечности сварных и сравнима с долговечностью подкрановых балок с поясами из тавров.

Величина касательных напряжений при 3,3 млн циклов нагружений составляет:

$$\tau = 119,5797 \cdot N^{-0,16097} = 119,5797 \cdot 3,3^{-0,16097} = 98,67 \text{ МПа}.$$

Обработка результатов экспериментов с учётом тройного рассеяния [6, 7] приведена на рис.19.

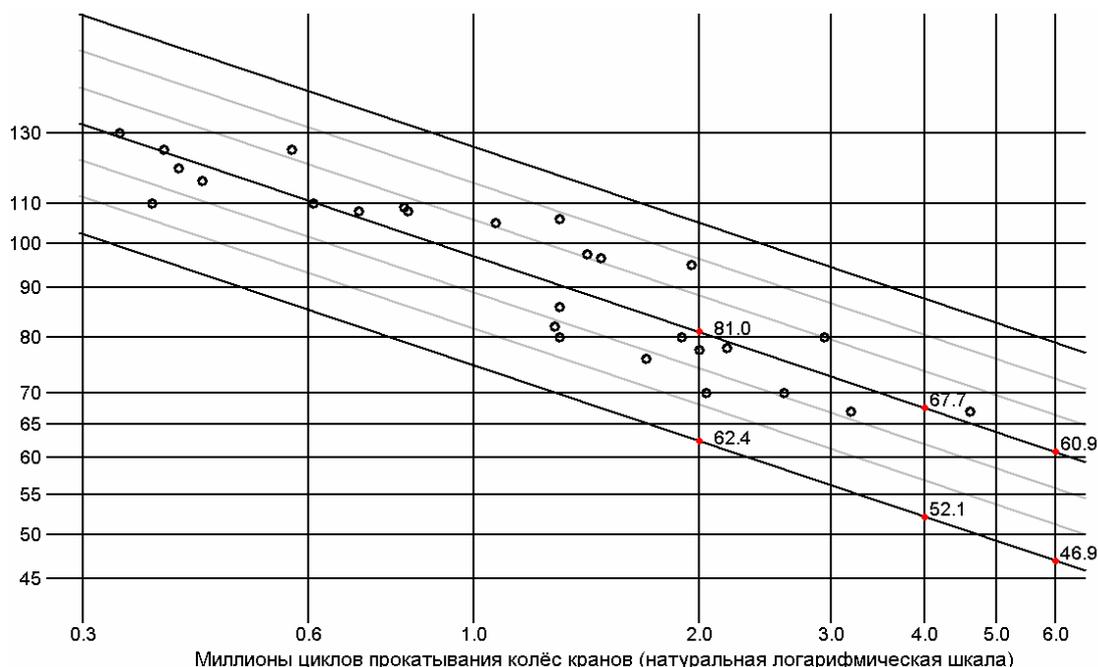


Рис. 19. Линия регрессии при отнулевых колебаниях сдвигающих напряжений; горизонтальная ось – миллионы циклов нагружений, вертикальная ось – величины сдвигающих напряжений (МПа)

Учёт тройного рассеяния  $3\sigma_{\ln\tau/\ln N}$  в одну и другую сторону от линии регрессии в координатах натуральных логарифмов действительно обеспечивает попадание 99,7 % испытаний в полосу рассеяния. Полученные пределы выносливости гарантируют достаточную работоспособность при заданном числе циклов прокатывания колёс кранов.

#### Список литературы

1. Гарькин, И.Н. Совершенствование подкрановых конструкций: монография / И.Н. Гарькин. – М.: Издательство «Перо», 2020. – 104 с.

2. Нежданов, К.К. Испытание неразрезных подкрановых балок на выносливость / К.К. Нежданов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 2. – С. 81–86.
3. Нежданов, К.К. Перспективные разработки в области конструирования подкрановых конструкций / К.К. Нежданов, И.Н. Гарькин // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2018. – №2(15). – С.204–213.
4. Сабуров, В.Ф. Влияние стыка кранового рельса на работу подкрановых путей промышленных зданий / В.Ф. Сабуров // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 2 (686). – С. 5–14.
5. Туманов, В.А. Повышение выносливости стальных подкрановых балок / В.А. Туманов // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 1. – С. 75–82.
6. 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.
7. Нежданов, К.К. Решение проблемы выносливости подкрановых балок при тяжёлом режиме эксплуатации: монография / К.К. Нежданов, А.К. Нежданов. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 124 с.

### References

1. Garkin, I.N. Improvement of crane structures: monograph / I.N. Garkin. – M.: Publishing House «Perot», 2019.
2. Nezhdanov, K.K. Endurance test of continuous crane girders / K.K. Nezhdanov, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2016. – No. 2. – P. 81–86.
3. Nezhdanov, K.K. Promising developments in the field of construction of crane structures / K.K. Nezhdanov, I.N. Garkin // Education and Science in the Modern World. Innovation. – 2018. – №2 (15). – P.204–213.
4. Saburov, V.F. Influence of the junction of a crane rail on the operation of crane tracks of industrial buildings / V.F. Saburov // News of Higher Educational Institutions. Building. – 2016. – № 2 (686). – P. 5–14.
5. Tumanov, V.A. Increasing the endurance of steel crane beams / V.A. Tumanov // Regional architecture and engineering. – 2012. – № 1. – P. 75–82.
6. Saburov, V.F. Using elastic base models to analyze the distribution of local stresses in the wall of steel composite beams / V.F. Saburov // Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture. – 2014. – № 4, vol. 14. – P. 15–20.
7. Nezhdanov, K.K. The solution to the problem of endurance of crane beams in heavy operation: monograph / K.K. Nezhdanov, A.K. Nezhdanov. – Penza: PGUAS, 2015. – 124 p.

УДК 624.014.2.072.23.046.5

*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

**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

**Курткезов Дмитрий Харлампевич,**  
инженер  
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

**Kurtkeзов Dmitry Kharlampevich,**  
Engineer  
E-mail: igor\_garkin@mail.ru

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НЕРАЗРЕЗНЫХ ПОДКРАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

К.К. Нежданов, И.Н. Гарькин, Д.Х. Курткезов

Приводятся результаты динамических усталостных испытаний стальных подкрановых балок. Имитируется интенсивная непрерывная эксплуатация (на специальном стенде), аналогичная работе мостовых кранов с тяжелым режимом работы 8К, 7К. Актуальность испытаний определяется низким нормативным сроком безопасной эксплуатации (10 лет) в действующих цехах чёрной и цветной металлургии, где подкрановые балки являются наиболее ответственными конструкциями. Усталостные испытания двухпролетных подкрановых конструкций проводились на базе 6 миллионов циклов прокатывания колёс кранов (до разрушения конструкций). Подтвердилась высокая выносливость и надёжность неразрезных подкрановых балок.

*Ключевые слова: динамические испытания, подкрановые конструкции, технический ресурс, двухпролётные подкрановые балки, выносливость подрельсовой зоны, локальные колебания напряжений, крановые рельсы*

## TEST RESULTS OF CONTINUOUS CRANE STRUCTURES

K.K. Nezhdanov, I.N. Garkin, D.Kh. Kurtkeзов

The results of dynamic fatigue tests of steel crane beams are presented. Intensive, continuous operation (at a special stand) is simulated. It is similar to the operation of overhead cranes with heavy operating conditions 8A, 7A. The relevance of such tests is justified by a low normative period of safe operation (10 years) in the existing shops of ferrous and non-ferrous metallurgy, where crane beams are the most necessary structures. Fatigue tests of two-span crane structures were carried out on the basis of 6 million cycles of rolling the wheels of cranes (up to the destruction of structures). High endurance and reliability of continuous crane beams is confirmed.

*Keywords: dynamic tests, crane structures, technical resource, double-span crane beams, under-rail zone endurance, local voltage fluctuations, crane rails*

В действующих цехах подкрановые балки имеют минимальный нормативный срок безопасной эксплуатации до 10 лет и по существу определяются как наиболее ответственные за надёжность сооружения в целом. Согласно ГОСТ 23118–2012 эксплуатация стальных конструкций с трещинами запрещается, однако, как оказалось, во многих случаях указанный запрет нарушается [1]. Соответственно, проблема безаварийной эксплуатации подкрановых балок актуальна, и один из способов её решения – это переход к неразрезным подкрановым конструкциям.

В Пензенском государственном университете архитектуры и строительства длительное время проводятся испытания на выносливость неразрезных подкрановых балок на специально разработанном стенде [2].

Цель данных испытаний – показать большую выносливость неразрезных двутавровых подкрановых балок по сравнению с выносливостью разрезных, сварных, однопролётных балок, наиболее широко используемых в промышленности, несмотря на низкий технический ресурс. Испытания подвижными воздействиями колёс кранов проводились на базе *шести миллионов циклов*.

На стенде имитируются циклические воздействия восьмиколёсных мостовых кранов. Одновременно испытывается на выносливость блок из четырёх неразрезных двухпролётных балок; пара верхних балок связана с парой нижних балок посредством цилиндрических шарниров; все прокатные балки в блоке установлены под углом  $\approx 3^\circ$ , что обеспечивает имитацию горизонтальных тормозных сил.

Стенд имитирует движение двух восьмиколёсных кранов (верхний колёсами вниз, а нижний колёсами вверх). Между колёс зажат блок испытываемых балок (всего четыре подкрановые балки). Силы сжатия блока испытываемых балок контролируются динамометрами (рис. 1), снабженными индикаторами часового типа.

Электродвигатель через редуктор приводит во вращение массивный маховик массой 3,5 т, а маховик с помощью шатуна (зажат между колёс восьмиколёсных мостовых кранов) сообщает возвратно-поступательные циклические колебания блоку неразрезных подкрановых балок. Шатун обеспечивает колебания испытываемых балок с заданной амплитудой 350 мм и размахом 700 мм. Число циклов возвратно-поступательных колебаний блока балок определяется по счётчику.

Интенсивная эксплуатация стенда (80 часов в неделю) при испытании неразрезных балок привела к сильному износу шестигранных рельсов ( $h=22$  мм) примерно до половины их сечения. Истирание происходило в зоне контакта гребней колёс с рельсами. Рельсы были заменены новыми, идентичными предыдущим.

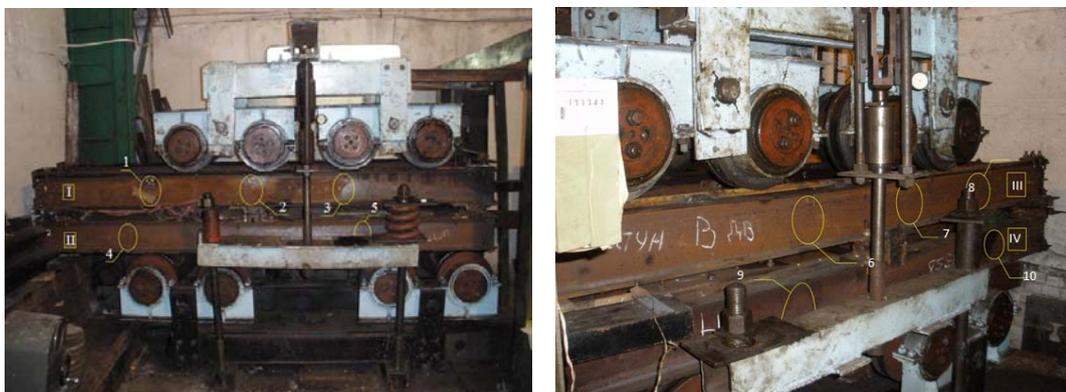


Рис. 1. Стенд, имитирующий качение по балкам двух восьмиколёсных кранов



Рис. 2. Подвижные воздействия колёс кранов на прокатные балки

Было выявлено, что под действием подвижных сил от колёс верхнего мостового крана (при крайнем левом положении блока балок) балки №1 и №3 отклонялись от проектного положения друг к другу.

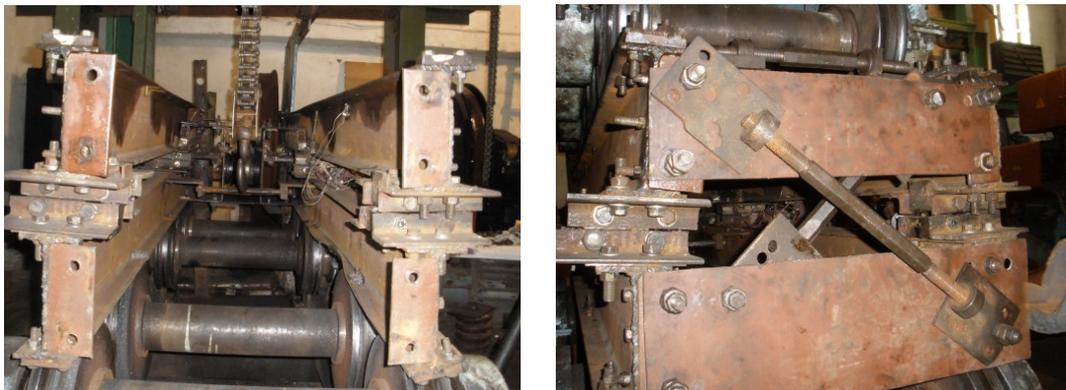


Рис. 3. Вид подкрановых балок с торца и регулировочные талрепы

Были смонтированы дополнительные крестообразные связи и регулировочные талрепы, установленные по торцам блока испытываемых балок, и угол наклона балок был стабилизирован.

Шестигранные рельсы по отношению к стенке каждой из балок фиксировались с нулевым эксцентриситетом с помощью коротышей арматуры (рис. 2). Постоянная динамика воздействий, возникающая при качении колёс кранов, приводила к разрушению сварных швов, прикрепляющих фиксаторы к верхнему поясу (в частности, при 2,5 млн циклов прокатывания колёс кранов). В связи с отделением фиксаторов возникало смещение рельсов от проектного положения, и некоторое время балки работали с эксцентриситетом. Рельсы возвращались в проектное положение, а фиксация их в проектном положении восстанавливалась (рис. 4).



Рис. 4. Износ рельсов и талреп

В конструкции стенда возникали усталостные трещины, в частности, в сварном соединении одной из фундаментных балок образовалась усталостная трещина, приведшая к разрушению узла (3 млн циклов прокатывания колёс кранов; рис. 5). Во время временной остановки стенда узел был отремонтирован, и испытания балок на выносливость были продолжены.

Очередное полное истирание рельсов на всех балках наступило при 3,01 млн циклов. В это же время была обнаружена усталостная трещина в балке №2 (зона №4). Усталостная трещина образовалась из-за большого смещение рельса относительно оси стенки балки  $e \approx 30$  мм.

Подкрановая балка №2 в зоне №2 была усилена. Усиление стенки балки было выполнено с использованием фрикционного соединения. Уголки 2L 75·5 мм были

соединены со стенкой балки и с полкой фрикционными болтами М8, затянутыми с гарантией (рис. 6).



Рис. 5. Усиление сварного узла



Рис. 6. Усталостная трещина в балке № 2

Кроме того, была выполнена замена всех 4 рельсов фиксаторов. Также была смещены верхние стягивающие балки. Эти балки были смещены в сторону маховика на 100 мм (рис. 1 и рис. 8), что позволило изменить уровень локальных напряжений в 10 испытываемых зонах.

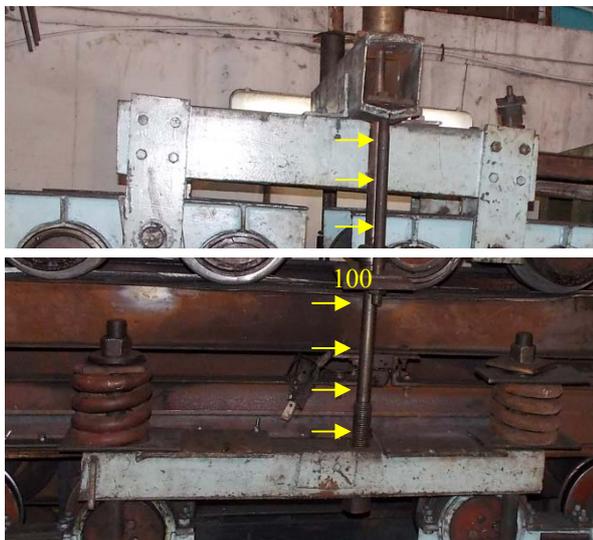


Рис. 8. Усталостная трещина в балке № 2

При плановом ремонте стенда выполнено усиление подрельсовых зон балок фрикционными устройствами и устранены все неисправности, испытания продолжены. Стенд интенсивно работал до 4,05 млн циклов; за это время была произведена замена всех рельсов.

В балке №4 в зоне №9 возникла усталостная трещина при 5,8 млн циклов (рис. 8). Усталостная трещина была усилена уголками L 75·5 мм (как в балке № 2).

Эксперимент был завершён при 6 536 325 циклах, когда в балке №1 и №3, в зонах №1, №2, №4, №5 и №6 возникли продольные усталостные трещины (рис. 9).

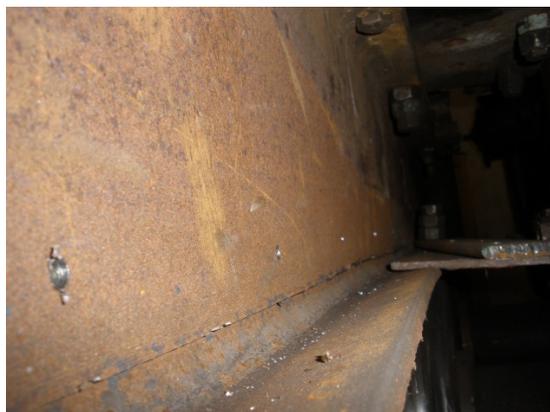


Рис. 8. Усталостная трещина в балке №4 и усиление её уголками (соединение фрикционное)



Рис. 9. Усталостная трещина в балке №1

Трещины поперёк сечения балки №4 возникли в зоне №9 и посередине балки в зоне шарнирного опирания (см. рис. 2, 9). Рельсы истерлись гребнями колёс до высоты сечения.

Результаты испытаний (графики линий регрессии при отнулевых колебаниях сдвигающих напряжений и сравнение линий регрессии с учетом тройного рассеивания) приведены на рис. 10.

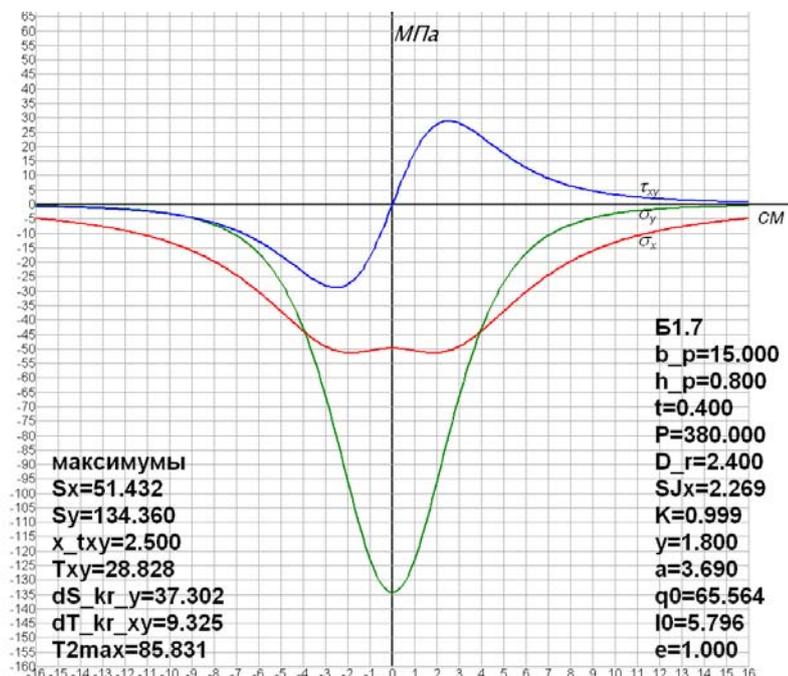


Рис. 10. Локальные напряжения в стенке балки

## Выводы:

1. Испытания прокатных двухпролётных балок на базе *шести миллионов циклов* прокатываний колёс мостовых кранов подтвердили высокую выносливость прокатных неразрезных балок по сравнению с выносливостью разрезных, сварных, однопролётных балок.
2. Требуемая выносливость при 6 миллионах циклов обеспечивается использованием неразрезных двухпролётных подкрановых балок из прокатных профилей.
3. Применение двухпролётных балок позволяет снизить материалоёмкость на 30 %.

## Список литературы

1. Нежданов, К.К. Испытание неразрезных подкрановых балок на выносливость / К.К. Нежданов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №2. – С.81–86.
2. Нежданов, К.К. Решение проблемы обеспечения достаточной выносливости и ресурса интенсивно эксплуатирующихся подкрановых балок / К.К. Нежданов, А.А. Лаштанкин, Д.Х. Курткеев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2013. – № 5. – С.41–47.
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. Ключев, С.В. Пределы идентификации природных и инженерных конструкций / С.В. Ключев, А.В. Ключев // Фундаментальные исследования. – 2007. – №12–2. – С.68–70.
5. Гарькин, И.Н. Теоретические исследования составных неразрезных подкрановых балок / И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 2 (35). – С. 100–104.
6. Туманов, В.А. Повышение выносливости стальных подкрановых балок / В.А. Туманов // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 1. – С. 75–82.
7. 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.

## References

1. Nezhdanov, K.K. Endurance test of continuous crane girders / K.K. Nezhdanov, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2016. – №2. – P.81–86.
2. Nezhdanov, K.K. The solution to the problem of ensuring sufficient endurance and resource intensively operated crane beams / K.K. Nezhdanov, A.A. Lashtankin, D.Kh. Kurtkeev // Structural mechanics and calculation of structures. – 2013. – № 5. – P.41–47.
3. Saburov, V.F. Using elastic base models to analyze the distribution of local stresses in the wall of steel composite beams / V.F. Saburov // Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture. – 2014. – № 4, vol. 14. – P. 15–20.
4. Klyuev, S.V. The limits of identification of natural and engineering structures / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev // Basic Research. – 2007. – No. 12–2. – P.68–70.
5. Garkin, I.N. Theoretical studies of composite continuous crane beams / I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 2 (35). – P. 100–104.
6. Tumanov, V.A. Increasing the endurance of steel crane beams / V.A. Tumanov // Regional architecture and engineering. – 2012. – № 1. – P. 75–82.
7. Nezhdanov, K.K. The advantages of using continuous crane structures / K.K. Nezhdanov, I.N. Garkin // Bulletin of PGUAS: construction, science and education. – 2018. – №1. – P. 9–16.

УДК 624.21.095

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

**Тарасеева Нелли Ивановна,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Геотехника и дорожное  
строительство».

**Иванов Никита Михайлович,**  
магистрант

**Прохио Сергей Александрович,**  
студент

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Taraseeva Nelli Ivanovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Geotechnics and Road  
Construction»

**Ivanov Nikita Mikhailovich,**  
Undergraduate

**Prohiro Sergey Aleksandrovich,**  
Student

## МЕТОДИКА КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ МОСТА

Н.И. Тарасеева, Н.М. Иванов, С.А. Прохио

Наиболее сложными искусственными сооружениями при проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог являются мосты и путепроводы. Опорная часть – элемент моста, передающий опорные давления балок пролетного строения на опоры и обеспечивающий угловые и линейные перемещения основной конструкции. Опорные части гасят колебания пролетных строений от подвижных нагрузок и уменьшают передачу динамических воздействий на расположенные ниже опоры транспортного сооружения. Приведены результаты анализа (на основании натурных исследований) состояния резино-металлических частей железобетонного моста, подлежащего капитальному ремонту. Описана методика расчёта и подбора параметров опорной части, а также сделаны выводы по аналитической и расчётно-конструктивной частям работы.

*Ключевые слова: конструктивные элементы транспортных сооружений, опорные части моста, дефекты и разрушения*

## PROCEDURE FOR DESIGN AND CALCULATION OF BRIDGE SUPPORT PARTS

N.I. Taraseeva, N.M. Ivanov, S.A. Prohiro

The most complex artificial structures in road design, construction and operation are bridges and overpasses. The support part is a bridge element transmitting support pressures of beams of span structure to supports and providing angular and linear movements of the main structure. The support part suppresses oscillations of span structures from movable loads and reduces transmission of dynamic actions to transport structure support located below. On the basis of in-kind studies, the article provides an analysis of the condition of rubber-metal parts of the reinforced concrete bridge to be repaired. The method of calculation and selection of parameters of the support part is described, as well as conclusions are made on the analytical and design part of the work.

*Keywords: structural elements of transport structures, supporting parts of the bridge, defects and destructions*

### Введение

Транспортные сооружения на дорогах, в частности мосты и путепроводы, в процессе эксплуатации испытывают (воспринимают) постоянные и временные статические и динамические воздействия, что сопровождается некоторыми изменениями их геометрических и эксплуатационных характеристик, например, от перепадов температуры, давления грунта, движения транспорта и т.п. Чтобы погасить часть этих колебаний, предусмотрено между балочными пролетными строениями (ПС) и опорами размещать опорные части (ОЧ).



Наибольшее распространение получили резиновые опорные части (рис. 2, б), которые состоят из перемежающихся слоев синтетического каучука (наирита или неопрена) и стальных листов, связанных между собой вулканизацией. Такие опорные части имеют ряд преимуществ: более экономичны, поскольку требуют незначительного расхода металла, технологичны – их легко устанавливать и заменять, а главное – обеспечивают необходимую подвижность пролетного строения. В частности, при горизонтальном перемещении балки резиновая опорная часть (РОЧ) дает деформации сдвига (см. рис. 2, б), не оказывая особого сопротивления, а деформации сжатия от вертикального усилия в таких опорных частях незначительны [2].

#### Анализ ситуации. Результаты обследования

Объектом исследования стал мост в Малосердобинском районе Пензенской области. Зачастую фактический срок службы малых мостов составляет 17–25 лет, реже – 35–36. И если сравнивать эксплуатационный срок деформационных швов, гидроизоляции, проезжей части, железобетонных балок, то для резиновых опорных частей нормативное значение составляет 20 лет, а по факту – не больше 15 (17). РОЧ является временной конструкцией, однако её замена в течение срока службы моста не предусмотрена [1]. В связи с этим необходимо обращать особое внимание на стадии проектирования транспортного сооружения и изготовления отдельных элементов на выбор материала (резина, арматура и т.д.), а также расчёт требуемых технических и эксплуатационных характеристик.

На стадии обследования были выявлены следующие дефекты: раздавливание, растрескивание и отслаивание резины от стальных прокладок (рис. 3–5).



Рис. 3. Раздавливание РОЧ. Место положения – крайняя балка пролетного строения



Рис. 4. Растрескивание и расслаивание РОЧ



Рис. 5. Нарушение целостности листа рубероида (гидроизола) опорной части железобетонного моста

Причины возникновения подобных дефектов связаны не только с динамическими воздействиями на искусственное сооружение, но и изменениями климатических условий эксплуатации и качеством применяемых материалов. Замораживание и оттаивание при наличии незначительных трещин в некачественной резине привело к более быстрому разрушению РОЧ.

#### Методика расчёта

Поскольку предусмотрен капитальный ремонт моста, были выполнены расчёты и запроектирована конструкция новых опорных частей [1, 4]. При этом использованы следующие исходные данные:

- ОЧ воспринимает часть нагрузки от стального пролетного строения длиной 42 м;
- расчетное сопротивление резины  $R_{сж}^{cp} = 10$  МПа ;
- расчетная сила от торможения  $T=14,3$  кН;
- коэффициент условий работы  $m_{сж} = 0,75$ .

Расчет резино-металлической опорной части включает в себя следующие проверки:

#### 1. Проверка сжимающих напряжений в резине

$$\sigma_{сж} = \frac{A}{F} \leq R_{сж}^{cp} m_{сж},$$

где  $A=755,61$  кН – опорная реакция, воспринимаемая одной опорной частью;  $F=0,3 \cdot 0,4=0,12$  м<sup>2</sup> – площадь опорной части в плане.

Тогда

$$\sigma_{сж} = \frac{755,61 \cdot 10^{-3}}{0,12} \leq 10 \cdot 0,75,$$

$\sigma_{сж} = 6,3$  МПа  $< 7,5$  МПа – условие выполняется, следовательно, размеры ОЧ в плане 0,3 м·0,4 м заданы верно.

Поскольку условия эксплуатации данного моста предусматривают изменение температур в диапазоне (в среднем) от +26°C до -28°C (Пензенская область, III дорожно-климатическая зона), это необходимо учитывать при определении полной толщины резиновой части.

## 2. Определение полной толщины резины $h_p$

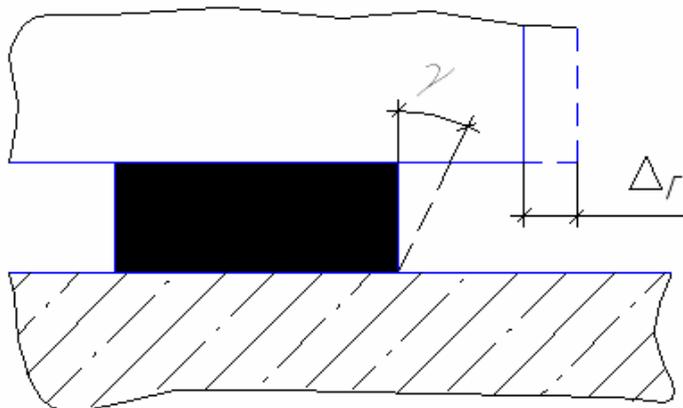


Рис. 6. Схема к определению угла сдвига резины от температурных перемещений

$$h_p = \frac{\Delta_r}{\operatorname{tg} \gamma},$$

$\Delta_r$  – половина максимального перемещения конца пролетного строения от изменения температуры;  $\operatorname{tg} \gamma = 0,2$  – допускаемая величина тангенса угла сдвига резины при температурных деформациях;

$$\Delta_r = \frac{\alpha \cdot l \cdot t^\circ}{2} = \frac{1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 42 \cdot 71}{2} = 0,018 \text{ м},$$

где  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$  – коэффициент температурного расширения стали;  $l = 42 \text{ м}$  – длина ПС;  $t^\circ = 54 \text{ }^\circ\text{C}$  – среднегодовой температурный перепад.

Тогда

$$h_p = \frac{0,018}{0,2} = 0,09 \text{ м}.$$

Высота опорной части принимается равной  $h_p = 90 \text{ мм}$ .

## 3. Определение угла сдвига $\gamma_T$ от нагрузки от торможения

$$\operatorname{tg} \gamma_T = \frac{T}{FG},$$

$G = 1 \text{ МПа}$  – модуль сдвига для резины.

Тогда

$$\operatorname{tg} \gamma_T = \frac{14 \cdot 10^{-3}}{0,12 \cdot 1} = 0,119.$$

Кроме того, должно выполняться условие

$$\operatorname{tg}(\gamma + \gamma_T) < 0,6.$$

$\operatorname{tg}(11,3 + 6,8) = 0,326 < 0,6$  – условие выполняется.

Толщину резиновых прослоек принимаем равной 10 мм, стальных прокладок – 3,4 мм. Общая высота опорной части составит  $h_p = 90,4$  мм.

Составляющим элементом опорной части являются армирующие пластинки, обеспечивающие дополнительную жесткость.

**4. Выполняем проверку вертикального обжатия  $\Delta_B$  прокладок, которое должно удовлетворять условию**

$$\Delta_B \leq 0,05h_p$$

$$\Delta_B = \frac{A\Sigma h_i}{3GF\mu} = \frac{755,61 \cdot 10^{-3} \cdot 0,07}{3 \cdot 1 \cdot 0,12 \cdot 35} = 0,0042,$$

где  $\Sigma h_i$  – суммарная толщина резиновых прослоек;  $\mu$  – коэффициент увеличения жесткости за счет влияния армирующих пластинок; он зависит от коэффициента формы сечения:

$$F = \frac{ab}{2(a+b)h_i} = \frac{0,3 \cdot 0,4}{2(0,3+0,4)0,07} = \frac{0,12}{2(0,3+0,4)0,07} = \frac{0,12}{0,098} = 1,15.$$

Отсюда  $\mu = 35$ .

Тогда  $\Delta_B = 0,0042 < 0,05 \cdot 0,0904 = 0,0045$  – условие выполняется.

**5. Проверка устойчивости ОЧ против скольжения**

$$fA \geq T,$$

$f=0,25$  – коэффициент трения.

Тогда  $fA = 0,25 \cdot 755,61 = 188,9$  кН  $> T = 14,3$  кН – условие выполняется, устойчивость против скольжения обеспечена.

Таким образом, по итогам расчета имеем следующие геометрические размеры опорной части (рис. 7):

1. Длина – 300 мм.
2. Ширина – 400 мм.
3. Общая высота – 90,4 мм.
4. Толщина резиновых прослоек –  $7 \times 10$  мм.
- Толщина стальных пластин –  $6 \times 3,4$  мм.

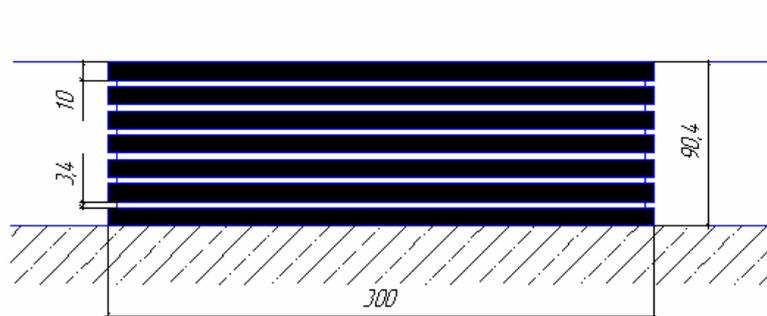


Рис. 7. Геометрические размеры запроектированной опорной части

### Выводы

Наличие неисправностей РОЧ не оказывает заметного влияния на одну из основных эксплуатационных характеристик моста – грузоподъемность. Однако целесообразно заменить эти элементы до того, как дефекты достигнут предельно допустимых значений, указанных в паспорте.

Выполненные расчеты основных параметров опорных частей моста позволяют изготовить РОЧ, которые будут воспринимать продольные деформации балок пролет-

ного строения, возникающие как от температурных воздействий, так и от торможения транспортных средств, гасить вертикальные и горизонтальные колебания, уменьшать динамические воздействия на ригель и опоры. Качественно выполненные ОЧ после завершения капитального ремонта моста позволят продлить сроки эксплуатации.

#### Список литературы

1. Тарасеева, Н.И. Влияние технического состояния резино-металлических опорных частей моста на его работу / Н.И. Тарасеева, А.В. Калашников // Современный научный вестник. – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 15–19.
2. Стрельников, С.А. Обоснование возможности применения композитной арматуры в балках пролетного строения на примере реконструкции моста через р. Питерка в Тамбовской области / С.А. Стрельников, А.М. Макаров, К.А. Андрианов // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: материалы IV международной науч.-практ. конференции. – Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-т, 2017. – С. 352–357.
3. Крайний, И.А. Применение инновационных материалов, повышающих срок службы автомобильных дорог / И.А. Крайний, В.А. Пакин, К.А. Андрианов // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 40-летию юбилею Института архитектуры, строительства и транспорта ТГТУ. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2019. – С. 332–335.
4. Пилецкий, М.Э. Расчёт деформаций материала при действии динамической нагрузки: Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / М.Э. Пилецкий, А.Ф. Зубков, К.А. Андрианов, А.М. Макаров. – RU 2017663676, 08.12.2017. Заявка № 2017660697 от 23.10.2017.

#### References

1. Taraseeva, N.I. The influence of the technical state of the rubber-metal supporting parts of the bridge on its work / N.I. Taraseeva, A.V. Kalashnikov // Modern Scientific Bulletin. – 2016. – Vol. 1, No. 1. – P. 15–19.
2. Strelnikov, S.A. Substantiation of the possibility of using composite reinforcement in span beams using the example of the reconstruction of the bridge across the river. Peterka in the Tambov region / S.A. Strelnikov, A.M. Makarov, K.A. Andrianov // Sustainable development of the region: architecture, construction, transport: materials of the IV international scientific. Conferences. – Tambov: Tambh. state. техн. un-t, 2017. – P. 352–357
3. Extreme, I.A. Application of innovative materials that increase the service life of roads: In the collection / I.A. Extreme, V.A. Pakin, K.A. Andrianov // Sustainable development of the region Architecture, construction, transport: materials of the VI International Scientific and Practical Conference dedicated to the 40th anniversary of the Institute of Architecture, Construction and Transport of TSTU. – Tambov: Pershina Publishing House R.V., 2019. – P. 332–335.
4. Piletsky, M.E. Calculation of material deformations under the action of dynamic load: Certificate of program registration for computers / M.E. Piletsky, A.F. Zubkov, K.A. Andrianov, A.M. Makarov. – RU 2017663676, 08.12.2017. Application No. 2017660697 dated 23.10.2017.

УДК 624.156

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

**Кочеткова Майя Владимировна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: M.V.Kochetkova@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

**Kochetkova Maya Vladimirovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Quality Management and  
Technology of Building Production»  
E-mail: M.V.Kochetkova@mail.ru

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ РАЗРУШАЮЩЕЙ СИЛЫ РОСТВЕРКОВ ПОД КОЛОННУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СХЕМЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ СВАЙ

М.В. Кочеткова

Как показывают экспериментальные исследования, при большом количестве опор распределение нагрузки между сваями может быть неравномерным. Различные схемы расположения свай и их количество влияют на несущую способность ростверка. Показаны закономерности изменения разрушающей силы при изменении количества свай.

*Ключевые слова: схема расположения свай, ростверки под колонну, многорядное расположение свай, напряжённо-деформированное состояние, физический эксперимент*

## REGULARITIES OF CHANGES IN THE DESTRUCTIVE FORCE OF GRILLAGE UNDER A COLUMN DEPENDING ON LAYOUT OF PILES

M.V. Kochetkova

Experimental studies show that the load distribution between piles can be uneven. Various arrangements of piles and their number influence on the bearing capacity of a raft foundation. The regularities of changing in destructive force when changing the number of piles are shown .

*Keywords: layout of piles, grillage under a column, multi-row arrangement of piles, stress-strain state, physical experiment*

Ростверки под колонну с количеством свай более четырёх имеют сложное объёмное напряжённо-деформированное состояние, которое несколько отличается от состояния ростверков, опирающихся на 2–4 сваи. Автором были исследованы ростверки с помощью программы «Лири», основанной на методе конечных элементов, и с применением физического эксперимента [1].

На основе физического эксперимента были построены графики изменения разрушающей силы при изменении числа опор. Для сопоставления использовались ростверки с количеством опор 4, 6 и 8, разрушенные по сжатой зоне бетона. График, представленный на рис. 1, отражает прочность ростверка в целом. При увеличении количества опор с четырех до шести прочность возрастает в 1,6 раза. С увеличением числа опор от шести до восьми прочность возрастает лишь на 2,5 % (в 1,025 раза), т.е. практически не изменяется.

Выявлено, что нагрузка в многорядных свайных ростверках распределяется между сваями неравномерно [2-4]. Это приводит к тому, что средняя нагрузка на сваю при увеличении числа опор с шести до восьми снижается в 1,3 раза (рис. 2). Таким образом, в шестисвайных ростверках сваи используются наиболее эффективно.

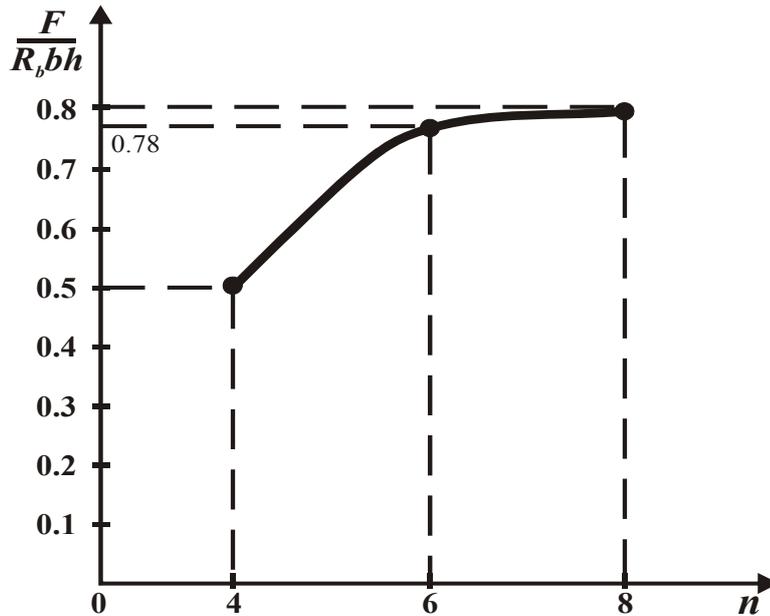


Рис. 1. Влияние числа опор на прочность ростверков

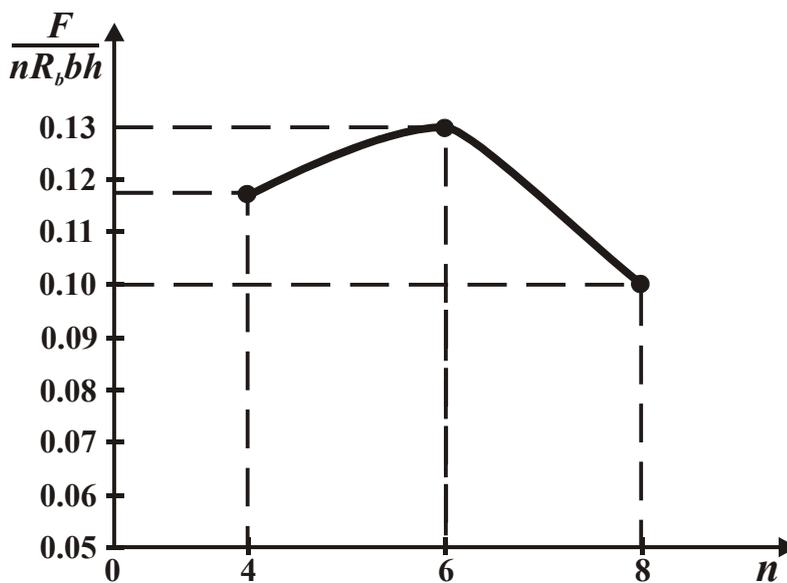


Рис. 2. График изменения средней нагрузки на сваю в зависимости от схемы расположения свай

Эксперименты с ростверками под колонну показали также, что при изменении числа опор с 2 до 3 разрушающая сила снижается в 1,5 раза; изменение количества опор с 3 до 4 привело к снижению разрушающей силы в 1,2 раза. В последнем случае меняется и схема разрушения ростверка. При одинаковом армировании продольной арматурой ростверк, опирающийся на 3 сваи, разрушился по сжатой зоне, на 4 сваи – по растянутой зоне [5].

Исследованные схемы расположения свай можно объединить в две группы. Первая группа – если в плане оси колонны не пересекаются ни с одной из горизонтальных осей свай, например, четырёх- и восьмисвайные ростверки. Вторая группа – если хоть одна горизонтальная ось колонны пересекается с горизонтальной осью сваи или ряда свай, т.е. ростверки с числом свай 2, 3, 6, 12. Исследования показали, что вторая группа схем расположения свай является наиболее эффективной. При изменении

числа свай происходит переход от одной группы схемы расположения свай к другой. При этом изменение количества опор может не повлиять на разрушающую силу ростверка.

При исключении из работы ростверка некоторых свай также меняется схема расположения, а следовательно и эффективность работы.

На основе экспериментальных исследований проведен анализ для ростверков с числом работающих свай-опор, равным 2, 4, 8. Классификация трещин и схемы разрушения описаны в работе [6]. При увеличении количества опор от двух до шести прочность ростверка возросла в 1,6 раза (рис. 3). Одинаковую прочность ростверков при количестве опор 2 и 4, а также увеличение прочности (при переходе от четырех- к шестисвайному ростверку), непропорциональное увеличению числа свай, можно объяснить следующим образом. По сути, произошло изменение схемы расположения свай.

Целесообразно построить итоговый график, отображающий изменение разрушающих усилий в зависимости от схемы расположения свай (рис. 4).

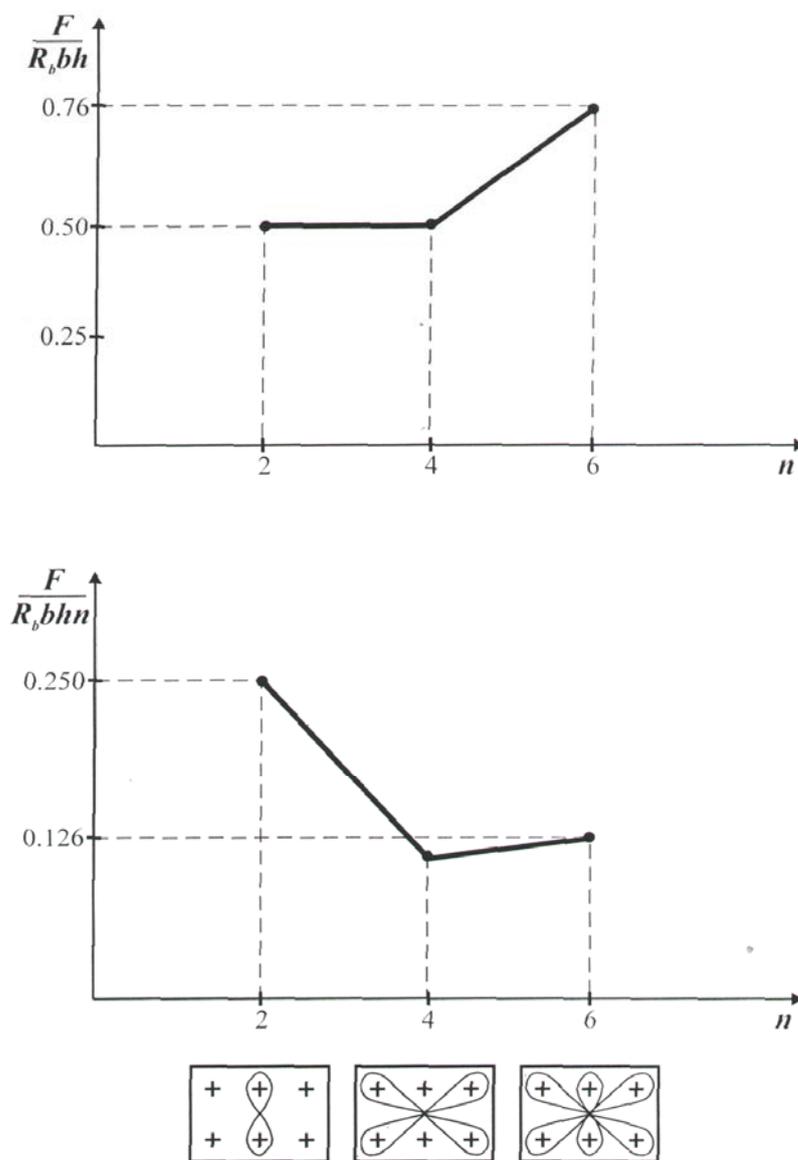


Рис. 3. Изменение разрушающих усилий при количестве работающих свай 2, 4, 6 ( $\mu_s = \max$ )

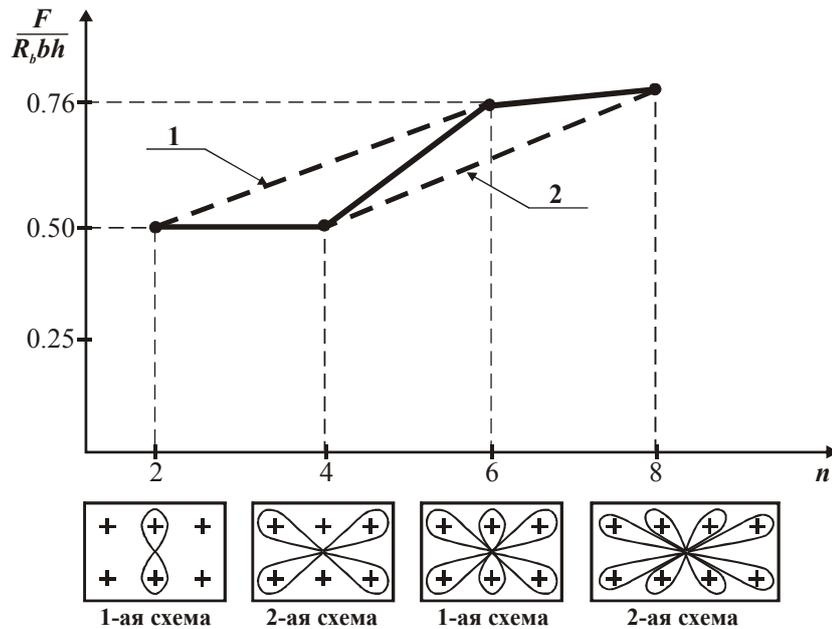


Рис. 4. Зависимость разрушающей силы от схемы расположения свай:  
1 – первая схема расположения свай; 2 – вторая схема расположения свай

**Выводы**

Разная эффективность схем расположения свай связана с расстоянием от сваи до оси колонны. Этим и объясняется, что изменение разрушающих сил в рассматриваемых ростверках не пропорционально количеству опор.

На формирование потока сжимающих напряжений, направленного от колонны к свае, в большей степени оказывает влияние пространственный угол наклона. Чем дальше свая от оси колонны, тем меньше площадь участков, в пределах которых концентрируются сжимающие напряжения, при этом меняется рабочая площадь сваи (рис. 5). Этим объясняется неравномерное распределение нагрузки между отдельными сваями, что в итоге влияет на несущую способность ростверка.

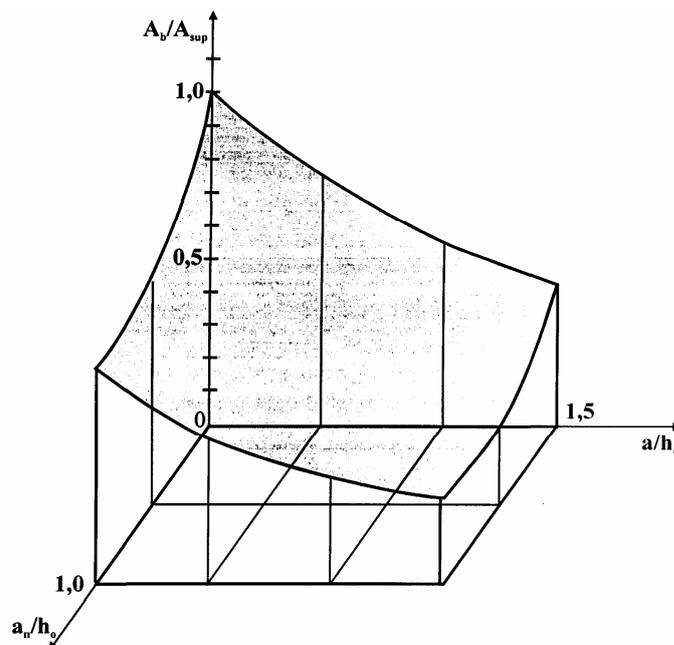


Рис. 5. Изменение рабочей площади сваи в зависимости от пролёта среза в продольном и поперечном направлениях:  
 $A_b$  – рабочая площадь;  $A_{sup}$  – площадь поперечного сечения сваи

Учитывая эти факторы при проектировании свайных фундаментов, можно получить наиболее эффективные и экономически выгодные решения.

### Список литературы

1. Экспериментальная оценка работы ростверков/ М.В. Кочеткова, Н.И. Гусев, О.В. Снежкина, К.С. Паршина// Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №1 – С. 77–81.
2. Кочеткова, М.В. Особенности распределения напряжений и деформаций в многорядных свайных ростверках под колонны / М.В. Кочеткова, О.А. Гончаренко // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2(19). – С.137–143.
3. Работа ростверков под колонны при многорядном расположении свай / М.В. Кочеткова, Н.И. Гусев, Е.С. Аленкина // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2(19). – С.144–151.
4. Кочеткова, М.В. Измерение вертикальных смещений свай для выявления напряжённо-деформированного состояния опорных участков / М.В. Кочеткова // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2017. – №2(9). – С.155–160.
5. Скачков, Ю.П. Схемы разрушения и трещинообразования ростверков свайных фундаментов под колонны / Ю.П. Скачков, В.Н. Мищенко, О.В. Снежкина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 2(27). – С. 87–92.
6. Кочеткова, М.В. Трещинообразование и схемы разрушения ростверков под колонну с многорядным расположением свай / М.В.Кочеткова // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №1(38). – С.112–118.

### References

1. Experimental evaluation of grillages work / M.V. Kochetkova, N.I. Gusev, O.V. Snezhkina, K.S. Parshina // Regional architecture and engineering. – 2014. – No1(18). – P.77–81.
2. Kochetkova, M.V. Features of stress and strain distribution in multi-row pile grillages under columns / M.V. Kochetkova, O.A. Goncharenko/ / Regional architecture and engineering. – 2014. – No. 2(19). – P. 137–143.
3. Work of grillages under columns at multi-row arrangement of piles / M.V. Kochetkova, N.I. Gusev, E.S. Alenkina // Regional architecture and engineering. – 2014. – No. 2(19). – P. 144–151.
4. Kochetkova, M.V. Measurement of vertical displacements of piles to identify the stress-strain state of support sections / M.V. Kochetkova // Education and science in the modern world. Innovation. – 2017. – No. 2(9). – P. 155–160.
5. Skachkov, Y.P. Schemes of destruction and cracking of grillage of pile foundations under columns / Y.P. Skachkov, V.N. Mishchenko, O.V. Snezhkina. // Regional architecture and engineering. – 2016. – No. 2(27). – P. 87–92.
6. Kochetkova, M.V. Crack formation and schemes of destruction of grillage under a column with a multi-row arrangement of piles / M.V. Kochetkova // Regional architecture and engineering. – 2019. – No. 1(38). – P. 112–118.

УДК 624.011.14

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

**Герасимов Владимир Петрович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
зав. кафедрой «Дизайн»  
E-mail: am\_dialog@inbox.ru

**Валиахметов Руслан Миниярович**,  
директор компьютерного центра  
архитектурного факультета  
E-mail : am\_dialog@inbox.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

**Gerasimov Vladimir Petrovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Head of the department «Design»  
E-mail: am\_dialog@inbox.ru

**Valiakhmetov Ruslan Miniyarovich**,  
Director of the Computer Center of the  
Architecture Faculty  
E-mail: am\_dialog@inbox.ru

## УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОСКОЙ ФОРМЫ ИЗГИБА ДЕРЕВЯННЫХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАПРАВЛЕНИЯ ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА И РАСПОЛОЖЕНИЯ СВЯЗЕЙ

В.П. Герасимов, Р.М. Валиахметов

Выполнен анализ возможных вариантов работы криволинейных деревянных элементов на устойчивость плоской формы изгиба с различными направлениями изгибающего момента и с разными типами расположения связей. Установлены случаи, при которых нормативный расчет деревянных криволинейных элементов на устойчивость плоской формы изгиба приводит к погрешности. Дано теоретическое обоснование. Приведены результаты испытаний крупномасштабных моделей.

*Ключевые слова: деревянные конструкции, арки, устойчивость, плоская форма деформирования, критическая нагрузка, экспериментальные исследования*

## STABILITY OF A PLANE FORM OF BENDING OF WOODEN CURVILINE ELEMENTS DEPENDING ON THE DIRECTION OF BENDING MOMENT AND LOCATION OF LINKS

V.P. Gerasimov, R.M. Valiakhmetov

The analysis of the possible options for the operation of wooden elements on the stability of a flat bending shape with different directions of a bending moment and with different forms of location of bonds have been established in which the normative calculation of wooden curvilinear elements on the stability of a flat bending shape leads to an error. The theoretical basis is given. Test results of large-scale models are presented.

*Keywords: wooden structures, arches, stability, flat form of deformation, critical load, experimental tests*

Нормативный расчет деревянных элементов прямоугольного сечения на устойчивость плоской формы изгиба основан на известном выражении для критического момента *прямолинейной* изгибаемой полосы:

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L_y} \sqrt{EJ_y GJ_d} = 0,117 \cdot \frac{b^3 E h}{L_y}. \quad (1)$$

Поправки, учитывающие кривизну элемента, введены в нормах только для случая раскрепления растянутой кромки криволинейного элемента на участке расчетной

длины  $L_y$  [1,2]. Если же растянутая кромка не раскреплена связями, то влияние кривизны элемента на его устойчивость нормами *не определено*.

Вместе с тем из теории устойчивости (А.Н. Динник) известно общее выражение критического момента для изгибаемой *криволинейной* полосы, закрепленной от смещения «из плоскости» по торцевым сечениям:

$$M_{cr} = \frac{EJ_y + GJ_d}{2r_0} \pm \sqrt{\frac{(EJ_y - GJ_d)^2}{4r_0^2} + \frac{\pi^2 EJ_y GJ_d}{r^2 \alpha^2}}. \quad (2)$$

Для элементов малой кривизны прямоугольного сечения (деревянные арки относятся к этому классу) и с учетом известного соотношения для древесины ( $EI_y \approx 5GJ_d$ ) выражение (2) принимает вид:

$$M_{cr} = 0,117 \cdot \frac{b^3 E h}{s} \left( \frac{s}{2.34r} \pm 1 \right). \quad (3)$$

Выражение (1) – для прямолинейной полосы – является частным случаем выражения (3) для криволинейной полосы.

Выражение (3) дает два значения критического усилия в зависимости от кривизны элемента (или направления действия момента). При «сгибании» криволинейный брус устойчивее, чем при «разгибании». Однако, как отмечено выше, в нормах проектирования зависимость устойчивости криволинейного элемента от направления (знака) изгибающего момента или от формы кривизны элемента (выпуклость сверху или выпуклость снизу) *не отражена*.

Таким образом, имеется основание для предположения, что нормативная методика оценки пространственной устойчивости криволинейных деревянных элементов в отдельных случаях может давать погрешность.

Для подтверждения выдвинутого предположения поставлены следующие задачи.

- определить типы элементов с различными сочетаниями знака изгибающего момента и расположения связей;
- определить для выделенных типов элементов степень ожидаемой погрешности нормативной методики;
- выполнить экспериментальную проверку.

Рассмотрим возможные сочетания расположения изгибаемых элементов в составе конструкций с точки зрения их пространственной устойчивости.

Тип элементов №1 приведен на рис. 1.

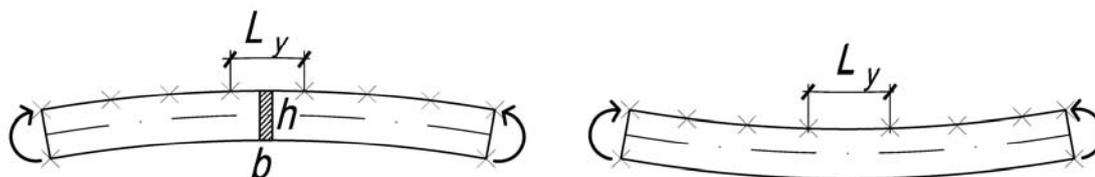


Рис. 1. Тип элементов №1: сплошное раскрепление по сжатой кромке; растянутая кромка – свободная от подкреплений

1.1 (рис.1, слева). Изгибающий момент (положительный) уменьшает кривизну, сжатая кромка (сверху) имеет дискретное, но почти сплошное раскрепление ( $L_y < 2h$ ). Данный тип характерен для большинства обычных арок на участках с положительным моментом.

1.2 (рис.1, справа). Изгибающий момент (отрицательный) увеличивает кривизну, сжатая кромка (внизу) также имеет дискретное и почти сплошное раскрепление. Такое сочетание встречается редко, в частности для так называемых «обратных арок».

В рассмотренных случаях (тип №1) применение нормативного выражения (1) является очевидным и обоснованным в силу малой кривизны стержня на участке расчетной длины.

Тип элементов №2 приведен на рис. 2.

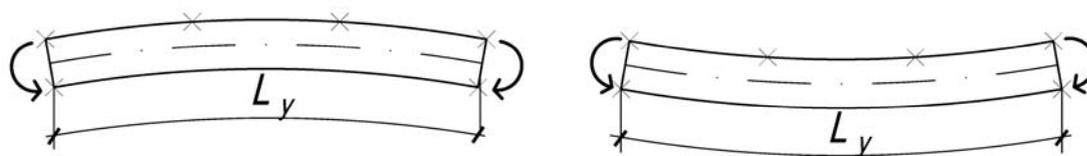


Рис. 2. Тип элементов № 2: растянутая кромка раскреплена на участке расчетной длины  $L_y$

2.1 (рис.2, слева). Изгибающий момент (отрицательный) увеличивает кривизну, растянутая кромка (сверху) имеет дискретное раскрепление на расчетном участке ( $L_y > 2h$ ). Характерно для большинства обычных арок на участках с отрицательным моментом.

2.2 (рис.2, справа). Изгибающий момент (положительный) уменьшает кривизну, растянутая кромка (снизу) имеет дискретное раскрепление на участке  $L_y$ .

Для рассмотренных случаев (тип №2) нормы проектирования используют выражение для *криволинейного* элемента, «полученное на основе теории упругих кривых стержней» (коэффициент  $k_{\text{нм}}$ ) [1,2]. Согласно нормам проектирования, типы 2.1 и 2.2 равнозначны. Однако если учесть классические выражения (2) и (3), то логично предположить, что элемент 2.1 должен быть более устойчивым по сравнению с элементом 2.2.

Тип элементов №3 приведен на рис. 3.

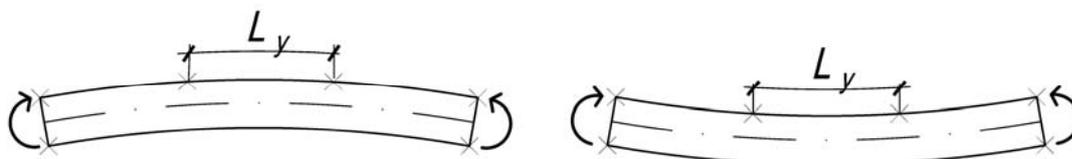


Рис. 3. Тип элементов №3: дискретное раскрепление сжатой кромки; растянутая кромка – свободная

3.1 (рис.3, слева). Изгибающий момент (положительный) уменьшает кривизну, сжатая кромка (сверху) имеет дискретное раскрепление ( $L_y > 2h$ ). Характерно для обычных арок на участках с положительным моментом. Нормативный расчет для этого случая дает погрешность *не в запас* устойчивости. Например, для арки с геометрическими параметрами по [2, с. 135] ( $b \times h = 11 \times 59,4$  см,  $r = 36,4$  м,  $L_y = 6$  м) критический момент при учете кривизны по выражению (3) на 7 % меньше нормативного значения. Увеличение кривизны арки, например до  $r = 20$  м, доводит эту разницу до 11 %.

3.2 (рис.3, справа). Изгибающий момент (отрицательный) увеличивает кривизну, сжатая кромка (снизу) имеет дискретное раскрепление ( $L_y > 2h$ ). Нормативный расчет для этого случая дает погрешность в запас устойчивости.

Согласно нормам, случаи 3.1 и 3.2 равнозначны. Если же принять во внимание выражения (2) и (3), то элемент 3.1 менее устойчив по сравнению с элементом 3.2.

Тип 4 приведен на рис. 4. Это «классический» случай, соответствующий условиям получения выражений (2) и (3).

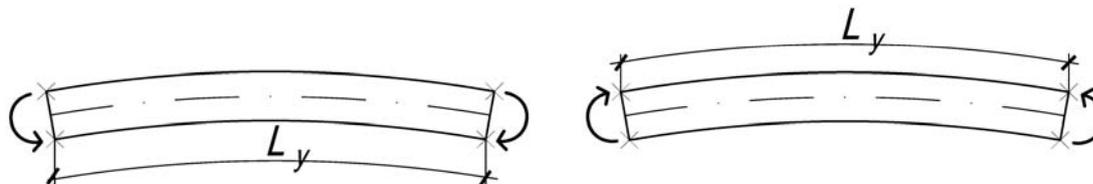


Рис. 4. Тип элементов № 4: раскрепление по торцевым сечениям. Кромки свободны от раскреплений

4.1 (рис.4, слева). Изгибающий момент (отрицательный) увеличивает кривизну, обе кромки не имеют раскреплений, поперечные связи расположены по торцевым сечениям. Данное сочетание характерно, например, для карнизных узлов гнукотклеенных рам. Нормативный расчет (как для прямолинейных элементов) дает погрешность в запас устойчивости. При необходимости учета кривизны в этом случае следует опираться на более полное выражение (2), а не на выражение (3), так как карнизные элементы рам относятся к элементам большой кривизны.

4.2 (рис.4, справа). Изгибающий момент (положительный) уменьшает кривизну, обе кромки не имеют раскреплений (см. рис. 1), поперечные связи расположены по торцевым сечениям. Такое сочетание возможно, например, в криволинейных балках. Нормативный расчет (как для прямолинейных элементов) дает погрешность *не в запас* устойчивости.

Таким образом, установлено, что при оценке устойчивости плоской формы деформирования деревянных криволинейных элементов следует принимать во внимание сочетание направления момента и расположения подкреплений. Предполагаемая погрешность по отношению к нормативному расчету в реальных проектных случаях может достигать 10-15 % как «в запас» устойчивости, так и «не в запас» устойчивости.

Для подтверждения теоретических результатов выполнены испытания деревянных криволинейных элементов на крупномасштабных моделях.

Были испытаны на изгиб два криволинейных элемента с одинаковыми геометрическими параметрами по схеме криволинейной балки с образованием зоны чистого изгиба и с устройством одной подвижной опоры. Экспериментальные образцы геометрически подобны реальным конструкциям с коэффициентом масштаба более 5 и имели размеры :  $b \times h = 20 \times 99$  мм,  $L_y = s = 1268$  мм, стрела подъема  $f = 788$  мм. Элемент 1 имел «выпуклость вверх». Элемент 2 – «выпуклость вниз» («обратная» арка, рис.5).



Рис. 5. Виды испытаний (слева) и виды элементов после потери устойчивости (справа)

Предварительно рассчитанные нагрузки, соответствующие критическим усилиям (по формуле (3)), следующие:

При уменьшении кривизны элемента («обратная арка») :  $P_{кр1} = 67$  кг.

При увеличении кривизны элемента («обычная арка») :  $P_{кр2} = 43$  кг.

Для сравнения, для прямолинейного элемента (по нормам, по формуле (1)) :  $P_{кр3} = 56,0$  кг (погрешность  $\pm 20\%$ ).

На графике (рис. 6) показана динамика изменения величины критического момента в зависимости от кривизны элемента и от направления изгибающего момента для экспериментальной модели (по формуле (3)).

Из графика видно:

- с увеличением кривизны элемента устойчивость «сгибаемых» элементов повышается, а устойчивость «разгибаемых» элементов снижается;
- с увеличением кривизны элемента погрешность нормативной методики по отношению к расчетам по классической теории (формулы (2) и (3)) увеличивается.

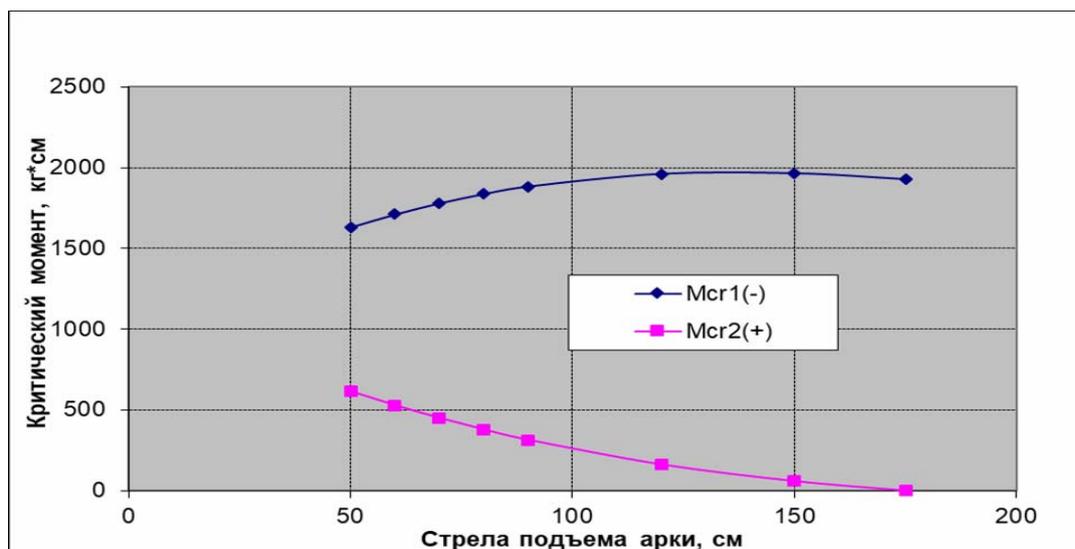


Рис. 6. Зависимость критического момента от кривизны элемента (стрелы подъема) при разных направлениях изгибающего момента для криволинейного элемента с параметрами экспериментальной модели

Результаты испытаний.

Элемент 1 имел ясно выраженный момент потери устойчивости (точка бифуркации) при  $P = 60$  кг. При  $P = 70$  кг испытания были прекращены из-за неограниченного роста перемещений из плоскости изгиба. Элемент 2 («обратная арка») с начала приложения нагрузки и до прекращения испытания имел равномерный прирост всех деформаций, включая перемещения верхней (сжатой) кромки из плоскости элемента. При этом нижняя (растянутая) кромка практически не имела отклонений из плоскости. Испытания были прекращены при нагрузке  $P = 120$  кг.

Элемент 2 («обратная арка») по сравнению с элементом 1 показал в 1,5 раза большую несущую способность и меньшую деформативность.

Таким образом, результаты испытания качественно и количественно подтвердили предположение о необходимости учета в расчетах на устойчивость криволинейных деревянных элементов знака изгибающего момента в сочетании со схемой раскрепления связями.

#### Выводы.

1. Влияние направления изгибающего момента на устойчивость плоской формы деформирования криволинейных деревянных элементов учтено в нормах проектирования не в полной мере, что может приводить к противоречивым результатам.

2. Определены формы деревянных криволинейных элементов и их комбинации с элементами раскрепления, для которых использование нормативной методики расчета на общую устойчивость приводит к погрешности порядка 10-15 % как «в запас», так и «не в запас» устойчивости.

Список литературы

1. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. – М., 2011.
2. Пособие по проектированию деревянных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. – 215 с.

References

1. SP 64.13330.2011. Wooden structures. Updated version of SNiP II-25-80. – M., 2011.
2. Manual for the design of wooden structures. – M.: Stroizdat, 1986. – 215 p.

УДК 624

Северо-Восточный государственный  
университет (СВГУ)

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

**Очиров Нимя Григорьевич,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Автомобильный транспорт»  
E-mail: Nimya80@mail.ru;

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

**Болотин Александр Викторович,**  
кандидат химических наук, доцент кафедры  
«Промышленное и гражданское  
строительство»  
E-mail: alexandr\_bolotin@mail.ru

*Northeast State University*

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

**Ochirov Nimya Grigorievich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Automobile Transport»  
E-mail: Nimya80@mail.ru

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

**Bolotin Alexander Viktorovich,**  
Candidate of Chemical Sciences, Associate  
Professor of the department «Industrial and  
Civil Engineering»  
E-mail: alexandr\_bolotin@mail.ru

## ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЗДАНИЙ

Н.Г. Очиров, А.А. Лунегова, А.В. Болотин

Рассматриваются факторы, влияющие на надежность зданий и сооружений на этапе их эксплуатации. Случайный характер воздействия факторов наиболее эффективно описывают вероятностные модели.

*Ключевые слова: безотказность, дефекты, факторы, нагрузка, распределение, интегральная функция, статистические характеристики, техническое состояние*

## PROBABILISTIC MODEL OF OPERATIONAL RELIABILITY OF BUILDINGS

N.G. Ochirov, A.A. Lunegova, A.V. Bolotin

The article presents the factors that affect the reliability of buildings and structures at the stage of their operation. The random nature of the impact of factors is most effectively described by probabilistic models.

*Keywords: reliability, defects, factors, load, distribution, integral function, statistical characteristics, technical condition*

**Введение.** Магаданская область относится к числу регионов, где практически нет ввода в эксплуатацию нового жилья. Архитектурный облик города формировался с середины 40-х и до середины 90-х гг. прошлого века и застыл в своем развитии (табл.1) [1].

Т а б л и ц а 1

Распределение жилищного фонда г. Магадана по времени постройки

Год постройки	1921- 1945	1946- 1970	1971- 1995	После 1995
Число жилых домов (многоквартирных, индивидуально-определенных зданий), единиц	92	2197	1680	91

Только относительно недавно наметился прогресс в этом направлении. Правительство Магаданской области анонсировало сдачу в конце 2020 г. жилого комплекса «Нагаевский», который строится с учетом природно-климатических условий региона.

Цель исследования: изучение влияния факторов на эксплуатационную надежность зданий и сооружений г. Магадана на основе вероятностных моделей.

Задачи исследования:

1. Выявить факторы, влияющие на эксплуатационную надежность зданий и сооружений.

2. Исследовать выявленные факторы на основе вероятностной модели.

#### Методы

Факторы, оказывающие существенное влияние, можно подразделить на три большие группы: эндогенного, экзогенного и техногенного характера. К составляющим группы внутреннего влияния можно отнести [3]:

- физические и химические изменения материала конструкций;
- эксплуатационные нагрузки;
- степень качества изготовленной конструкции.

Внешнее воздействие в себя включает:

- климатические условия (влажность, перепад температур, инсоляция, циклы оттаивания и замораживания и т.д.);
- агрессивные факторы окружающей среды (ветер, снег, пыль и т.д.);
- качество эксплуатации.

Ввиду того что мы рассматриваем эксплуатационную надежность, нам нужно исходить из того, что здания уже эксплуатируются, соответственно мы будем абстрагироваться от эндогенных и техногенных факторов; насколько это оправданно, покажет эксперимент.

Для города Магадана актуальны следующие причины: ветер, снег, температура.

Ветровая нагрузка на сооружение рассматривается как совокупность нормального давления  $W_e$ , приложенного к внешней поверхности сооружения или элемента; сил трения  $W_f$ , направленных по касательной к внешней поверхности; нормального давления  $W_i$ , приложенного к внутренним поверхностям зданий с проницаемыми ограждениями, с открывающимися или постоянно открытыми проемами. Ветровая нагрузка на здания и сооружения определяется как сумма статической и пульсационной составляющих.

Статическая (средняя) составляющая, соответствующая установившемуся скоростному напору ветра, должна учитываться во всех случаях.

Динамическая (пульсационная) составляющая, вызываемая пульсациями скоростного напора, учитывается для высотных сооружений (мачты, башни, дымовые трубы, опоры линий электропередач, многоэтажные здания высотой более 40 м, поперечные рамы одноэтажных промышленных зданий высотой более 36 м) и при отношении высоты к пролету более 1,5.

При определении средней составляющей ветровой нагрузки на сооружение основной характеристикой ветрового режима местности является скоростное давление ветра. Его значение устанавливается на основе статистического анализа данных метеорологических станций по скоростям ветра в данном районе.

За скоростью ветра ведутся систематические наблюдения на метеорологических станциях. Скорость и направление ветра измеряют четыре раза в сутки. В нормах при определении скоростного давления принята скорость ветра на уровне 10 м над поверхностью земли, превышаемая для местности типа А в среднем один раз в 5 лет и соответствующая 10-минутному интервалу осреднения.

Скоростной напор, представляющий собой давление ветра на единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению ветра, может быть определен по формуле

$$W = \frac{V_0^2}{1,6}, \quad (1)$$

где  $V_0$  – скорость ветра, м/с, на высоте 10 м от поверхности земли.

На основе многочисленных наблюдений на метеостанциях рекомендуется для скоростей ветра использовать распределение Вейбулла. Интегральная функция распределения скоростей ветра имеет вид

$$F(v) = 1 - \exp\left(-\frac{1}{\alpha} v^\beta\right), \quad (2)$$

где  $v$  – вероятность того, что в наперед заданный момент времени скорость ветра не превысит значения;  $v, \alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, определяемые по каждой метеостанции отдельно и зависящие от ветрового режима данной местности.

Плотность распределения Вейбулла имеет вид:

$$f(v) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot v^{\beta-1} \exp\left(-\frac{1}{\alpha} \cdot v^\beta\right). \quad (3)$$

Статистические характеристики ветровой нагрузки для I–VII ветровых районов приведены в табл. 2 [2].

Т а б л и ц а 2

Статистические характеристики ветровых нагрузок

Наименование характеристики	Ветровой район						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Среднее $\bar{W}$ , Па	200	270	350	480	600	700	850
Нормативное $W_0$ , Па	270	350	450	550	700	850	1000
Коэффициент вариации	0,44	0,37	0,32	0,31	0,28	0,27	0,24

Магаданская область относится к 5 ветровому району.

Изменения температуры воздуха во времени представляют собой случайный процесс, в котором четко выделяются два периода колебаний: с годовыми и суточными периодами, Амплитуды колебаний температур имеют случайный характер.

Для решения конкретных задач и для нормирования климатических воздействий должна быть представлена информация о межгодовой изменчивости воздуха за различные интервалы осреднения, среднесуточных, средних за 3, 5, 10 суток, среднемесячных и т.д.

Разрушения ограждающих конструкций, связанные с влиянием влаги и знакопеременных температур, мы непосредственно можем наблюдать в Магадане буквально на каждом доме (см. рисунок) [4].



Дом по ул. Портовая, г. Магадан

Существуют различные вероятностные модели снеговых нагрузок.

Вся территория РФ разделена на 8 снеговых районов, для которых вес снегового покрова на  $1 \text{ м}^2$  поверхности земли принимают  $S_0 = 0,8 \dots 5,6 \text{ кПа}$  ( $\text{кН/м}^2$ ) (табл. 3) [2].

Нормативное значение снеговой нагрузки на покрытие составляет:

$$S_n = S_0 \cdot C, \quad (4)$$

где  $S_0$  – вес снегового покрова на  $1 \text{ м}^2$  горизонтальной поверхности земли в зависимости от климатического района;  $C$  – коэффициент перехода от веса снегового покрова на горизонтальной поверхности земли к снеговой нагрузке на покрытие с учетом его неравномерного распределения в зависимости от очертания кровли.

Т а б л и ц а 3

Снеговые районы

Снеговые районы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
$S, \text{кПа}$	0,8	1,2	1,8	2,4	3,2	4,0	4,8	5,6

Магаданская область относится к 5 снеговому району.

В частности, при треугольном очертании кровли с углом наклона  $\alpha \leq 25^\circ$  коэффициент  $C = 1$ , при  $\alpha > 60^\circ$  коэффициент  $C = 0$ . Снеговая нагрузка рассматривается как нестационарный случайный процесс. При решении задач надежности можно рассматривать различные вероятностные модели снеговых нагрузок. Представление снеговой нагрузки в виде случайного временного процесса целесообразно при расчете конструкций с учетом деформаций ползучести, при оценке длительной прочности, при решении задач о накоплении повреждений. В других расчетных ситуациях полезным оказывается представление снеговой нагрузки посредством распределений максимальных параметров снежного покрова. Как показывают экспериментальные данные, нормальное распределение может применяться в малоснежных районах, причем в каждом конкретном случае необходим анализ гистограмм снеговой нагрузки.

Наилучшим образом распределение максимальных годовых снеговых нагрузок описывается двойным экспоненциальным распределением. Функция распределения этого закона имеет вид

$$F(s) = \exp\left(-\exp\frac{\alpha - S}{\beta}\right), \quad (5)$$

Параметры распределения  $\alpha$  и  $\beta$  связаны с математическим ожиданием и дисперсией следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{S} &= \alpha + 0,5776 \cdot \beta, \\ \bar{S}^2 &= 1,645 \cdot \beta^2. \end{aligned}$$

Нельзя не рассмотреть такой важный дефект, в той или иной степени присутствующий на любом здании и оказывающий на эксплуатационную надежность негативное влияние, как трещина.

Трещины в железобетонных элементах образуются после того, как напряжения (деформации) в бетоне от нагрузок и воздействий окружающей среды превысят его прочность при растяжении. Причинами появления значительных напряжений являются перегрузки, осадки фундамента, усадка бетона, изменение температуры как внутри строительных элементов, так и снаружи, расклинивающие действия продуктов коррозии арматуры [5].

Условие, при котором трещины в сечениях, нормальных к продольной оси элемента, не образуются, записывается так:

$$M \leq M_{\text{вс}}, \quad (6)$$

где  $M$  – изгибающий момент от внешних сил и воздействий;  $M_{\text{вс}}$  — момент внутренних сил в сечении перед образованием трещины.

Вероятностную модель прогноза возникновения трещин мы не приводим ввиду ее сложности.

**Результаты.** Таким образом, исходными данными для вероятностных моделей служит статистическая информация. Для адекватной оценки влияния всех вышеперечисленных факторов необходимы достоверные данные. В связи с этим нужно взаимодействие с такими организациями, как федеральное государственное бюджетное учреждение «Колымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», с министерством строительства, жилищно-коммунального хозяйства и энергетики Магаданской области.

**Дискуссия.** Причин, влияющих на эксплуатационную надежность, гораздо больше. Мы рассмотрели факторы, лежащие на поверхности: явления, вызванные свойствами грунтов, естественное повышение уровня грунтовых вод, ошибки изысканий, проектирования, строительства, это неполный список факторов.

Дать оценку техническому состоянию объекта может только комиссия после обследования.

Обследование технического состояния зданий и сооружений должно проводиться в три этапа:

- 1) подготовка к проведению обследования;
- 2) предварительное (визуальное) обследование;
- 3) детальное (инструментальное) обследование.

Как правило, на практике обходятся только двумя этапами, минуя третий. Такой важный для Магаданской области фактор, как сейсмичность, мы не рассматривали, так как он подробно описан в работах [1, 6, 7].

**Заключение.** Задача повышения эксплуатационной надежности является комплексной. Требуется привлечения специалистов, обладающих знаниями в самых разных областях строительной науки. Общей целью изучения влияния различных факторов на эксплуатационную надежность зданий и сооружений является разработка эффективных мероприятий по обеспечению их эксплуатационных качеств.

#### Список литературы

1. Шаповалова, Т.А. Проблемы сейсmobезопасности зданий существующей застройки г. Магадана / Т.А. Шаповалова, Л.И. Карпенко // Вестник Северо-Восточного государственного университета. – 2012. – № 18. – С. 62–64.
2. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. – Введ. впервые 2017-06-04. – М.: АО «НИЦ «Строительство», ЦНИИСК им.В.А.Кучеренко, 2017. – 73 с.
3. Кирильчик, Л.Ф. Общий анализ эксплуатационной надежности зданий и сооружений / Л.Ф. Кирильчик, Г.А. Науменко // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4. – С. 62–64.
4. Weck, T.U. Enclosure walls in the Nordic countries / T.U. Weck // Enclosure masonry wall systems worldwide / CIB W023 – Wall structures. – Berlin, 2012. – P. 147–155.
5. Galvez, R.J.C. Experimental scale model study of cracking in brick masonry under tensile and shear stress / J.C. Galvez Ruiz, M.J. C. Calzada, E. Reyes Pozo // Materiales de Construcción. – 2008. – Vol 58, Iss 291. – P. 69–83.
6. Фролова, А.А. Эксплуатационная надежность зданий и сооружений при сейсмических воздействиях в г. Магадане / А.А. Фролова, В.В. Колпакова, Н.К. Гайдай, В.В. Длинных // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. – Комсомольск-на-Амуре, 2019. – С. 145–148.
7. Гайдай, Н.К. Оценка текущей сейсмостойкости и сейсмической уязвимости строительных сооружений Магаданской области (постановка задачи) / Н.К. Гайдай, В.В. Длинных, Н.Е. Ломакина, С.В. Курткин // Вестник Северо-Восточного государственного университета. – 2017. – № 27. – С. 114–116.

## References

1. Shapovalova, T.A. Problems of seismic safety of existing buildings in Magadan / T.A. Shapovalova, L.I. Karpenko // *Bulletin of North-Eastern state University*. – 2012. – No. 18. – P. 62–64.
2. SP 20.13330.2016 Loads and impacts. – Enter. for the first time 2017-06-04. – M.: JSC « SIC «Construction», TSNIISK named after V. A. Kucherenko, 2017. – 73 p.
3. Kirilchik, L.F. General analysis of operational reliability of buildings and structures / L.F. Kirilchik, G.A. Naumenko // *Engineering Bulletin of the river Don*. – 2013. – No. 4. – P. 62–64.
4. Weck, T.U. Enclosure walls in the Nordic countries / T.U. Weck // *Enclosure masonry wall systems worldwide / CIB W023 – Wall structures*. – Berlin, 2012. – P. 147–155.
5. Galvez, R.J.C. Experimental scale model study of cracking in brick masonry under tensile and shear stress / J.C. Galvez Ruiz, M.J. C. Calzada, E. Reyes Pozo // *Materiales de Construccion*. – 2008. – Vol 58, Iss 291. – P. 69–83.
6. Frolova, A.A. Operational reliability of buildings and structures under seismic effects in Magadan / A.A. Frolova, V.V. Kolpakova, N.K. Gaidai, V.V. Long // *Youth and science: actual problems of fundamental and applied research*. – Komsomolsk-on-Amur, 2019. – P. 145–148.
7. Gaidai, N.K. Assessment of current seismic stability and seismic vulnerability of construction structures of the Magadan region (problem statement) / N.K. Gaidai, V.V. Long, N.E. Lomakina, S.V. Kurtkin // *Bulletin of North-Eastern State University*. – 2017. – No. 27. – P. 114–116.

# ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

## ENGINEERING SYSTEMS

УДК 621.6:62-621

*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  
газодинамика»  
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

*Saratov State Technical University  
named after Yuri Gagarin*

Russia, 410054, Saratov, 77,  
Polytechnicheskaya St.  
tel.: (8452) 99-88-11; факс: (8452) 99-88-10

**Osipova Natalya Nikolaevna,**  
Doctor of Sciences, Associate Professor,  
Head of the 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 Yuri 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

## ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ НА ОСНОВЕ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Н.Н. Осипова, Б.М. Гришин, Ю.В. Родионов, О.В. Тараканов

Приводятся результаты исследований по определению оптимального количества зданий, подключаемых к групповой резервуарной установке с искусственной регазификацией сжиженного углеводородного газа при снабжении потребителей газозвоздушными смесями. Решение поставленной задачи проводилось при условии максимальной адаптации систем газоснабжения к перспективной газификации на природном сетевом газе с учетом климатических особенностей местности, различной структуры застройки населённых пунктов, видов газоиспользующего оборудования, классов энергетической эффективности зданий и плотности населения на газифицируемой территории. Рекомендованы численные значения количества зданий, отвечающих минимальной стоимости систем снабжения потребителей газозвоздушными смесями.

*Ключевые слова: система газоснабжения, газозвоздушная смесь, искусственная регазификация, стоимость системы газоснабжения, оптимальное количество газифицируемых зданий*

## OPTIMIZATION OF GAS SUPPLY SYSTEMS BASED ON AIR-GAS MIXTURES OF INHABITED LOCALITIES

N.N. Osipova, B.M. Grishin, Yu.V. Rodionov, O.V. Tarakanov

The results of research on determining buildings optimal number connected to a group tank installation with artificial regasification of liquefied hydrocarbon gas when supplying consumers with gas-air mixtures are presented. The solution to this problem was carried out under the condition of maximum adaptation of gas supply systems to the prospective gasification on natural gas network, taking into account the climatic conditions of the area, different structure of settlements development, types of gas-using equipment, energy efficiency classes of buildings and population density in the gasified area. The numerical values of the number of buildings that meet the minimum cost of supply systems for gas-air mixtures are recommended.

*Keywords: gas supply system, gas-air mixture, artificial regasification, cost of gas supply system, optimal number of gasified buildings*

### ВВЕДЕНИЕ

Для газификации потребителей, удаленных от магистралей природного сетевого газа, широко используются различные альтернативные топлива, в том числе и сжиженный углеводородный газ (СУГ). Развитие газификации на базе природного газа в перспективе приводит к низкой ликвидационной стоимости существующих сетей сжиженного углеводородного газа газифицированных населенных пунктов, так как требуется полная замена части оборудования, перекладка подземных газопроводов и трудоемкая перенастройка газового оборудования.

В этом случае эффективной альтернативой является газоснабжение газозвоздушными смесями, формируемыми на основе сжиженного углеводородного газа. Применение газозвоздушных смесей имеет ряд неоспоримых преимуществ:

- максимальная адаптация газоиспользующего оборудования к последующему подключению к газовым сетям на природном газе;
- снижение точки росы в смеси при прокладке газопроводов на глубине, соответствующей газопроводам на природном газе, без образования гидратов и ледяных пробок;
- меньшая теплота сгорания и абсолютного давления смеси, снижающие потери газа от утечек;
- узкий диапазон пределов взрываемости газозвоздушных смесей;
- отсутствие необходимости применения «летней» и «зимней» смеси сжиженного углеводородного газа для обеспечения круглогодичной работы системы газоснабжения.

Исследованиями в области снабжения газозвоздушными смесями занимались ученые Н.И. Никитин, Б.Н. Курицын, А.П. Клименко, а также научно-исследовательский институт по распределению и использованию газа ОАО «Гипрониогаз», ассоциация World LPG Association (WLPGA), компании Algas-SDI QM, Argone National Laboratory, Flüssiggas-Anlagen Salzgitter (FAS).

В результате проведенных исследований рекомендованы соотношения газа и воздуха в составе газозвоздушной смеси: 56–63 % пропана и 46–37 % воздуха. Однако количественные соотношения справедливы для газа однокомпонентного состава – пропана, что в практике эксплуатации достичь невозможно, так как даже в марке газа «пропан технический» пропана содержится около 75 %, остальной объем составляют бутан и другие углеводороды. Дополнительные исследования, проведенные авторами публикации, показали, что для сжиженного углеводородного газа бинарного состава с наличием пропана и бутана наиболее приемлемым является соотношение 42 % пропан-бутана и 58 % воздуха [1, 2]. Указанное соотношение обеспечивает максимальную скорость распространения газозвоздушной смеси в газоиспользующем оборудовании, соответствующую рекомендуемому пределу для взаимозаменяемых горючих газов при замене на природный газ, а также смещает температуру точки росы смеси более чем на 10 °С во всем диапазоне давлений, формируемых в подземных трубопроводах газа.

Регазификация сжиженного углеводородного газа перед формированием газовой смеси производится двумя основными способами: естественным, за счет теплоты грунтового массива, и искусственным, с помощью испарителей [3, 4].

Следует отметить, что применительно к Российской Федерации с ее суровыми климатическими условиями использование резервуарных установок с естественной регазификацией имеет целый ряд существенных недостатков, главным из которых является низкая паропроизводительность в холодный период времени года и, как следствие, большая металлоемкость на единицу испаряемого газа [5].

Применение испарителей сжиженного газа в значительной степени устраняет отмеченный недостаток и обеспечивает стабильное испарение сжиженного газа для формирования газовой смеси рекомендуемого состава.

В то же время системы газоснабжения с подземными резервуарами, испарителями, блоками подготовки газовой смеси, системой подземных коммуникаций отличаются высокой стоимостью сооружения и эксплуатации.

В связи с этим оптимизация структуры газоснабжения населенных пунктов с использованием газовой смеси, заключающаяся в определении оптимального количества зданий, подключаемых к групповой резервуарной установке, является важным резервом экономии материальных и денежных средств при организации снабжения потребителей.

### МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве критерия оптимальности использовался минимум удельной (на одно здание) стоимости системы газоснабжения для потребителя. При этом целевая функция задачи в общей постановке представляет собой функционал вида

$$C(n) = f[C_{gti}(n); C_{gp}(n)] = \min, \quad (1)$$

где  $C(n)$  – стоимость системы газоснабжения, руб./год·зд;  $C_{gti}(n)$  – стоимость групповых резервуарных установок, оборудованных испарителями СУГ и блоками подготовки газовой смеси, руб./год·зд;  $C_{gp}(n)$  – стоимость газовых сетей, руб./год·зд;  $n$  – количество газоснабжаемых зданий, шт.

Стоимость систем газоснабжения при искусственной регазификации газа и оснащении резервуарных установок испарителями  $C_{gti}(n)$  зависит от количества газоснабжаемых зданий. При применении в системах огневых испарителей стоимость групповых резервуарных установок обуславливается стоимостью резервуарных установок  $C_{ii}(n)$  с блоками редуцирования газа  $C_{pr}(n)$ , стоимостью испарителей  $C_{fr}(n)$  и стоимостью системы подготовки газовой смеси  $C_{gam}(n)$ :

$$\frac{C_{gti}(n)}{n} = \frac{1}{n} [(C_{ii} + C_{pr})(n) + C_{fr}(n) + C_{gam}(n)], \quad (2)$$

При применении в системах электрических испарителей дополнительно необходимо учитывать годовую стоимость электроэнергии  $C_e(n)$ , затрачиваемую на регазификацию сжиженного газа:

$$\frac{C_{gti}(n)}{n} = \frac{1}{n} [(C_{ii} + C_{pr})(n) + C_{er}(n) + C_{gam}(n) + C_e(n)], \quad (3)$$

где  $C_{er}(n)$  – стоимость огневого испарителя СУГ, руб./год·зд.

В свою очередь, зависимости для определения стоимостных параметров, входящих в формулы (2), (3), имеют вид

– для резервуарных установок:

$$C_{ii}(n) = f[m; V_i(G(n))]; \quad (4)$$

– для систем подготовки газовой смеси

$$C_{gam}(n) = f[G(n); V_{tk}(G(n))]; \quad (5)$$

– для работы электрического испарителя:

$$C_e(n) = f[G(n)], \quad (6)$$

где  $m$  – количество резервуаров в групповой установке системы газоснабжения, шт;  $V_t$  – объем одиночного резервуара, м<sup>3</sup>;  $G(n)$  – количество потребляемой газовой-воздушной смеси в системе газоснабжения, кг/год;  $V_{tk}$  – объем резервуара хранения газовой-воздушной смеси для снятия пиковых нагрузок, м<sup>3</sup>.

В общем виде потребление газовой-воздушной смеси газоиспользующим оборудованием потребителя определяется по выражению

$$G(n) = G^{fp} + G^h, \quad (7)$$

где  $G^{fp}$  – потребление газовой-воздушной смеси для приготовления пищи, кг/год;  $G^h$  – потребление газовой-воздушной смеси на отопление и горячее водоснабжение, кг/год.

Величина потребления газовой-воздушной смеси газовой плитой  $G^{fp}$  определяется типом газогорелочного устройства, установленного в газовом приборе, и является постоянной в течение всего года.

Потребление газовой-воздушной смеси на нужды отопления в наиболее общей постановке определяется по формуле

$$G^h = \frac{3,6[Q_{be} + Q_{inf}][t_{int} - t_{ht}]\tau_{ht}}{Q_h^1 \eta_k [t_{int} - t_{ext}]}, \quad (8)$$

где  $Q_{be}$  – тепловые потери через ограждающие конструкции здания, кДж/ч;  $Q_{inf}$  – тепловые потери за счет инфильтрации наружного воздуха, кДж/ч;  $Q_h^1$  – низшая теплота сгорания газовой-воздушной смеси, кДж/кг;  $\eta_k$  – коэффициент полезного действия котла, установленного у потребителя;  $\tau_{ht}$  – продолжительность отопительного периода, сутки;  $t_{ht}$  – средняя температура за отопительный период, °С;  $t_{int}$  – температура внутреннего воздуха в здании, °С;  $t_{ext}$  – температура наружного воздуха, °С.

В работе [6] приведены корреляционные зависимости, позволяющие определить необходимое количество газовой-воздушной смеси для коммунально-бытовых нужд зданий в зависимости от климатических зон эксплуатации объекта и отапливаемой площади:

– холодная климатическая зона:

$$G_b = 451,42 F_{fl}^{0,4981}, \quad (9)$$

– умеренно-холодная климатическая зона:

$$G_b = 324,42 F_{fl}^{0,5076}, \quad (10)$$

– умеренно-теплая климатическая зона:

$$G_b = 203,35 F_{fl}^{0,5114}, \quad (11)$$

где  $F_{fl}$  – отапливаемая площадь здания, м<sup>2</sup>.

Стоимость распределительных газовых сетей  $C_{gp}(n)$  определяется плотностью населения на газоснабжаемой территории  $q$  и количеством газифицированных зданий  $n$  рассматриваемой системы:

$$\frac{C_{gp}(n)}{n} = f(q; n) \quad (12)$$

На базе формул (1)–(12) была разработана экономико-математическая модель, определяющая минимальную стоимость систем газоснабжения в расчете на одно газифицированное здание с искусственным испарением СУГ.

В результате обработки численных результатов на ЭВМ было получено  $i$  аппроксимирующих уравнений для определения удельной стоимости систем газоснабжения в зависимости от определяющих факторов: количества газифицируемых зданий  $n$ , плотности населения на газоснабжаемой территории  $q$ , структуры застройки населенных пунктов, класса энергетической эффективности зданий, вида газового оборудования зданий и режимов его эксплуатации:

$$C_i = an^{-k} + bq^{-m}n^p, \quad (13)$$

где  $a, b, k, m, p$  – соответственно коэффициенты и показатели степени, получаемые при обработке выражений (1)–(12) на ЭВМ.

Из выражения (13) видно, что плотность населения на газоснабжаемой территории является величиной, зависящей от реального расположения населенного пункта в конкретном регионе страны, и имеет тенденцию к увеличению в центральных областях и, наоборот, тенденцию к уменьшению в малонаселенных восточных районах страны. При этом в любом регионе можно найти населенный пункт с различным количеством газифицируемых зданий, число которых, а следовательно, и численность населения определяются уровнем развития экономики поселения. В этом случае оптимальная стоимость поселковых систем газоснабжения определяется оптимальным количеством газифицируемых зданий, т.е.  $n = n_{opt}$ .

Для нахождения оптимального значения  $C_i$  необходимо про дифференцировать выражение (13) по управляющему параметру  $n$ .

$$\frac{\partial C_i(q; n)}{\partial n} = 0. \quad (14)$$

В результате решения уравнения (14) имеем:

$$n_{opt} = c \cdot q^f, \quad (15)$$

где  $c, f$  – соответственно коэффициент и показатель степени, зависящие от структуры застройки населенного пункта, вида газоиспользующего оборудования и энергетической эффективности зданий.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В целях численной реализации экономико-математической модели (1)–(12) были проведены расчеты, в которых использовались следующие исходные данные и предпосылки:

- в качестве источника газоснабжения принята групповая резервуарная установка с подземными резервуарами СУГ;
- схема регазификации СУГ – искусственная, на базе огневых и электрических испарителей;
- в системе газоснабжения имеется блок подготовки газовоздушной смеси с резервуаром хранения смеси для снятия пиковых нагрузок населенного пункта;
- уличные распределительные газовые сети – тупиковые, выполнены из газопроводов с подземной прокладкой;
- в качестве расчетных моделей застройки населенного пункта приняты два варианта, обеспечивающих максимальную и минимальную компактность: многорядная застройка, характерная для поселков с компактной планировкой, и двухрядная, характерная для поселков с разбросанной планировкой;
- плотность населения газоснабжаемой территории  $q$  варьировалась в пределах от  $7,5 \cdot 10^{-3}$  до  $0,6 \cdot 10^{-3}$  чел/м<sup>2</sup> при среднем коэффициенте заселенности зданий  $S=4$  чел/зд и изменении территории домовладения от 4 до 50 соток;
- класс энергетической эффективности газоснабжаемых зданий принят по [6].

Результаты соответствующих расчетов приводятся в таблице.

Оптимальные параметры систем газоснабжения на базе газозвоздушной смеси

Плотность населения на газифицируемой территории $q$ , чел/м <sup>2</sup>	Оптимальное количество газифицируемых зданий $n_{opt}$ системы газоснабжения при регазификации СУГ в испарителе			
	электрического типа		огневого типа	
	характер застройки населенного пункта			
	многорядная	двухрядная	многорядная	двухрядная
Усадебные здания с существующим уровнем теплозащиты. Газовое оборудование – газовые плиты, газовые отопительные печи периодического действия				
$0,6 \cdot 10^{-3}$	59	39	36	28
$2,5 \cdot 10^{-3}$	107	66	64	40
$7,5 \cdot 10^{-3}$	201	121	120	75
Усадебные здания с повышенным уровнем теплозащиты. Газовое оборудование – газовые плиты, газовые отопительные котлы непрерывного действия				
$0,6 \cdot 10^{-3}$	62	42	50	36
$2,5 \cdot 10^{-3}$	146	102	121	84
$7,5 \cdot 10^{-3}$	286	198	228	150
Коттеджные здания с повышенным уровнем теплозащиты. Газовое оборудование – газовые плиты, водонагреватели и отопительные котлы непрерывного действия				
$0,6 \cdot 10^{-3}$	62	42	51	36
$2,5 \cdot 10^{-3}$	148	99	124	80
$7,5 \cdot 10^{-3}$	242	185	195	154

Как видно из таблицы, оптимальные параметры поселковых систем газоснабжения изменяются в очень широких пределах. При этом определяющее влияние оказывают плотность населения и характер застройки населенного пункта. При применении электрических испарителей сжиженного углеводородного газа к резервуарной установке подключается большее количество газифицируемых зданий при минимальной стоимости системы газоснабжения, однако огневые испарители СУГ не требуют для работы электроэнергии, что является одним из важнейших аргументов для их применения в системах снабжения газозвоздушными смесями.

Указанное обстоятельство необходимо учитывать в проектной практике, максимально привязывая проектные решения к конкретным особенностям газифицируемого населенного пункта.

### ВЫВОДЫ

1. Определено оптимальное количество зданий, газифицируемых от групповых резервуарных установок, при использовании в системах искусственного испарения сжиженного углеводородного газа для последующего формирования газозвоздушной смеси рекомендуемого состава.

2. Внедрение приведенных рекомендаций в широкую инженерную практику способствует совершенствованию структуры топливно-энергетического баланса сельских населенных пунктов за счет вытеснения твердого и жидкого топлива из сферы бытового энергообеспечения, а также возможной привязки существующих систем снабжения СУГ к проектируемым сетям природного газа.

### Список литературы

- Осипова, Н.Н. Применение газозвоздушных смесей для газоснабжения объектов / Н.Н. Осипова, И.М. Бычкова // Научно-технические проблемы совершенствования и

развития систем газоэнегоснабжения: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов: СГТУ, 2018. – С. 17–19.

2. Osipova, N.N. Justification of the use of technical butane for consumers gas supply / N.N. Osipova, K.V. Dyachenko // Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP. Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 463, P. 1. – IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering 463 022075.

3. Tudora, C. Possible thermal processes involved in the storage of liquefied petroleum gas / C. Tudora, A. Lazar, E. Monica // THERMO TECHNICA (Oil-gas university of Ploiesti). – 2013. – №2. – P. 63–66.

4. Zainal, Z. Heat and mass transfer studies in luquefied petroleum gas storage operations / Z. Zainal, M. Hanapi, J. Radzuan and M. Azeman // Gas Fakulri Kejuruteraau Kimia & Kejuruteraau Sumber Asli Universiti Teknologi (Malaysia). – 2006. – P. 749.

5. Бычкова, И.М. К определению коэффициента теплопередачи при теплообмене горловины подземного резервуара с окружающим грунтовым массивом / И.М. Бычкова, А.А. Поберий // Ресурсо-энергоэффективные технологии в строительном комплексе: сборник научных трудов по материалам VI Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов: СГТУ, 2018. – С.282–288.

6. Osipova, N.N. Mathematical modeling of the annual consumption of gas-air mixture on the basis of technical butane for household needs of individual residential buildings / N.N. Osipova, B.M. Grishin, S.G. Kultiaev // Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Published 1. – 2020. – Vol. 753. Chapter 1. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/753/2/022015>

#### References

1. Osipova, N.N. Application of gas-air mixtures for gas supply of objects / N.N. Osipova, I.M. Bychkova // Scientific and technical problems of improvement and development of gas supply systems: materials of the Intern. scientific-practical conf. – Saratov: SSTU, 2018. – P. 17–19.

2. Osipova, N.N. Justification of the use of technical butane for consumers gas supply / N.N. Osipova, K.V. Dyachenko // Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP. Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 463, P. 1. – IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering 463 022075.

3. Tudora, C. Possible thermal processes involved in the storage of liquefied petroleum gas / C. Tudora, A. Lazar, E. Monica // THERMO TECHNICA (Oil-gas university of Ploiesti). – 2013. – №2. – P. 63–66.

4. Zainal, Z. Heat and mass transfer studies in luquefied petroleum gas storage operations / Z. Zainal, M. Hanapi, J. Radzuan and M. Azeman // Gas Fakulri Kejuruteraau Kimia & Kejuruteraau Sumber Asli Universiti Teknologi (Malaysia). – 2006. – P. 749.

5. Bychkova, I.M. To the determination of the heat transfer coefficient during heat exchange of an underground reservoir's neck with the surrounding soil massive / I.M. Bychkova, A.A. Poberiy // Resource-energy-efficient technologies in the building complex: collection of scientific papers based on materials of the VI International. scientific-practical. conf. – Saratov: SSTU, 2018. – P.282–288.

6. Osipova, N.N. Mathematical modeling of the annual consumption of gas-air mixture on the basis of technical butane for household needs of individual residential buildings / N.N. Osipova, B.M. Grishin, S.G. Kultiaev // Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Published 1. – 2020. – Vol. 753. Chapter 1. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/753/2/022015>

УДК 628.143

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

**Андреев Сергей Юрьевич**,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Водоснабжение,  
водоотведение и гидротехника»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

**Вилкова Наталья Георгиевна**,  
доктор химических наук, профессор  
кафедры «Физика и химия»  
E-mail: ngvilkova@mail.ru

**Сафронов Максим Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Водоснабжение, водоотведение  
и гидротехника»  
E-mail: mksafronov@rambler.ru

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

**Andreev Sergey Yuryevich**,  
Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Water Supply, Sewerage  
and Hydraulic Engineering»  
E-mail:andreev3007@rambler.ru

**Vilkova Natalya Georgievna**,  
Doctor of Chemical Sciences, Professor of the  
department «Physics and Chemistry»  
E-mail: ngvilkova@mail.ru

**Safronov Maxim Aleksandrovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Water Supply, Sewerage and  
Hydraulic Engineering»  
E-mail: mksafronov@rambler.ru

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАМИНАРНОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ЕГО СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ

С.Ю. Андреев, Н.Г. Вилкова, М.А. Сафронов

Приведены результаты теоретических исследований гидродинамических процессов изменения характеристик ламинарного потока жидкости в трубе круглого сечения в зависимости от величины средней скорости. Показано, что среднедействующее значение скорости осесимметричного ламинарного потока жидкости имеет величину  $u_{cp} = \frac{4}{3} v$ , которая отличается от величины средней скорости  $v$  этого потока. Получены математические зависимости, позволяющие определять значения следующих параметров: пристеночного градиента скорости  $G_*$ ; толщины пристеночного подслоя  $\delta_*$ , местной скорости на границе пристеночного подслоя  $u_\delta$  в зависимости от значения средней скорости  $v$  ламинарного потока жидкости. Использование разработанной методики расчета позволит оптимизировать процессы проектирования и эксплуатации трубчатых устройств, работающих в ламинарном режиме.

*Ключевые слова: градиент скорости; динамическая скорость; средняя скорость; среднедействующее значение скорости; пристеночный подслоя; переходный подслоя; ядро потока*

## REGULARITIES OF THE PROCESSES OF CHANGING THE HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A LAMINAR LIQUID FLOW DEPENDING ON THE VALUE OF ITS AVERAGE VELOCITY

S.Yu. Andreev, M.A. Safronov

The results of theoretical studies of hydrodynamic processes of changing the characteristics of a laminar flow of liquid in a circular pipe depending on the value of its average velocity are presented. It is shown that the average effective velocity of an axisymmetric laminar fluid flow has a value that differs from the value of the average velocity of this flow. Mathematical dependencies are obtained

that allow determining the values  $u_{cp} = \frac{4}{3}v$  of the following parameters: the wall-mounted velocity gradient  $G_*$ ; the thickness of the wall sublayer  $\delta_*$ , the local velocity at the border of the wall sublayer, and  $\delta$  depending on the value of the average velocity of the laminar fluid flow. Using the developed method of calculation allows to optimize the processes of design and operation of tubular devices operating in a laminar mode.

*Keywords: velocity gradient; dynamic velocity; average velocity: average effective velocity value; wall sublayer: transition sublayer: flow core*

Основными понятиями раздела гидравлики «гидрокинематика» являются: местная скорость  $u$ , м/с, – скорость движения жидкости в рассматриваемой точке потока; средняя скорость  $v$ , м/с, – некоторое абстрактное значение скорости движения жидкости, имеющее одинаковую величину для всех точек выбранного живого сечения потока площадью  $\omega$ , м<sup>2</sup>, и обеспечивающее секундный расход протекающей через него жидкости  $Q$ , м<sup>3</sup>/с.

$$v = \frac{Q}{\omega}, \text{ м/с.} \quad (1)$$

При ламинарном движении жидкости в трубе круглого сечения эпюра местных скоростей в поперечном сечении потока представляет собой параболоид вращения, и изменение величины местной скорости жидкости  $u_r$  по текущему радиусу поперечного сечения  $r$  описывается законом Стокса [1].

$$u_r = 2v \left[ 1 - \frac{r^2}{r_o^2} \right], \text{ м/с.} \quad (2)$$

Введение понятия средней скорости позволяет преобразовать квадратичное распределение местных скоростей  $u_r$  по радиусу  $r$  к равномерному, при котором величина местных скоростей условно приводится к значению средней скорости  $v$ . Графически это означает, что параболическая эпюра распределения величин местных скоростей преобразуется в цилиндрическую эпюру с основанием площадью  $\omega$  и высотой, равной значению средней скорости  $v$  (рис. 1).

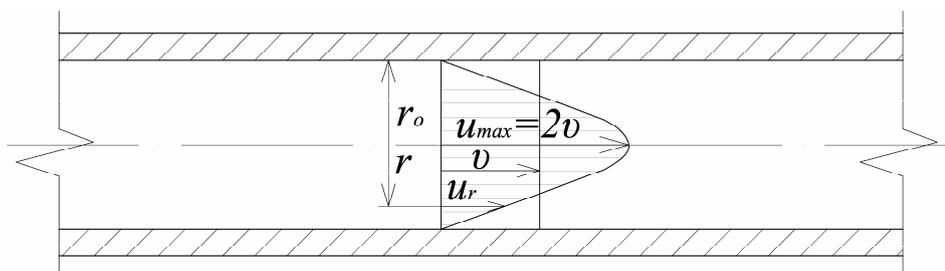


Рис. 1. Графики распределения величин местных скоростей ламинарного потока жидкости  $u_r$  по текущему радиусу трубы круглого сечения  $r$

При параболическом законе распределения величин местных скоростей  $u_r$  по текущему радиусу трубы круглого сечения максимальная скорость потока жидкости  $u_{max}=2v$  наблюдается на оси потока при  $r=0$ . При увеличении значения  $r$  до  $r_o$  величина местной скорости  $u_r$  становится равной нулю у стенки. В соответствии с теоремой о среднем значении функции, при условии, что функция  $y=f(x)$  непрерывна на некотором отрезке  $[a, b]$ , где  $a < b$ , её среднее значение определяется как

$$y_{cp} = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx. \quad (3)$$

Функция (2) в интервале значений  $r$  от 0 до  $r_o$  является непрерывно возрастающей, и её среднее значение в соответствии с (3) может быть определено как

$$u_{cp} = \frac{1}{r_o} \int_{r=0}^{r_o} f(u_r) dr = \frac{1}{r_o} \int_{r=0}^{r_o} 2v \left( 1 - \frac{r^2}{r_o^2} \right) dr = \frac{2v}{r_o^3} \int_{z=0}^{z_o} (r_o^2 - r^2) dr = \frac{2v}{r_o^3} \left( r_o^3 - \frac{r_o^3}{3} \right) = 2v \frac{r_o^3}{r_o^3} \cdot \frac{2}{3} = \frac{4}{3} v. \quad (4)$$

Таким образом, из (4) следует, что величина среднедействующего значения скорости ламинарного потока жидкости в трубе круглого сечения  $u_{cp}$ , м/с, не равна величине средней скорости  $v$ , м/с, этого потока

$$u_{cp} = \frac{4}{3} v \neq v. \quad (5)$$

Режим движения жидкости в трубе круглого сечения определяется величиной критерия Рейнольдса

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (6)$$

где  $d=2r_o$  – характерный размер трубы (величина её диаметра), м;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с.

В работе Л. Прандтля [2] было высказано предположение, что наряду с ламинарным режимом движения потока жидкости, наблюдаемым при  $Re < 2320$ , существует и режим «ползущего течения» жидкости, наблюдаемый при величине  $Re < 1$ . Режим «ползущего течения» можно проиллюстрировать на примере течения жидкости между двумя расположенными на малом расстоянии друг от друга  $\delta^*$ , м, параллельными пластинами, одна из которых неподвижна, а другая движется в собственной плоскости с постоянной скоростью  $u_{\delta^*}$ , м/с.

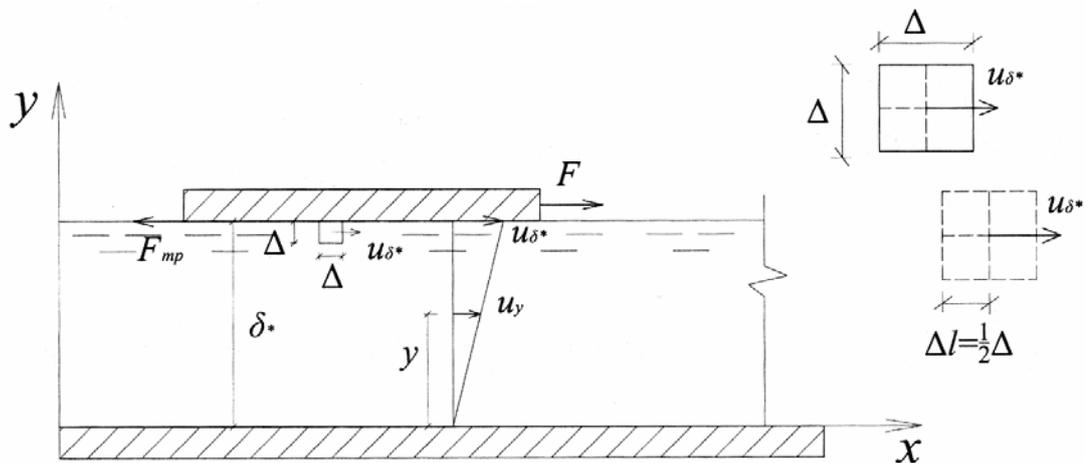


Рис. 2. Схема движения вязкой жидкости между двумя пластинами

К верхней пластине приложена сила  $F$ , Н, которая уравнивается силой вязкого трения  $F_{тр}$ , Н, что и обеспечивает поддержание постоянной величины скорости перемещения пластины  $u_{\delta^*}$ , м/с. Под действием сил вязкого трения между пластинами устанавливается движение жидкости, при котором слой, непосредственно прилегающий к движущейся пластине, «прилипает к ней» и движется с такой же скоростью  $u_{\delta^*}$ , а промежуточные слои скользят друг по другу, при этом величина их скорости умень-

шается по линейному закону пропорционально отношению  $\frac{y}{\delta_*}$ . Скорость слоя жидкости, находящегося на расстоянии  $y$ , м, от нижней пластины, может быть определена по формуле

$$u_y = u_{\delta_*} \frac{y}{\delta_*} = G_* \cdot y, \text{ м/с}, \quad (7)$$

где  $G_* = \frac{u_{\delta_*}}{\delta_*} = \text{const}$  – величина градиента скорости движения жидкости в пространстве между двумя пластинами,  $\text{с}^{-1}$  (изменение величины скорости течения жидкости, приходящееся на единицу толщины слоя в направлении, перпендикулярном к плоскости движущейся пластины).

Символ \* означает здесь и далее, что данная характеристика принадлежит к пристеночному слою жидкости, прилегающему к твердой поверхности.

В соответствии с законом вязкого трения Ньютона величина силы трения может быть определена по формуле

$$F_{\text{тр}} = \mu_* \frac{u_{\delta_*}}{\delta_*} S = \mu_* G_* S, \text{ Н}, \quad (8)$$

где  $\mu_*$  – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом вязкости жидкости,  $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{с}$ , Па·с;  $S$  – площадь движущейся пластины,  $\text{м}^2$ .

Отношение величины силы вязкого трения  $F_{\text{тр}}$ , Н, к площади пластины  $S$ ,  $\text{м}^2$ , принято называть касательным напряжением силы вязкого трения

$$\tau_* = \frac{F_{\text{тр}}}{S}, \text{ Па}. \quad (9)$$

С учетом формулы (9) формула (8) запишется в виде

$$\tau_* = \mu_* \frac{u_{\delta_*}}{\delta_*} = \mu_* G_*, \text{ Па}. \quad (10)$$

Поскольку отношение величины касательного напряжения силы вязкого трения в пристеночном слое жидкости  $\tau_*$ , Па, к величине плотности жидкости  $\rho$ ,  $\text{кг/м}^3$ , имеет размерность квадрата скорости, было введено понятие скорости касательного напряжения сил вязкого трения в пристеночном слое (динамической скорости)  $v_*$ , м/с [2]:

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_*}{\rho}}, \text{ м/с}. \quad (11)$$

Из формул (10) и (11) с учетом того, что величина кинематического коэффициента вязкости жидкости  $\nu_*$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ , определяется как отношение динамического коэффициента вязкости  $\mu_*$ , Па·с, к плотности жидкости  $\rho$ ,  $\text{кг/м}^3$ ,

$$\nu_* = \frac{\mu_*}{\rho}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (12)$$

может быть получено соотношение

$$v_*^2 = \frac{\tau_*}{\rho} = \frac{\mu_*}{\rho} \frac{u_{\delta_*}}{\delta_*} = \nu_* \frac{u_{\delta_*}}{\delta_*}, \text{ м}^2/\text{с}^2, \quad (13)$$

откуда

$$u_{\delta_*} = v_*^2 \frac{\delta_*}{\nu_*}, \text{ м/с}. \quad (14)$$

Из (14) может быть выведена формула для определения величины градиента скорости  $G_*$  в пристеночном слое потока

$$G_* = \frac{u_{\delta^*}}{\delta_*} = \frac{v_*^2}{v_*}, \text{ с}^{-1}. \quad (15)$$

В тонком слое жидкости, прилегающем к движущейся пластине, может быть выделен кубический элемент с размером стороны  $\Delta$ , м, движущийся прямолинейно совместно с пластинкой с постоянной скоростью  $u_{\delta^*}$ , м/с. Величина элементарной работы  $A_\Delta$ , Дж, силы трения  $F_{\text{тр}}$ , Н, при перемещении кубического элемента на расстояние, отделяющее центр масс куба от его передней грани  $\Delta l = \frac{1}{2}\Delta$ , м, будет равна величине кинетической энергии этого элемента  $E_\Delta$ , Дж:

$$A_\Delta = E_\Delta, \text{ с}^{-1}. \quad (16)$$

Величина работы, совершаемой силой трения  $F_{\text{тр}}$ , Н, при перемещении кубического элемента жидкости на расстояние  $\Delta l = \frac{1}{2}\Delta$  с учетом формул (8) и (14) может быть определена как

$$\begin{aligned} A_\Delta &= F_{\text{тр}} \cdot \Delta l = \mu_* \Delta^2 \frac{u_{\delta^*}}{\delta_*} \frac{1}{2} \Delta = \mu_* \Delta^3 \frac{1}{2\delta_*} u_{\delta^*} = \\ &= \frac{1}{2} \mu_* \Delta^3 \frac{1}{\delta_*} \frac{v_*^2}{v_*} = \frac{1}{2} \frac{\mu_*}{v_*} \Delta^3 v_*^2 = \frac{1}{2} \rho \Delta^3 v_*^2, \text{ Дж}. \end{aligned} \quad (17)$$

Величина кинетической энергии кубического элемента жидкости, движущегося со скоростью  $u_{\delta^*}$ , м/с, равна:

$$E_\Delta = \frac{1}{2} \Delta m u_{\delta^*}^2 = \frac{1}{2} \rho \Delta^3 u_{\delta^*}^2, \text{ Дж}, \quad (18)$$

из условия (16) следует, что

$$\frac{1}{2} \rho \Delta^3 v_*^2 = \frac{1}{2} \rho \Delta^3 u_{\delta^*}^2, \text{ Дж}, \quad (19)$$

откуда

$$v_* = u_{\delta^*}, \text{ м/с}. \quad (20)$$

Из (20) следует, что величина местной скорости  $u_{\delta^*}$ , м/с, в слое жидкости, прилегающем к поверхности движущейся пластины, равна величине динамической скорости  $v_*$ , м/с.

Из соотношения (14) следует, что

$$\frac{\delta_*}{v_*} = \frac{u_{\delta^*}}{v_*^2}, \text{ с/м}. \quad (21)$$

Величина локального числа Рейнольдса в слое жидкости, прилегающем к движущейся пластине, с учетом формул (20) и (21) будет иметь значение

$$\text{Re}_{\delta^*} = \frac{\delta_* u_{\delta^*}}{v} = \frac{u_{\delta^*}}{v_*^2} u_{\delta^*} = \frac{u_{\delta^*}^2}{v_*^2} = 1. \quad (22)$$

В работе [2] указывается, что в пристеночном пространстве поток жидкости образует тонкий пристеночный слой, в котором наблюдается «ползущее течение», при

котором силы инерции имеют меньшее значение, чем силы вязкости трения, вследствие чего градиент скорости сохраняет постоянную величину  $G_* = \text{const}$ , а местные скорости увеличивают свое значение при уменьшении величины текущего радиуса  $r$  по линейному закону (7).

В соответствии с основным уравнением равномерного движения потока жидкости величина касательного напряжения силы вязкого трения может быть определена как

$$\tau_* = \frac{r_o}{2} \rho g i = R \rho g i, \text{ Па}, \quad (23)$$

где  $R = \frac{r_o}{2}$  – величина гидравлического радиуса трубы круглого сечения, м;  $i$  – гидравлический уклон.

Из формул (11) и (23) следует, что

$$v_*^2 = R g i, \text{ м}^2/\text{с}^2. \quad (24)$$

Величина касательного напряжения сил вязкого трения в потоке жидкости на расстоянии  $r$  от оси потока может быть определена как

$$\tau_r = \frac{r_o - y}{2} \rho y i = \frac{r}{2} \rho g i = \frac{r}{2R} \rho v_*^2 = \frac{r}{r_o} \rho v_*^2 = \frac{r}{r_o} \tau_*, \text{ Па}. \quad (25)$$

Из формулы (25) с учетом  $G_* = \frac{\tau_*}{\mu}$  может быть получена формула для определения величины градиента скорости на расстоянии  $r$  от оси потока

$$G_r = G_* \frac{r}{r_o}, \text{ с}^{-1}. \quad (26)$$

Из формулы (26) следует, что величина градиента скорости  $G_r$  в потоке жидкости при увеличении значения текущего радиуса  $r$ , так же как величина касательного напряжения силы вязкого трения  $\tau_r$ , изменяется по линейному закону от нуля при  $r=0$  в приосевой области до значения  $G_*$  в пристеночной области.

В отличие от пристеночного подслоя в ядре ламинарного потока жидкости величина сил инерции превышает величину сил вязкого трения и наблюдается квадратичный закон распределения местных скоростей  $u_r$  по текущему радиусу  $r$ .

Формула для определения значения величины градиента скорости в ядре ламинарного потока жидкости также может быть получена путем дифференцирования формулы Стокса (2):

$$G_r = -\frac{du_r}{dr} = \frac{4\nu r}{r_o^2} = \frac{4\nu}{r_o} \frac{r}{r_o} = G_* \frac{r}{r_o}, \text{ с}^{-1}, \quad (27)$$

где  $G_* = \frac{4\nu}{r_o} = \frac{2\nu}{R}$ ,  $\text{с}^{-1}$ , – величина градиента скорости в пристеночной области потока жидкости.

Таким образом, величина градиента скорости в пристеночной области потока может быть определена как

$$G_* = \frac{4\nu}{r_o} = \frac{2\nu}{R}, \text{ с}^{-1}. \quad (28)$$

В формуле (15) в отличие от формулы (28) присутствует динамическая характеристика напора (величина динамической скорости  $v_*$ ). В формуле (28) содержатся только лишь кинематические характеристики (средняя скорость  $v$  и гидравлический

радиус  $R$ ), вследствие чего она является универсальной и может быть использована при описании как ламинарного, так и турбулентного потока жидкости.

Из (15) и (28) с учетом того, что  $v_* = v\sqrt{\frac{\lambda}{8}}$  и  $u_{\delta_*} = v_*$ , может быть получена формула для определения толщины пристеночного подслоя жидкости

$$\delta_* = \frac{u_{\delta_*}}{G_*} = \frac{v_*}{2v} R = \frac{v\sqrt{\frac{\lambda}{8}}}{2v} R = R\sqrt{\frac{\lambda}{32}}, \text{ м.} \quad (29)$$

Формула (2) с учетом формулы (28) может быть приведена к виду

$$\begin{aligned} u_r &= 2v \left[ 1 - \frac{(r_o - y)^2}{r_o^2} \right] = 2v \left[ 1 - \frac{r_o^2 - 2r_o y + y^2}{r_o^2} \right] = \\ &= 2v \left[ 1 - 1 + \frac{2y}{r_o} - \frac{y^2}{r_o^2} \right] = \frac{2v}{r_o} \left[ \frac{2r_o - y}{r_o} \right] y = \\ &= \frac{1}{2} G_* \left[ \frac{2r_o - y}{r_o} \right] y = G_* \left[ \frac{2r_o - y}{2r_o} \right] y = G_* \left[ \frac{d - y}{d} \right] y, \text{ м/с.} \end{aligned} \quad (30)$$

По аналогии с формулой (7) можно записать для ядра ламинарного потока

$$u_y = G_{\text{ср}y} y, \text{ м/с}, \quad (31)$$

где  $G_{\text{ср}y}$  – средняя величина градиента скорости в слое жидкости толщиной  $y$ ,

$$G_{\text{ср}y} = G_* \left( \frac{d - y}{d} \right), \text{ с}^{-1}. \quad (32)$$

В отличие от пристеночного подслоя, градиент скорости в ядре потока  $G_*$ ,  $\text{с}^{-1}$ , не является постоянной величиной и изменяет свое значение в соответствии с формулой (32). По аналогии с формулой (4) может быть получена величина среднедействующего значения скорости  $u_{\text{ср}\delta_*}$  в пристеночном подслое ламинарного потока жидкости

$$u_{\text{ср}\delta_*} = \frac{1}{\delta_*} \int_{y=0}^{\delta_*} G_* y dy = \frac{G_*}{\delta_*} \frac{\delta_*^2}{2} = \frac{G_*}{2} \delta_* = \frac{4v}{2r_o} \frac{r_o}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{32}} = v \sqrt{\frac{\lambda}{32}} = \frac{v}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{8}} = \frac{v_*}{2}, \text{ м/с.} \quad (33)$$

Для ламинарного потока жидкости величина коэффициента трения может быть определена по формуле

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64v}{\nu d}. \quad (34)$$

Из формул (33) и (34) следует, что среднедействующее значение скорости  $u_{\text{ср}\delta_*}$  в пристеночном подслое ламинарного потока достигает величины средней скорости потока  $v$  при числе Рейнольдса  $\text{Re}=2$ .

$$u_{\text{ср}\delta_*} = v \sqrt{\frac{\lambda}{32}} = v \sqrt{\frac{64}{\text{Re} \cdot 32}} = v \sqrt{\frac{2}{\text{Re}}} = v \text{ при } \text{Re}=2. \quad (35)$$

Пристеночный подслоя ламинарного потока при  $\text{Re}=2$  будет иметь толщину

$$\delta_* = R \sqrt{\frac{\lambda}{32}} = \frac{r_o}{2} \sqrt{\frac{64}{\text{Re} \cdot 32}} = \frac{r_o}{2} \sqrt{\frac{64}{2 \cdot 32}} = \frac{r_o}{2}, \text{ м.} \quad (36)$$

Величина местной скорости потока, вычисленная по формуле (2), на расстоянии  $r = \frac{1}{2}r_o$  от оси потока будет иметь значение

$$u_r = 2\nu \left[ 1 - \left( \frac{\frac{1}{2}r_o}{r_o} \right)^2 \right] = 2\nu [1 - 0,25] = 1,5\nu, \text{ м/с.} \quad (37)$$

Величина местной скорости на оси потока при  $r=0$ , вычисленная по формуле (2), будет иметь значение

$$u_r = 2\nu \left[ 1 - \left( \frac{0}{r_o} \right)^2 \right] = 2\nu, \text{ м/с.} \quad (38)$$

Величина местной скорости потока на границе пристеночного подслоя при  $Re=2$  в соответствии с формулой (7) будет иметь значение

$$u_{\delta^*} = G_*\delta_* = \frac{4\nu r_o}{r_o} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{32}} = 2\nu \sqrt{\frac{64}{Re \cdot 32}} = 2\nu = \nu_*, \text{ м/с.} \quad (39)$$

Таким образом, при величине числа Рейнольдса  $Re=2$  значения местной скорости потока жидкости  $u_r$ , вычисленные по квадратичной зависимости Стокса (2) и формуле линейного распределения скорости в пристеночном подслое  $u_{\delta^*}$  (7), будут иметь одинаковую величину на границе пристеночного слоя, имеющего толщину  $\delta$ , равную удвоенному значению толщины пристеночного подслоя  $2\delta_*$  (рис. 3):

$$\delta = 2\delta_* = 2 \frac{1}{2} r_o = r_o, \text{ м,} \quad (40)$$

$$u_{r_o} = u_{\delta^*} = 2\nu, \text{ м/с.} \quad (41)$$

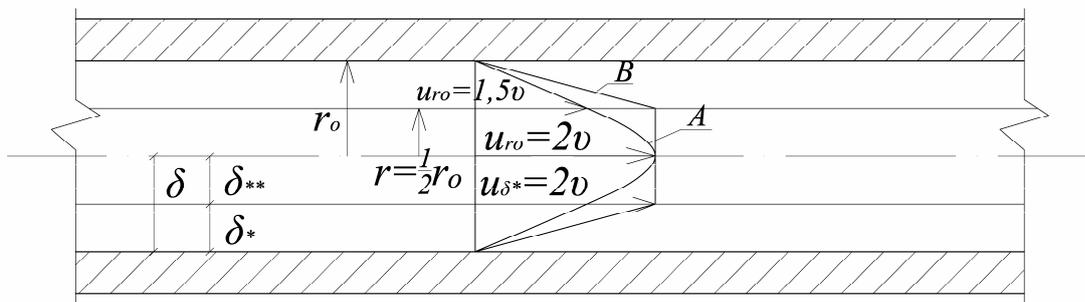


Рис. 3. Профили распределения величин местных скоростей ламинарного потока жидкости  $u_r$  по текущему радиусу трубы круглого сечения  $r$  при числе Рейнольдса  $Re=2$ :

- А – профиль, построенный по формуле (2);
- В – профиль, построенный по формуле (7)

На рис. 4 представлены профили распределения величин местных скоростей в пристеночной области ламинарного потока жидкости по текущему радиусу трубы круглого сечения  $r$  при  $2 < Re < 2320$ .

При числе Рейнольдса  $2 < Re < 2320$  пересечение эпюр С и А местных скоростей в пристеночной области ламинарного потока в трубе круглого сечения происходит на границе пристеночного слоя, имеющего толщину  $\delta = 2\delta_* = 2R \sqrt{\frac{\lambda}{32}} = r_o \sqrt{\frac{\lambda}{32}}$ , м (см. рис. 4).

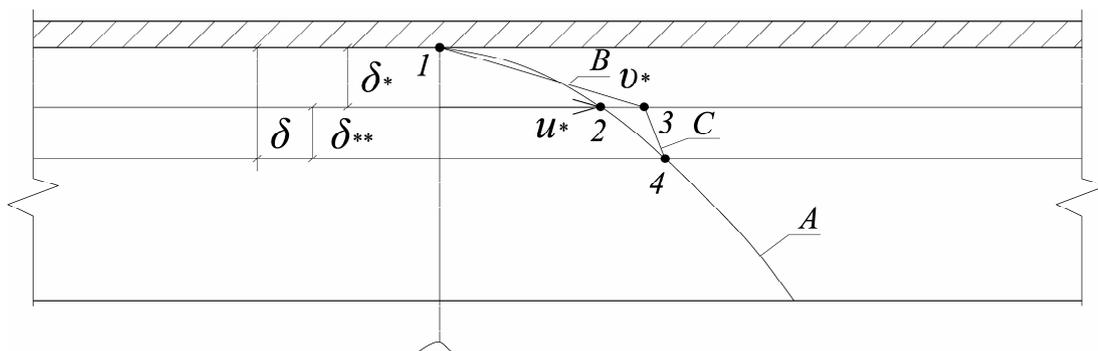


Рис. 4. Профили распределения величин местных скоростей в пристеночной области ламинарного потока жидкости по текущему радиусу  $r$  трубы круглого сечения при  $2 < Re \leq 2320$ :

A – профиль, построенный по формуле (2);

B – профиль, построенный по формуле (7);

C – профиль, построенный по формуле (42)

На рис. 4 представлены эпюры распределения величин местных скоростей в пристеночной области ламинарного потока жидкости по текущему радиусу  $r$  трубы круглого сечения при  $2 < Re \leq 2320$ : эпюра A – параболическая кривая 1-2-4 построена по квадратичному закону (формула (2)); эпюра B – прямая линия 1-3 построена по линейному закону распределения величин местных скоростей в пристеночном подслое, имеющем толщину  $\delta^*$  (формула (7)); эпюра C – кривая 3-4 описывает распределение величин местных скоростей потока в переходном подслое, имеющем толщину  $\delta^{**} = \delta^*$ . Кривая 3-4 построена по формуле (42), представленной в работе [3].

$$u_{r^{**}} = \frac{2}{3} \frac{v}{R(r_o - \delta_*)^2} [(r_o - \delta_*)^3 - r^3] + v_*, \text{ м/с.} \quad (42)$$

Пристеночный подслой и переходный подслой вместе образуют пристеночный слой (имеющий толщину  $\delta = 2\delta^*$ ) – область ламинарного потока, где вязкость играет определяющую роль в характере движения жидкости. Величина местной скорости потока жидкости на границе пристеночного слоя ( $\delta = 2\delta^*$ ) равна значению местной скорости, вычисленному по квадратическому значению Стокса (2) (при  $r = r_o - 2\delta^*$ ), и может быть определена по формуле, представленной в работе [3]:

$$u_\delta = 2v \left[ 1 - \left( 1 - \sqrt{\frac{\lambda}{32}} \right)^2 \right], \text{ м/с.} \quad (43)$$

Из (29) и формулы  $v_* = v \sqrt{\frac{\lambda}{8}}$  с учетом (34) могут быть получены формулы для определения толщины пристеночного подслоя и величины динамической скорости в ламинарном потоке жидкости в трубе круглого сечения:

$$\delta_* = R \sqrt{\frac{\lambda}{32}} = \frac{d}{4} \sqrt{\frac{64}{Re \cdot 32}} = \frac{d}{4} \sqrt{\frac{2v}{\nu d}} = \sqrt{\frac{\nu d}{8v}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\nu d}{2v}}, \text{ м,} \quad (44)$$

$$v_* = v \sqrt{\frac{\lambda}{8}} = v \sqrt{\frac{64}{Re \cdot 8}} = v \sqrt{\frac{8\nu}{\nu d}} = \sqrt{\frac{8\nu}{\nu d}} = \sqrt{\frac{8\nu\nu}{d}} = 2 \sqrt{\frac{2\nu\nu}{d}}, \text{ м/с.} \quad (45)$$

Проведенные теоретические исследования зависимостей гидродинамических процессов изменения характеристик ламинарного потока жидкости в трубе круглого сечения от величины его средней скорости позволили сделать следующие выводы:

1. Среднедействующее значение скорости ламинарного потока жидкости в трубе круглого сечения имеет величину  $u_{cp} = \frac{4}{3}v$ , которая отличается от величины средней скорости  $v$  этого потока.

2. В пристеночной области ламинарного потока образуется пристеночный слой, который включает в себя два подслоя, имеющие одинаковую толщину  $\delta_* = \delta_{**}$  (пристеночный подслоя и переходный подслоя), и в котором силы вязкого трения играют определяющую роль в характере движения жидкости.

3. В пристеночном подслое градиент скорости  $G_*$  имеет постоянное значение и наблюдается линейный закон распределения величин местных скоростей  $u_r$  по текущему радиусу трубы круглого сечения  $r$ .

4. Величина градиента скорости в пристеночном подслое  $G_*$  является кинематической характеристикой и не зависит от вязкости потока жидкости.

5. Величина градиента скорости в пристеночном подслое  $G_*$  прямо пропорционально зависит от удвоенной величины средней скорости  $2v$  и обратно пропорционально зависит от значения геометрической характеристики поперечного сечения потока – его гидравлического радиуса  $R$ .

6. Величина местной скорости  $u_{\delta_*}$  на границе пристеночного слоя, имеющего толщину  $\delta_*$ , равна динамической скорости  $u_*$  потока жидкости.

7. Толщина пристеночного слоя ламинарного потока жидкости прямо пропорционально зависит от произведения величины гидравлического радиуса  $R$  на квадратный корень  $\frac{1}{32}$ -й величины коэффициента гидравлического трения  $\lambda$ .

8. В переходном подслое, имеющем толщину  $\delta_{**}$ , наблюдается кубический закон распределения величин местных скоростей  $u_r$  по текущему радиусу трубы круглого сечения  $r$ .

9. В ядре ламинарного потока жидкости величина сил инерции превосходит величину сил вязкости трения и наблюдается квадратичный закон (закон Стокса) распределения величин местных скоростей  $u_r$  по текущему радиусу  $r$  трубы круглого сечения.

#### Список литературы

1. Сайридинов, С.Ш. Гидравлика систем водоснабжения и водоотведения / С.Ш. Сайридинов. – М.: Издательство АСВ, 2012. – 352 с.
2. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.
3. Андреев, С.Ю. Оценка гидравлических характеристик трубчатого гидравлического гидродинамического устройства, работающего в ламинарном режиме / С.Ю. Андреев, М.И. Яхкин, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №1. – С. 148–156.

#### References

1. Sairidinov, S.Sh. Hydraulics of water supply and sanitation systems / S.Sh. Sairidinov. – M.: Publishing house ACB, 2012. – 352 p.
2. Prandtl, L. Hydroaeromechanics / L. Prandtl. – Izhevsk: SIC «Regular and chaotic dynamics», 2000. – 576 p.
3. Andreev, S.Yu. Estimation of hydraulic characteristics of a tubular hydraulic hydrodynamic device operating in laminar mode / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, I.A. Garikina // Regional architecture and engineering. – 2018. – №1. – P. 148–156.

УДК 628.143

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

**Андреев Сергей Юрьевич,**  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Водоснабжение,  
водоотведение и гидротехника»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

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

**Сафронов Максим Александрович,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Водоснабжение, водоотведение  
и гидротехника»  
E-mail: mkсафронov@rambler.ru

Penza State University of Architecture  
and Construction

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

**Andreev Sergey Yuryevich,**  
Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Water Supply, Sewerage  
and Hydraulic Engineering»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

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

**Safronov Maxim Aleksandrovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Water Supply, Sewerage and  
Hydraulic Engineering»  
E-mail: mkсафронov@rambler.ru

## УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСТЕНОЧНОГО ПОДСЛОЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА

С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, М.А. Сафронов

Приведены результаты теоретических исследований закономерностей изменения значений гидродинамических характеристик пристеночного подслоя осесимметричного турбулентного потока жидкости в критической точке перехода в область квадратичного закона сопротивления. Показано, что при логарифмическом законе распределения осредненных величин местных скоростей течения  $u_r$  по текущему радиусу  $r$  осесимметричного турбулентного потока жидкости величина расстояния от стенки трубы до слоя, где  $u_r$  будет равна величине средней скорости  $u$ , имеет значение  $y_{сб}=0,223r$ . Получена система теоретических уравнений, позволяющая определять значения гидродинамических характеристик пристеночного подслоя в квадратичной области сопротивления турбулентного потока жидкости в зависимости от величины относительной гидравлической гладкости стенок трубы  $\frac{d}{\Delta}$  и критерия Никурадзе  $N$ . Полученные уравнения могут быть использованы при расчете и проектировании гидродинамических устройств, работающих в области развитой турбулентности.

*Ключевые слова: турбулентный поток, число Никурадзе, критерий Рейнольдса, пристеночный подслой, искусственная шероховатость, эквивалентная шероховатость, динамическая скорость*

## REFINED METHOD FOR DETERMINING THE VALUES OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF NEAR-WALL SUBLAYER OF A TURBULENT FLOW

S.Yu. Andreev, I.A. Garkina, M.A. Safronov

The results of theoretical studies of the patterns of changes in the hydrodynamic characteristics of the near-wall sublayer of axisymmetric turbulent fluid flow at the critical point of transition into the

region of the quadratic law of resistance are presented. It is shown that under the logarithmic law of distribution of averaged local flow velocities  $u_r$  over the current radius  $r$  of the axisymmetric turbulent fluid flow, the distance from the pipe wall to the layer where  $u_r$  will be equal to the average velocity  $v$  has the value  $y_{cp} = 0.223r$ . A system of theoretical equations is obtained that allows to determine hydrodynamic characteristics of wall sublayer in quadratic region of the resistance of turbulent fluid flow depending on the relative hydraulic smoothness of pipe walls  $\frac{d}{\Delta}$  and the Nikuradze criterion  $N$ .

The obtained equations can be used in calculation and design of hydrodynamic devices working in the field of developed turbulence.

*Keywords: quadratic law of resistance, turbulent flow, Nikuradze number, Reynolds criterion, wall sublayer, artificial roughness, equivalent roughness*

В практике расчета напорных технологических трубопроводов основной инженерной задачей является определение величины потерь напора по длине трубопровода. Величина потерь напора по длине трубопровода зависит от режима движения потока жидкости и значения относительной эквивалентной шероховатости труб. При равномерном, установившемся движении жидкости в трубе круглого сечения величина потерь напора  $h$  включает в себя только путевые потери напора на трение и в соответствии с формулой Дарси – Вейсбаха прямо пропорционально зависит от квадрата средней скорости потока жидкости  $v^2$  и обратно пропорционально зависит от диаметра трубы  $d$ .

При ламинарном режиме движения жидкости величина, входящая в формулу Дарси – Вейсбаха, коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  прямо пропорционально зависит от значения критерия Рейнольдса  $Re$  в минус первой степени.

В промышленных трубопроводах переход от ламинарного режима движения жидкости к турбулентному режиму, характеризующемуся неупорядоченным движением жидкости, при котором возникает поперечная составляющая скорости к направлению движения потока, наблюдается в диапазоне чисел Рейнольдса от  $Re_{нкл}$  до  $Re_{вкл}$ .

Для труб круглого сечения принимают величину нижнего критического значения числа Рейнольдса, при котором в некоторых случаях наблюдается переход от ламинарного к турбулентному режиму течения  $Re_{нкл}=2000$ , и величину верхнего критического значения, при котором устойчиво наблюдается режим турбулентного течения  $Re_{вкл}=2320$  [1].

При турбулентном переходном режиме движения жидкости в области гидравлически шероховатого трения величина потерь давления по длине трубопровода определяется как величиной числа Рейнольдса, так и значением относительной шероховатости труб  $\frac{\Delta}{d}$ .

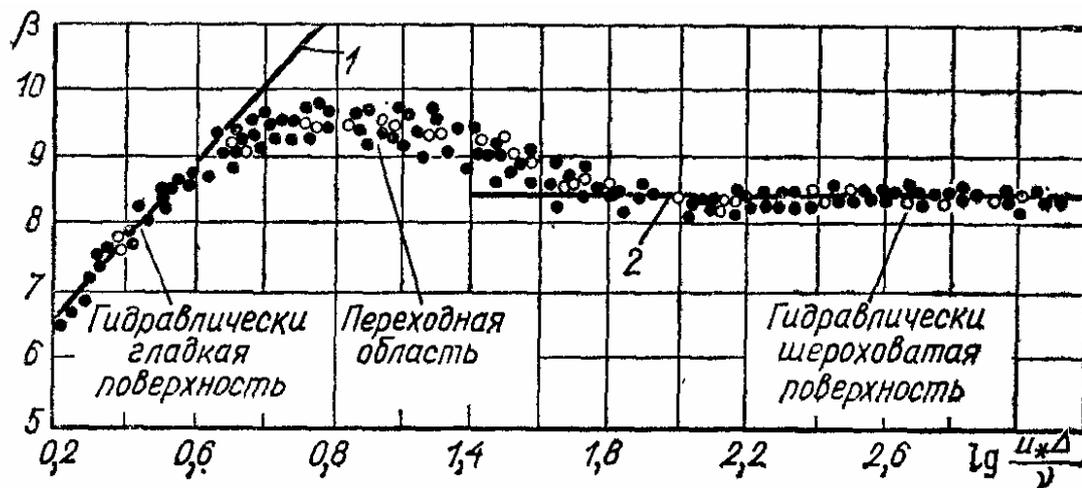
При развитом турбулентном режиме движения жидкости в области «вполне шероховатого трения» величина потерь давления определяется только значением относительной шероховатости трубы  $\frac{\Delta}{d}$ , а величина коэффициента гидравлического трения имеет постоянное значение  $\lambda_{кв}=\text{const}$ , что определяет автомодельность закона гидравлического сопротивления. Экспериментальные исследования влияния величины относительной шероховатости  $\frac{\Delta}{d}$  на величину коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  в области развитого турбулентного режима движения жидкости (в области автомодельности закона гидравлического сопротивления) были проведены И.Никурадзе [2]. Внутреннюю поверхность используемых в экспериментальных исследованиях труб покрывали клеем, а затем обсыпали песком. Использование калиброванных зерен песка с заданной шероховатостью  $\Delta$  позволило создать равнозернистую искусственную шероховатость по всей поверхности труб.

В опытах И. Никурадзе изучали зависимость коэффициента  $\beta$  в формуле относительной максимальной скорости на оси трубы Кармана – Прандтля (1) от значения безразмерного компонента  $\lg \frac{u_* \Delta}{\nu}$ .

$$\frac{u_{\max}}{u_*} = \frac{1}{\chi} \ln \frac{r_o}{\Delta} + \beta = 5,756 \lg \frac{r_o}{\Delta} + \beta, \quad (1)$$

где  $\chi=0,4$  – постоянная Кармана (первая константа турбулентности).

Данные, полученные И.Никурадзе, представлены в графическом виде на рисунке.



Результаты опытов И.Никурадзе по изучению гидравлических характеристик труб с искусственной шероховатостью

При  $\frac{u_* \Delta}{\nu} > 70$  коэффициент  $\beta$  имеет постоянную величину ( $\beta = 8,5 = \text{const}$ ). В этом случае формула (1) принимает вид

$$\frac{u_{\max}}{u_*} = 2,5 \ln \frac{r_o}{\Delta} + 8,5, \quad (2)$$

или

$$\frac{u_{\max}}{u_*} = 5,756 \lg \frac{r_o}{\Delta} + 8,5. \quad (3)$$

Из логарифмического закона Кармана – Прандтля (3), рассматриваемого в настоящее время в качестве одного из фундаментальных соотношений в инженерной науке, следует, что относительный дефицит средней скорости  $u$  от величины максимальной скорости на оси трубы  $u_{\max}$  является постоянной величиной:

$$D = \frac{u_{\max} - u}{u_*} = \frac{3}{2\chi} = 3,75 = \text{const}. \quad (4)$$

Преобразовывая (3) и (4), получаем формулу относительной средней скорости в трубе круглого сечения.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_{\max}}{u_*} - D = 5,756 \lg \frac{r_o}{\Delta} + \beta - D = 5,756 \lg \frac{r_o}{\Delta} + 4,75. \quad (5)$$

С учетом того что величина динамической скорости  $v_*$  может быть определена как

$$v_* = v \sqrt{\frac{\lambda}{8}}, \text{ м/с}, \quad (6)$$

формула (5) может быть представлена в виде

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{\text{квт}}}} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left( 5,756 \lg \frac{r_o}{\Delta} + 4,75 \right) = 2,035 \lg \frac{r_o}{\Delta} + 1,68. \quad (7)$$

Подставив в формулу (7) значение  $r_o = 0,5d$ , можно получить:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{\lambda_{\text{квт}}}} &= 2,035 \lg \frac{0,5d}{\Delta} + 1,68 = 2,035 \left( \lg \frac{d}{\Delta} + \lg 0,5 \right) + 1,68 = \\ &= 2,035 \lg \frac{d}{\Delta} + 1,07 = 2,035 \lg \frac{d}{\Delta} + 2,035 \lg 3,36 = 2 \lg 3,36 \frac{d}{\Delta}. \end{aligned} \quad (8)$$

Откуда

$$\lambda_{\text{квт}} = \frac{0,25}{\left( \lg 3,36 \frac{d}{\Delta} \right)^2}. \quad (9)$$

Индекс «квт» в формуле (9) означает *теоретическая формула, действующая в квадратичной области сопротивления*.

В экспериментах Никурадзе была получена эмпирическая формула для определения величины коэффициента гидравлического трения для труб с искусственной равнозернистой шероховатостью, работающих в области развитой турбулентности (квадратичной области сопротивления):

$$\lambda_{\text{кв}} = \frac{0,25}{\left( \lg 3,7 \frac{d}{\Delta} \right)^2} = \text{const}. \quad (10)$$

Сопоставление формул (9) и (10) показывает, что  $\lambda_{\text{квт}} \approx \lambda_{\text{кв}}$ .

Поверхность технологических трубопроводов имеет структуру шероховатости, существенным образом отличающуюся от структуры искусственной шероховатости. Выступы поверхности с естественной шероховатостью в отличие от выступов искусственной шероховатости имеют различную высоту, отличаются по форме и нерегулярно распределены по поверхности. Для оценки величины технической (разнозернистой) шероховатости было введено понятие относительной эквивалентной шероховатости  $\frac{\Delta_3}{d}$ . Величину относительной эквивалентной шероховатости  $\frac{\Delta_3}{d}$  определяют путем подстановки в формулу (10) экспериментально найденного значения  $\lambda_{\text{кв}}$ .

При проведении экспериментальных исследований И.Никурадзе опирался на теоретические представления Л.Прандля, в соответствии с которыми считается, что в процессе движения жидкости при числе Рейнольдса меньше единицы возникает режим «ползущего течения» и величина местной скорости потока жидкости  $u_y$  изменяется по линейному закону, а градиент скорости имеет постоянное значение [3]:

$$G_* = \frac{u_y}{y} = \text{const}, \text{ с}^{-1}. \quad (11)$$

В пристеночной области потока жидкости имеется подслоя жидкости толщиной  $\delta_*$ , который движется в режиме «ползущего течения» и на верхней границе которого

величина местной скорости достигает значения  $u_{\delta^*}$ , а величина локального критерия Рейнольдса  $Re_{\delta^*}$  равняется единице:

$$Re_{\delta^*} = \frac{\delta^* u_{\delta^*}}{\nu_*} = 1. \quad (12)$$

Величина касательного напряжения силы вязкого трения  $\tau_*$  в этом пристеночном вязком подслое будет иметь значение

$$\tau_* = \rho \nu_*^2 = \rho \nu_* \frac{u_{\delta^*}}{\delta^*} = \rho \nu_* G_*, \text{ Н/м}^2, \quad (13)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Символ \* означает здесь и далее, что рассматриваемая характеристика потока жидкости принадлежит к движущемуся вязкому подслою, прилегающему к твердой поверхности.

Из (13) можно записать

$$\nu_*^2 = \nu_* \frac{u_{\delta^*}}{\delta^*}, \text{ м}^2/\text{с}^2, \quad (14)$$

откуда

$$\frac{u_{\delta^*}}{\nu_*} = \frac{\nu_* \delta^*}{\nu_*}. \quad (15)$$

Комплекс (15) является безразмерным, имеет структуру, аналогичную структуре локального числа Рейнольдса (12), в связи с чем было высказано предположение о том, что этот комплекс характеризует режим течения жидкости в критической точке перехода турбулентного режима в область вполне шероховатого трения (область автомодельности закона гидравлического сопротивления) и сохраняет постоянное значение для труб с различной относительной шероховатостью  $\left(\frac{\Delta}{d}\right)$ .

Экспериментальные исследования показали, что переход турбулентного режима течения жидкости в трубах круглого сечения в область развитой турбулентности наблюдается при критическом значении числа Рейнольдса  $Re_{кр}$ , при котором величина комплекса (15) колеблется в незначительных пределах возле значения, которое было названо числом Никурадзе  $N \approx 11,6$  [2].

$$N = \frac{u_{\delta^*}}{\nu_*} = \frac{\nu_* \delta^*}{\nu_*} \approx 11,6. \quad (16)$$

В работе [4] представлено уточненное значение числа Никурадзе  $N \approx 11,314$ .

И. Никурадзе и Л. Прандлем было высказано предположение о том, что для труб круглого сечения в критической точке турбулентного режима течения жидкости толщина вязкого пристеночного подслоя  $\delta^*$  равна половине величины шероховатости:

$$\delta_{*кр} = \frac{1}{2} \Delta, \text{ м}. \quad (17)$$

Из (16) с учетом (6) может быть получена формула для определения величины относительной толщины вязкого пристеночного подслоя в критической точке турбулентного режима  $\frac{\delta_{*кр}}{\Delta}$ :

$$\frac{\delta_{*кр}}{d} = \frac{1}{d} \frac{u_{\delta^*}}{\nu_{*кр}} \frac{\nu_*}{\nu_{*кр}} = \frac{N}{d} \frac{\nu_*}{\nu_{*кр} \sqrt{\frac{\lambda_{*кр}}{8}}} = \frac{\nu_*}{d \nu_{*кр}} \frac{N \sqrt{8}}{\sqrt{\lambda_{*кр}}} = \frac{N \sqrt{8}}{Re_{*кр} \sqrt{\lambda_{*кр}}} = \frac{32}{Re_{*кр} \sqrt{\lambda_{*кр}}} \quad (18)$$

$$\text{и} \quad \frac{\delta_{*кт}}{\Delta} = \frac{\delta_{*кт}}{d} \frac{d}{\Delta} = \frac{N\sqrt{8}}{\text{Re}_{кт} \sqrt{\lambda_{кт}}} \frac{d}{\Delta} = \frac{32}{\text{Re}_{кт} \sqrt{\lambda_{кт}}} \frac{d}{\Delta}. \quad (19)$$

С учетом (17) из (18) могут быть получены формулы для определения величин относительной шероховатости  $\frac{\Delta}{d}$  и гладкости  $\frac{d}{\Delta}$  трубы в критической точке турбулентного режима:

$$\frac{\Delta}{d} = \frac{2\delta_{*кт}}{d} = \frac{2N\sqrt{8}}{\text{Re}_{кт} \sqrt{\lambda_{кт}}} = \frac{64}{\text{Re}_{кт} \sqrt{\lambda_{кт}}}, \quad (20)$$

$$\frac{d}{\Delta} = \frac{d}{2\delta_{*кт}} = \frac{\text{Re}_{кт} \sqrt{\lambda_{кт}}}{2N\sqrt{8}} = \frac{\text{Re}_{кт} \sqrt{\lambda_{кт}}}{64}. \quad (21)$$

В работе [2] представлена формула (22), имеющая вид, аналогичный виду формулы (18), но при этом автором было сделано допущение, в соответствии с которым условие (17) выполняется не только в критической точке турбулентного режима, но и во всех его точках, вследствие чего формула (22) должна адекватно описывать как переходную область турбулентного течения жидкости, так и область развитой турбулентности:

$$\frac{\delta_*}{d} = \frac{N\sqrt{8}}{\text{Re}\sqrt{\lambda}}. \quad (22)$$

В соответствии с рекомендациями, приведенными в [2], в формуле (22) принимается значение величины критерия Никурадзе  $N=10,6$ .

По нашему мнению, вывод об универсальности формулы (22) недостаточно обоснован.

Формула (13) может быть представлена в виде

$$G_* = \frac{v_*^2}{v_*} = \frac{u_{\delta_*}}{\delta_*}, \text{ с}^{-1}, \quad (23)$$

откуда

$$\delta_* = \frac{u_{\delta_*}}{v_*} \frac{v_*}{v_*}, \text{ м}. \quad (24)$$

Исходя из общепринятых представлений теории турбулентного течения жидкости, разработанной Т. Карманом и Л. Прандтлем, было принято допущение о том, что величина коэффициента кинематической вязкости в пристеночном подслое равна значению этого показателя в ядре потока  $\nu_* = \nu$ , а величина местной скорости на границе пристеночного подслоя превышает значение динамической скорости в  $N$  раз и  $N$  имеет постоянную величину при всех значениях  $\text{Re}_m$  ( $u_{\delta_*} = N\nu_*$ ).

В этом случае формула (24) примет вид

$$\delta_* = N \frac{\nu}{v_*}, \text{ м}. \quad (25)$$

При анализе формулы (24) может быть сделано и другое допущение, в соответствии с которым можно предположить, что скорость на границе пристеночного подслоя равна величине динамической скорости  $u_{\delta_*} = v_*$ , а величина коэффициента кинематической вязкости в пристеночном подслое превышает значение этого показателя в ядре потока в  $\alpha$  раз ( $\nu_* = \alpha\nu$ ).

Величина коэффициента  $\alpha$  в отличие от критерия Никурадзе не имеет постоянного значения, а определяется величинами коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  и критерия Рейнольдса  $Re$  ( $\alpha = f(\lambda, Re)$ ). В этом случае формула (24) примет вид

$$\delta_* = \frac{\alpha v}{v_*}, \text{ м.} \quad (26)$$

Имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные, полученные в ходе исследований структуры турбулентного потока жидкости вблизи стенки трубы, показывают, что гипотеза Л. Прандтля о том, что турбулентные пульсации в пристеночном (ламинарном, по терминологии Л. Прандтля) подслое отсутствуют, некорректна. В реальности наблюдаются значительные пульсации толщины этого подслоя  $\delta_*$  и величины критерия Никурадзе  $N$  изменяются во времени от 2,3 до 18, при этом осредненное за достаточно большой промежуток времени его значение сохраняет постоянную величину [2]. В связи с этим следует учитывать, что представления о пристеночном подслое, описываемые как формулой (25), так и формулой (26) являются лишь идеализированными расчетными схемами, не учитывающими эффекта турбулизации пристеночного подслоя, но позволяющими корректно описывать распределение величин местных скоростей по текущему радиусу  $r$  сечения ядра осесимметричного турбулентного потока жидкости.

В работе [5] Ж. Бусинеском было высказано предположение о том, что по аналогии с законом вязкости И. Ньютона можно выражать касательное напряжение в ядре потока, обусловленное турбулентными пульсациями скорости в точке потока  $\tau_T = -\rho \overline{u'_x u'_y}$ , через динамический  $\mu_T$  или кинематический  $\nu_T$  коэффициент турбу-

лентной вязкости ( $-\rho \overline{u'_x u'_y} = \mu_T \frac{d\bar{u}}{dy} = \rho \nu_T \frac{d\bar{u}}{dy}$ ).

$$\tau_{\Pi} = \tau_B + \tau_T = (\mu + \mu_T) \frac{du}{dy} = (\nu + \nu_T) \frac{du}{dy}, \text{ Н/м}^2. \quad (27)$$

Поскольку турбулентные пульсации скорости наблюдаются как в ядре потока, так и в пристеночном подслое, то формула (27) также будет корректно описывать и пристеночный подслой, и для него будет справедливо следующее равенство

$$v_* = \nu + \nu_T = \alpha v, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (28)$$

откуда с учетом (23) может быть получено уравнение

$$G_* = \frac{v_*^2}{\nu + \nu_T} = \frac{v_*^2}{\alpha v}, \text{ с}^{-1}. \quad (29)$$

Величина градиента скорости на расстоянии  $r$  от оси потока может быть определена по формуле

$$G_r = G_* \frac{r}{r_o}, \text{ с}^{-1}. \quad (30)$$

Формулу для определения величины градиента скорости на расстоянии  $r$  от оси ламинарного потока жидкости в трубе круглого сечения можно получить дифференцированием уравнения Стокса:

$$u_r = 2v \left[ 1 - \frac{r^2}{r_o^2} \right], \text{ м/с}, \quad (31)$$

$$G_r = -\frac{du}{dr} = \frac{4vr}{r_o^2} = \frac{4v}{r_o} \frac{r}{r_o}, \text{ с}^{-1}. \quad (32)$$

Сопоставление формул (30) и (32) показывает, что величина градиента скорости в пристеночной области осесимметричного ламинарного потока жидкости определяется уравнением

$$G_* = \frac{4v}{r_o} = \frac{2v}{R}, \text{ с}^{-1}. \quad (33)$$

В формуле (33) в отличие от формулы (29) присутствуют лишь кинематические характеристики потока – средняя скорость  $v$  и линейный размер поперечного сечения  $r_o$  или  $R$  – и не используется динамическая характеристика – скорость касательного напряжения силы вязкого трения (динамическая скорость  $v_*$ ), в связи с чем формула (33) имеет универсальный характер и может быть использована для описания как ламинарного, так и турбулентного потока жидкости.

При описании ламинарного потока жидкости в формуле (29) величина коэффициента  $\alpha$  принимается равной единице. При описании турбулентного потока жидкости  $\alpha \neq 1$ .

Из формулы (23) с учетом того, что  $u_{\delta_*} = v_*$ , и формулы (6) может быть получена формула для определения толщины пристеночного подслоя жидкости:

$$\delta_* = \frac{u_{\delta_*}}{G_*} = \frac{v_*}{2v} R = \frac{v \sqrt{\lambda}}{2v} R = R \sqrt{\frac{\lambda}{32}} = \frac{r_o}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{32}}, \text{ м}. \quad (34)$$

Из уравнения (21) нами были получены формулы для определения критерия Рейнольдса  $Re_{кт}$  и коэффициента гидравлического трения  $\lambda_{кт}$  в критической точке перехода турбулентного режима течения в область развитой турбулентности:

$$Re_{кт} = \frac{64}{\sqrt{\lambda_{кт}}} \frac{d}{\Delta} = \frac{64}{0,5} \frac{d}{\Delta} \lg \left( 3,7 \frac{d}{\Delta} \right) = N^2 \frac{d}{\Delta} \lg \left( 3,7 \frac{d}{\Delta} \right), \quad (35)$$

$$\lambda_{кт} = \left( \frac{64}{Re_{кт}} \frac{d}{\Delta} \right)^2 = \left( \frac{64}{Re_{\Delta кт}} \right)^2 = \left( \frac{2N\sqrt{8}}{Re_{кт}} \frac{d}{\Delta} \right)^2, \quad (36)$$

где  $Re_{\Delta кт}$  – модифицированный критерий Рейнольдса, где в качестве линейного размера принята средняя величина выступов шероховатости стенки трубы.

Формулу (36) можно представить в виде

$$\lambda_{кт} = \frac{64}{Re_{кт}} \sqrt{\lambda_{кт}} \frac{d}{\Delta} = \frac{64}{Re_{кт}} \alpha_{кт}, \quad (37)$$

откуда

$$\alpha_{кт} = \sqrt{\lambda_{кт}} \frac{d}{\Delta}, \quad (38)$$

где  $\alpha_{кт}$  – коэффициент, учитывающий увеличение значения величины коэффициента гидравлического трения  $\lambda_t$ , рассчитанного по формуле ламинарного режима течения жидкости в критической точке турбулентного режима.

Во всех точках турбулентных режимов движения осесимметричных потоков жидкости будут выполняться равенства

$$\lambda_t = \frac{64}{Re_t} \alpha, \quad (39)$$

$$\alpha = \frac{Re_t \lambda_t}{64}. \quad (40)$$

Из уравнения (38) с учетом (34) может быть получена формула

$$\alpha_{\text{КТ}} = \sqrt{\lambda_{\text{КТ}}} \frac{d}{\Delta} = \frac{4R}{4R} \sqrt{\lambda_{\text{КТ}}} \frac{d}{\Delta} = \frac{4R}{\Delta} \sqrt{\lambda_{\text{КТ}}} \sqrt{\frac{32}{32}} = 4\sqrt{32} \frac{\delta_{*\text{КТ}}}{\Delta} = 2N \frac{\delta_{*\text{КТ}}}{\Delta}. \quad (41)$$

С учетом формулы (34) могут быть получены уравнения для определения относительной толщины пристеночного подслоя:

$$\frac{\delta_*}{d} = \frac{1}{d} \frac{d}{4} \sqrt{\frac{\lambda}{32}} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\lambda}{32}} = \frac{\sqrt{\lambda}}{2N}, \quad (42)$$

$$\frac{\delta_*}{\Delta} = \frac{\delta_*}{\Delta} \frac{d}{\Delta} = \frac{\sqrt{\lambda}}{2N} \frac{d}{\Delta}. \quad (43)$$

Уравнения (42) и (43) могут быть использованы для описания как ламинарного режима движения жидкости, так и турбулентных режимов движения жидкости.

Из уравнений (42) и (43) с учетом (10) могут быть получены уравнения для описания движения потока жидкости в критической точке турбулентного режима.

$$\frac{\delta_{*\text{КТ}}}{d} = \frac{\sqrt{\lambda_{\text{КТ}}}}{2N} = \frac{0,5}{2N \lg\left(3,7 \frac{d}{\Delta}\right)} = \frac{0,25}{N \lg\left(3,7 \frac{d}{\Delta}\right)}, \quad (44)$$

$$\frac{\delta_{*\text{КТ}}}{\Delta} = \frac{\sqrt{\lambda_{\text{КТ}}}}{2N} \frac{d}{\Delta} = \frac{0,25}{N \lg\left(3,7 \frac{d}{\Delta}\right)} \frac{d}{\Delta}. \quad (45)$$

Из уравнения (22) по аналогии с формулой (45) получаем:

$$\frac{\delta_{*\text{КТ}}}{\Delta} = \frac{N\sqrt{8}}{\text{Re}_{\text{КТ}} \sqrt{\lambda_{\text{КТ}}}} \frac{d}{\Delta}. \quad (46)$$

В нижней критической точке при  $\text{Re}_{\text{НКЛ}}=2048$  перехода ламинарного режима в турбулентный будет выполняться равенство (39), и при  $\alpha=1$  можно записать

$$\frac{\delta_{*\text{ВКЛ}}}{d} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{ВКЛ}}}{32}} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{64}{32 \text{Re}_{\text{ВКЛ}}}} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{64}{32 \cdot 2312}} = \frac{1}{4} \frac{8}{272} = \frac{8}{32 \cdot 34} = \frac{1}{2 \cdot 68} = \frac{1}{136}, \quad (47)$$

$$\frac{\delta_{*\text{НКЛ}}}{d} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{НКЛ}}}{32}} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{64}{32 \text{Re}_{\text{НКЛ}}}} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{64}{32 \cdot 2648}} = \frac{1}{4} \frac{8}{256} = \frac{8}{32^2} = \frac{1}{2 \cdot 64} = \frac{1}{128} = \frac{1}{N^2}. \quad (48)$$

Величина относительного критического числа Рейнольдса  $\overline{\text{Re}}$  с учетом (10) вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} \overline{\text{Re}} &= \frac{\text{Re}_{\text{КТ}}}{\text{Re}_{\text{НКЛ}}} = \frac{64}{\sqrt{\lambda_{\text{КТ}}}} \frac{d}{\Delta} \frac{1}{\text{Re}_{\text{НКЛ}}} = \frac{2N\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda_{\text{КТ}}}} \frac{d}{\Delta} \frac{1}{16N^2} = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{4N} \frac{\lg\left(3,7 \frac{d}{\Delta}\right)}{0,5} \frac{d}{\Delta} = \frac{\sqrt{2} \lg\left(3,7 \frac{d}{\Delta}\right)}{2N} \frac{d}{\Delta}. \end{aligned} \quad (49)$$

Величина относительной критической толщины пристеночного подслоя  $\frac{\delta_{*кт}}{\delta_{*нкл}}$  с

учетом (10) определяется по формуле

$$\frac{\delta_{*кт}}{\delta_{*нкл}} = \sqrt{\frac{\lambda_{кт}}{\lambda_{нкл}}} = \frac{\delta_{*кт}}{d} \frac{d}{\delta_{*нкл}} = \frac{\sqrt{\lambda_{кт}}}{2N} N^2 = \frac{N\sqrt{\lambda_{кт}}}{2} = \frac{0,5N}{2 \lg\left(3,7 \frac{d}{\Delta}\right)} = \frac{2\sqrt{2}}{\lg\left(3,7 \frac{d}{\Delta}\right)}. \quad (50)$$

Величина относительной критической толщины пристеночного подслоя  $\frac{\delta_{*нкл}}{\Delta}$  рассчитывается по формуле

$$\frac{\delta_{*нкл}}{\Delta} = \frac{\delta_{*нкл}}{d} \frac{d}{\Delta} = \frac{1}{N^2} \frac{d}{\Delta}. \quad (51)$$

Из формулы (12) с учетом того, что  $u_{\delta^*} = v^*$  и  $v^* = \alpha v$ , а также с учетом (6) и (34) получаем уравнение

$$\alpha = \frac{\delta_{*v^*}}{v} = \frac{d}{4} \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{32} v} \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{8}} = \frac{d v \lambda}{v 64} = \frac{\lambda \text{Re}}{64} = \frac{\lambda \text{Re}}{2N\sqrt{8}}. \quad (52)$$

Сопоставление формул (39) и (52) позволяет сделать вывод о том, что коэффициент  $\alpha$  показывает, не только во сколько раз увеличивается значение коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  при переходе в турбулентный режим движения жидкости, но и во сколько раз при этом повышается значение коэффициента кинематической вязкости  $v^* = \alpha v$  в пристеночном подслое за счет появления в нем компонентов пульсационной скорости  $u'_x$ ;  $u'_y$ .

В критической точке турбулентного режима будет выполняться равенство

$$\alpha_{к} = \sqrt{\lambda_{кт}} \frac{d}{\Delta} = 2N \frac{\delta_{*кт}}{\Delta} = \frac{0,5}{\lg\left(3,7 \frac{d}{\Delta}\right)}. \quad (53)$$

В табл. 1 представлены значения следующих гидродинамических характеристик осесимметричного потока жидкости в критической точке перехода турбулентного течения в область автомодельности режима гидравлического сопротивления: коэффициентов гидравлического трения  $\lambda_{кт}$ , вычисленных по формуле (9); критических чисел Рейнольдса  $\text{Re}_{кт}$ , определенных по формуле (35); относительных критических чисел Рейнольдса  $\overline{\text{Re}}_{кт}$ , найденных по формуле (49); коэффициентов  $\alpha_{к}$ , рассчитанных по формуле (53); относительных толщин пристеночного подслоя:  $\frac{\delta_{*кт}}{\delta_{*нкл}}$ , вычисленных по

формуле (50);  $\frac{\delta_{*кт}}{d}$ , определенных по формуле (44);  $\frac{\delta_{*кт}}{\Delta}$ , найденных по формуле (45);

$\frac{\delta_{*кт}}{d}$ , вычисленных по формуле (22) при  $N=11,314$ ;  $\frac{\delta_{*кт}}{\Delta}$ , рассчитанных по формуле

(46) при  $N=11,314$ ;  $\frac{\delta_{*нкл}}{\Delta}$ , определенных по формуле (51).

Гидродинамические характеристики осесимметричного потока жидкости в критических точках перехода турбулентного течения в область автомодельного режима гидравлического сопротивления, рассчитанные с учетом формулы (9)

Гидродинамические характеристики	Значения гидродинамических характеристик									
	51,6	100	150	182	300	500	1000	3000	5000	10000
$\frac{d}{\Delta}$	51,6	100	150	182	300	500	1000	3000	5000	10000
$\lambda_{кт}$ , вычисленные по формуле (9)	0,04806	0,03790	0,03320	0,03125	0,02696	0,02342	0,01964	0,01528	0,01373	0,01198
$Re_{кт}$ , вычисленные по формуле (35)	15065	32873	52690	65888	116940	209099	456730	155340	2730990	5847298
$\overline{Re}_{кт}$ , вычисленные по формуле (49)	7,356	16,051	25,728	32,172	57,100	102,099	223,013	758,498	1333,491	2855,126
$\frac{\delta_{*кт}}{\delta_{*нкл}}$ , вычисленные по формуле (50)	1,240	1,101	1,031	1,000	0,929	0,866	0,793	0,699	0,663	0,619
$\frac{\delta_{*кт}}{d} 10^{-3}$ , вычисленные по формуле (44)	9,688	8,604	8,052	7,813	7,256	6,763	6,193	5,462	5,178	4,837
$\frac{\delta_{*кт}}{d} 10^{-3}$ , вычисленные по формуле (22) при $N=11,314$	9,689	5,000	3,333	2,747	1,667	1,000	0,500	0,167	0,100	0,050
$\frac{\delta_{*кт}}{\Delta}$ , вычисленные по формуле (45)	0,500	0,860	1,208	1,422	2,177	3,382	6,193	16,387	25,892	48,372
$\frac{\delta_{*кт}}{\Delta}$ , вычисленные по формуле (46) при $N=11,314$	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
$\frac{\delta_{*нкл}}{\Delta}$ , вычисленные по формуле (51)	0,403	0,781	1,171	1,422	2,344	3,906	7,813	23,438	39,063	78,125
$\alpha_k$ , вычисленные по формуле (53)	11,312	19,469	27,329	32,175	49,256	76,519	140,127	370,799	585,868	1094,523

При замене эмпирической зависимости (10) на теоретическую формулу (9), которая может быть представлена в виде

$$\lambda_{км} = \frac{0,25}{\left[ \lg \left( \sqrt{N} \frac{d}{\Delta} \right) \right]^2} = \frac{2\sqrt{2}}{N \left[ \lg \left( \sqrt{N} \frac{d}{\Delta} \right) \right]^2}, \quad (54)$$

формулы (35); (44); (45); (49); (50); (53) будут иметь вид:

$$\text{Re}_{кт} = \frac{2N\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda_{кт}}} \frac{d}{\Delta} = N^2 \frac{d}{\Delta} \lg \left( \sqrt{N} \frac{d}{\Delta} \right)^2, \quad (55)$$

$$\frac{\delta_{*кт}}{d} = \frac{\sqrt{\lambda_{кт}}}{2N} = \frac{2\sqrt{2}}{N^2 \lg \left( \sqrt{N} \frac{d}{\Delta} \right)}, \quad (56)$$

$$\frac{\delta_{*кт}}{\Delta} = \frac{\sqrt{\lambda_{кт}}}{2N} \frac{d}{\Delta} = \frac{2\sqrt{2}}{N^2 \lg \left( \sqrt{N} \frac{d}{\Delta} \right)}, \quad (57)$$

$$\overline{\text{Re}}_{кт} = \frac{\sqrt{2}}{4N\sqrt{\lambda_{кт}}} \frac{d}{\Delta} = \frac{\sqrt{2} \lg \left( \sqrt{N} \frac{d}{\Delta} \right)}{2N}, \quad (58)$$

$$\frac{\delta_{*кт}}{\delta_{*нкл}} = \frac{N\sqrt{\lambda_{кт}}}{2} = \frac{2\sqrt{2}}{\lg \left( \sqrt{N} \frac{d}{\Delta} \right)}, \quad (59)$$

$$\alpha_{к} = \sqrt{\lambda_{кт}} \frac{d}{\Delta} = 2N \frac{\delta_{*}}{\Delta} = \frac{4\sqrt{2}}{N \lg \left( \sqrt{N} \frac{d}{\Delta} \right)}. \quad (60)$$

В табл. 2 представлены значения следующих гидродинамических характеристик осесимметричного потока жидкости в критической точке перехода турбулентного течения в область автомодельности режима гидравлического сопротивления: коэффициентов гидравлического трения  $\lambda_{кт}$ , вычисленных по формуле (54); критических чисел Рейнольдса  $\text{Re}_{кт}$ , найденных по формуле (55); относительных критических чисел Рейнольдса  $\overline{\text{Re}}_{кт}$ , определенных по формуле (58); коэффициентов  $\alpha_{к}$ , рассчитанных по формуле (60); относительных толщин пристеночного подслоя:  $\frac{\delta_{*кт}}{\delta_{*нкл}}$ , вычисленных

по формуле (59);  $\frac{\delta_{*кт}}{d}$ , найденных по формуле (56);  $\frac{\delta_{*}}{\Delta}$ , определенных по формуле (57).

Формула (54) может быть представлена в виде

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{кт}}} = \frac{\lg \left( 3,364 \frac{d}{\Delta} \right)}{0,5} = 2 \lg \frac{d}{\Delta} + 2 \lg 3,364 = 2 \lg \frac{d}{\Delta} + 1,054. \quad (61)$$

Гидродинамические характеристики осесимметричного потока жидкости в критических точках перехода турбулентного течения в область автомодельного режима гидравлического сопротивления, рассчитанные с учетом формулы (54)

Гидродинамические характеристики	Значения гидродинамических характеристик									
	51,6	100	150	182	300	500	1000	3000	5000	10000
$\frac{d}{\Delta}$	51,6	100	150	182	300	500	1000	3000	5000	10000
$\lambda_{кт}$ , вычисленные по формуле (54)	0,04985	0,03916	0,03422	0,03219	0,02771	0,02403	0,02010	0,01559	0,01400	0,01220
$Re_{кт}$ , вычисленные по формуле (55)	14791	32343	51896	64923	115351	206449	451431	1537507	2704494	5794307
$\overline{Re}_{кт}$ , вычисленные по формуле (58)	7,222	15,793	25,340	31,701	56,324	100,805	220,425	750,736	1320,554	2829,252
$\frac{\delta_{*кт}}{\delta_{*нкл}}$ , вычисленные по формуле (59)	1,263	1,119	1,0464	1,015	0,942	0,877	0,802	0,705	0,669	0,625
$\frac{\delta_{*кт}}{d} 10^{-3}$ , вычисленные по формуле (56)	9,867	8,745	8,175	7,929	7,356	6,850	6,266	5,519	5,229	4,881
$\frac{\delta_{*кт}}{\Delta}$ , вычисленные по формуле (57)	0,509	0,875	1,226	1,443	2,207	3,425	6,266	16,557	26,146	48,814
$\alpha_{к}$ , вычисленные по формуле (60)	11,521	19,782	27,748	32,653	49,935	77,501	141,772	374,633	591,608	1104,532

Откуда

$$\frac{v}{v_*} = \frac{v}{v_* \sqrt{\frac{\lambda_{кт}}{8}}} = \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda_{кт}}} = \sqrt{8} \left[ 2 \lg \left( \frac{d}{\Delta} \right) + 1,054 \right] =$$

$$= 2,5 \ln \left( \frac{r_o}{\Delta} \right) + 2,5 \ln 2 + 2,98 = \frac{1}{\chi} \ln \left( \frac{r_o}{\Delta} \right) + 4,71. \quad (62)$$

С учетом (5) формула (62) может быть записана в виде

$$\frac{v}{v_*} = \frac{u_{\max}}{v_*} - D = \frac{1}{\chi} \ln \left( \frac{r_o}{\Delta} \right) + 4,71 = \frac{1}{\chi} \ln \left( \frac{r_o}{\Delta} \right) + \beta - D. \quad (63)$$

Из формулы (63) следует, что при  $D=3,75$  коэффициент  $\beta=8,46\approx 8,5$  и формула для определения величины относительной максимальной скорости осесимметричного потока жидкости на оси трубы в квадратичной области сопротивления примет вид

$$\frac{u_{\max}}{v_*} = \frac{1}{\chi} \ln \frac{r_o}{\Delta} + 8,46. \quad (64)$$

Формула для определения осредненного значения относительной местной скорости на расстоянии  $y$  от стенки трубы в области развитой турбулентности будет иметь вид

$$\frac{u_y}{v_*} = \frac{1}{\chi} \ln \frac{y}{\Delta} + 8,46. \quad (65)$$

Значения  $\frac{v}{v_*}$  и  $\frac{u_r}{v_*}$ , вычисленные по формулам (63) и (65), будут соответствовать друг другу на расстоянии  $y_{\text{ср}}=x r_o$  от стенки трубы до слоя, где осредненная местная скорость  $u_{\text{ср}}$  будет равна величине средней скорости потока жидкости  $v$  при условии

$$\frac{1}{\chi} \ln \left( \frac{r_o}{\Delta} \right) + \beta - D = \frac{1}{\chi} \ln \left( \frac{x r_o}{\Delta} \right) + \beta, \quad (66)$$

откуда

$$\ln x = -D\chi = -\frac{3}{2} = -1,5,$$

$$x=0,223; y_{\text{ср}}=0,223r_o.$$

В работе [6] также предлагается принимать величину  $y_{\text{ср}}=0,223r_o$ .

Проведенные теоретические исследования закономерностей изменения гидродинамических характеристик пристеночного подслоя в критической точке перехода в область квадратичного сопротивления показали, что:

1. Величины относительной толщины пристеночного подслоя  $\frac{\delta_{*_{\text{КТ}}}}{d}$  и  $\frac{\delta_{*_{\text{КТ}}}}{\Delta}$ , вычисленные по формулам (44) и (45) (при  $\frac{d}{\Delta} = \text{const}$ ) во всех точках турбулентного режима течения жидкости в области развитой турбулентности при  $Re_{\tau} > Re_{\text{КТ}}$ , имеют постоянные значения ( $\frac{\delta_{*_{\text{КТ}}}}{d} = \text{const}$ ;  $\frac{\delta_{*_{\text{КТ}}}}{\Delta} = \text{const}$ ).

2. Величины относительной толщины пристеночного подслоя  $\frac{\delta_{*_{\text{Г}}}}{d}$  и  $\frac{\delta_{*_{\text{Г}}}}{\Delta}$ , вычисленные по формулам (22) и (46) (при  $\frac{d}{\Delta} = \text{const}$ ) во всех точках турбулентного режима течения жидкости в области развитой турбулентности при  $Re_{\tau} > Re_{\text{КТ}}$ , бесконечно уменьшаются с ростом значения  $Re_{\tau}$ .

3. При относительной гладкости труб  $\frac{d}{\Delta} = 51,6$  число  $N$  и коэффициент  $\alpha$ , вычисленный по формуле (52), а также значения относительной толщины пристеночного подслоя  $\frac{\delta_{*_{\text{КТ}}}}{\Delta}$ , найденные по формулам (45) и (22), имеют равные величины ( $N=\alpha=11,31$ ;  $\frac{\delta_{*_{\text{КТ}}}}{\Delta} = 0,5$ ).

4. Использование понятия относительного дефицита средней скорости  $v$  от величины максимальной скорости  $u_{\max}$  на оси турбулентного потока (формула (4)) и логарифмического закона Кармана – Прандтля (формула (3)) позволяет получить теоретическую формулу (54) для определения величины коэффициента гидравлического трения  $\lambda_{\text{кт}} = \lambda_{\text{кв}} = \text{const}$  в области развитой турбулентности осесимметричного потока жидкости.

5. При значении величины относительной гладкости трубопровода  $\frac{d}{\Delta} = 51,6 - 10000$  относительная разность величин коэффициента  $\lambda_{\text{кт}}$ , вычисленных по теоретической формуле (54) и экспериментальной формуле Прандтля (10), изменяется в пределах 1,8-3,6 %.

7. При логарифмическом законе распределения осредненных величин местных скоростей течения  $u_r$  по текущему радиусу  $r$  осесимметричного турбулентного потока жидкости величина расстояния от стенки трубы до слоя, где  $u_r$  будет равна величине средней скорости  $v$ , имеет  $y_{\text{ср}} = 0,223r_0$ .

### Список литературы

1. Константинов, Н.М. Гидравлика, гидрология, гидрометрия. Ч. 1. Общие законы / Н.М. Константинов, Н.А. Петров, Л.И. Высоцкий. – М.: Высшая школа, 1987. – 304 с.
2. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика / Д.В. Штеренлихт. – М.: Энергоиздат, 1984. – 640 с.
3. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль: перевод со второго немецкого издания Г.А. Вольперта. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.
4. Андреев, С.Ю. Уточненная методика определения осредненных местных скоростей потока жидкости в гидравлически гладких и вполне шероховатых трубах / С.Ю. Андреев, М.И. Яхкин, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1 (38). – С. 193–202.
5. Boussinesq, M.J. Theorie de iecoulement tourbillonnant et tumultueux des liquids dans les lits rectilignes a grande section / M.J. Boussinesq. – Paris: Gauthiez – Villarsers Fils, 1897. – 64 p.
6. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика (основы механики жидкости) / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев. – М.: Стройиздат, 1964. – 273 с.

### References

1. Konstantinov, N.M. Hydraulics, hydrology, hydrometry. P.1. General laws / N.M. Konstantinov, N.A. Petrov, L.I. Vysotsky. – M.: Higher school, 1987. – 304 p.
2. Shterenlicht, D.V. Hydraulics / D. V. Shterenlicht. – M.: Energoizdat, 1984. – 640 p.
3. Prandtl, L. The Mechanics / L. Prandtl; Translated from the second German edition by G. A. Volpert. – Izhevsk: SIC «Regular and chaotic dynamics», 2000. – 576 p.
4. Andreev, S.Yu. Refined method for determining averaged local fluid flow rates in hydraulically smooth and quite rough pipes / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, V.A. Knyazev // Regional architecture and construction. – 2019. – N. 1 (38). – P. 193–202.
5. Boussinesq, M.J. Theorie de iecoulement tourbillonnant et tumultueux des liquids dans les lits rectilignes a grande section / M.J. Boussinesq. – Paris: Gauthiez – Villarsers Fils, 1897. – 64 p.
6. Altshul, A.D. Hydraulics and aerodynamics (fundamentals of fluid mechanics) / A.D. Altshul, P.G. Kiselev. – M.: Stroizdat, 1964. – 273 p.

УДК 519.7:69

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

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

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

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

**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

## ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

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

Определяются состояние и перспективы реализации системного подхода при решении экстремальных задач, прокладки систем тепло-, газо- и водоснабжения, трассировки дорог, диагностики отказов, экспертизы зданий и сооружений, оптимизации свойств материалов и др. Решены оптимизационные задачи с кусочно-линейной аппроксимацией целевой сепарабельной функции и ограничений. Это позволило заменить задачу нелинейного программирования приближенной линейной (легко решалась симплекс-методом). Отмечается эффективность градиентных методов Франка-Вулфа и штрафных функций. Качество системы рассматривается как ее объективная характеристика и представляет собой совокупность свойств системы и их синергизм. Под управлением качеством системы понимаются действия, направленные на установление, обеспечение и поддержание необходимого уровня качества, а под контролем качества – процедура оценивания соответствия системы требованиям путем наблюдения, измерения, испытания или калибровки. Качество системы определяется ее свойствами. Строительный материал рассматривается как целостная система, что при анализе ее частей дает возможность воспользоваться методами, позволяющими их агрегирование в систему. Указывается реализация приведенных методологических принципов при многокритериальном синтезе (из условий прочности, плотности, пористости) сверхтяжелых бетонов.

*Ключевые слова: строительство, системный подход, методологические принципы, реализация, эффективность*

## PROBLEMS OF SYSTEM APPROACH IMPLEMENTATION IN CONSTRUCTION INDUSTRY

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

The state and prospects of the implementation of a systematic approach are determined when solving extreme problems, laying heat, gas and water supply systems, tracing roads, diagnosing failures, examining buildings and structures, optimizing material properties, etc. Optimization problems with piecewise linear approximation of the target separable function and restrictions are solved. This made it possible to replace the problem of nonlinear programming with an approximate linear one (it was easily solved by the simplex method). The efficiency of Frank-Wolfe gradient methods and penalty functions is noted. The quality of the system is considered as its objective characteristic and is a set of properties of the system and their synergy. System quality management refers to actions aimed at establishing, ensuring and maintaining the required level of quality, and quality control refers to the procedure for assessing the conformity of a system to requirements by observation, measurement, testing or calibration. The quality of a system is determined by its properties. The building material is considered as an integral system which, when analyzing its parts, makes it possible to use methods that allow their aggregation into a system. The implementation of the above methodological principles in multicriteria synthesis (from the conditions of strength, density, porosity) of superheavy concretes is indicated.

*Keywords: construction, systems approach, methodological principles, implementation, efficiency*

Исследование явлений реальной действительности начинается с наблюдения изучаемых явлений и когнитивного моделирования [1]. Далее для увязывания наблюдаемых результатов путем умозрительного описания и объяснения рассматриваемых процессов и явлений разрабатывается теория. Впоследствии теории могут развиваться и без обращения к наблюдениям и позволят предсказать, что произойдет под влиянием различных условий. Затем теоретические выводы должны проверяться путем новых наблюдений исследуемых процессов и явлений. При согласованности теоретических выводов с данными, полученными в результате наблюдений, уверенность в правильности теории возрастает. В противном случае ее следует признать несостоятельной или продолжить совершенствовать. Наибольшими возможностями обладает математическое моделирование: оно позволяет исследовать процессы с различным физическим содержанием, но описываемые одинаковыми математическими соотношениями. Сложность и многообразие процессов функционирования реальных систем дают возможность при моделировании охватить только основные, характерные закономерности. Как правило, практически невозможно указать формальные правила для выбора характеристик состояний и параметров исследуемых реальных систем; исследователь вынужден руководствоваться лишь собственной интуицией.

При *решении экстремальных задач* (определение состава композиционного материала, обеспечивающего оптимальные характеристики; управление трудовыми ресурсами и запасами, оптимальное размещение объектов, составление календарных планов, выбор наилучших проектных решений и т.д.) для описания аналитическими зависимостями функций отклика (параметры оптимизации) эффективно используются методы математического планирования эксперимента. Важную роль математические модели играют и при *решении задач прокладки систем тепло-, газо- и водоснабжения, трассировки дорог* (в основном используются математическое программирование, теория графов и др.). При *решении задач диагностики отказов, экспертизы зданий и сооружений* широко используются как детерминированные, так и стохастические модели.

При *оптимизации свойств материалов* наиболее перспективными на сегодня остаются методы математического планирования эксперимента. К сожалению, получаемые при этом регрессионные модели редко и не в полной мере используются при прогнозировании их структуры и свойств. Неплохие результаты были получены при *решении ряда оптимизационных задач с кусочно-линейной аппроксимацией целевой сепарабельной функции и ограничений задачи*. Это позволило заменить задачу нелинейного программирования приближенной линейной (последняя легко решается

симплекс-методом). При решении многих задач строительного материаловедения наиболее эффективными оказались градиентные методы Франка-Вулфа и штрафных функций [2, 3].

Имеется и положительный опыт определения на основе математического моделирования параметров управляющих воздействий человека-оператора по данным нормальной эксплуатации и их связи с техническими характеристиками объекта. Это позволило установить *необходимую степень точности имитационных характеристик обучающего комплекса из условия формирования требуемого стиля управления* (на основе сравнения параметров систем: «оператор – имитатор», «оператор – реальный объект») [4, 5]. Правда, не удалось избежать кропотливого освоения, развития и применения современных математических методов для постановки этой сложной прикладной задачи.

В широком смысле *качество* рассматриваемой системы как ее объективная характеристика представляет собой *совокупность свойств системы и их синергизм*. Оно оценивается по отношению к качествам других аналогичных однородных систем или эталонной системы. Здесь, как правило, требуется пошаговая корректировка исходной модели (гомеостатическая концепция моделирования систем) за счет включения в модель программных механизмов адаптации и интерпретации, а также возможность организации эффективного диалога с исследователем. Налицо циклический обучающий процесс: нулевое приближение – каркас модели; первое приближение с использованием модельного эксперимента; второе приближение на основе корректировки первого и т.д. На ранних стадиях когнитивного моделирования слабо-структурированных систем на основе качественных критериев модель можно оценить только с точки зрения ее понятности, простоты использования, тестируемости, возможности развития, а также применения в других проблемных областях (промежуточное положение между количественными и качественными критериями занимают критерии с балльными шкалами). При анализе и решении многокритериальной задачи оптимизации необходимо применять только те определения и понятия, методы и процедуры, которые приводят к получению адекватных выводов и рекомендаций. Нельзя забывать и о необходимости *минимизации размерности критериального пространства*. При получении многофакторной математической модели из значительного числа факторов, влияющих на моделируемые критерии качества, выбираются лишь статистически значимые (определяются на основании отсеивающего эксперимента). Определяющим для получения качественных моделей является описание различных взаимодействий факторов, создающих системный эффект влияния факторов на моделируемый критерий качества. Формирование структуры и свойств системы всегда приблизительно, нельзя точно рассчитать и реализовать гарантированное качество в рамках какой-либо теории (всегда в описании системы что-то будет оставаться неучтенным; нельзя получить абсолютно точные результаты измерений и т.д. Полученный *уровень гарантированности* требуемого качества одновременно даст возможность и оценки риска невыполнения заданных требований (на объективном количественном уровне). *Подтверждаемость качества системы* связана с экспериментальной проверкой модельных показателей. Что касается *проблемы управляемости*, то основными здесь являются: *формирование иерархической системы целей, многокритериальность, объективный анализ эффективности системы, выбор наиболее рационального варианта, определение глобального критерия качества, отражающего всю совокупность свойств рассматриваемой системы*. Указанные проблемы в той или иной мере решаются с применением вероятностных методов (корреляционный анализ, экспертные оценки, ранговая корреляция и т.д.). Количественная оценка качества системы является предметом квалиметрии, а ее методы на практике эффективно используются там, где управление качеством систем решается на научной основе. *Под управлением качеством системы понимаются действия, направленные на установление, обеспечение и поддержание необходимого уровня качества, а под контролем качества – процедура оценивания соответствия системы требованиям путем наблюдения, измерения, испытания или калибровки. Качество*

*системы определяется ее свойствами.* Численное выражение каждого из контролируемых параметров является результатом измерения и количественного оценивания (измеряемые величины могут быть как размерными, так и безразмерными). Таким образом, для оценки качества необходимо указать перечень тех свойств, совокупность которых в достаточно полной мере характеризует качество; измерить свойства (численные значения); аналитически сопоставить полученные данные с подобными характеристиками другой системы, принимаемой за образец или эталон качества (квалиметрическая оценка качества системы не может быть получена без базовых значений показателей качества эталона). Выбор же эталона качества, с данными которого сопоставляются сведения о свойствах исследуемой системы, является субъективным, равно как и итоговая характеристика уровня качества. *Объективные сведения о свойствах системы получаются на этапе метрологического измерения свойств системы.* Качество определяется не только внутренней, но и внешней определенностью системы. Должны учитываться как отдельные свойства в их совокупности, так и признаки и характеристики внутренней определенности: уровень внутренней структурированности, устойчивости структуры и ее элементов и/или их приспособляемости к изменяющимся условиям функционирования и т.п. С метрологической (в частности, с квалиметрической) позиции достаточно учесть только внешние проявления качества (качество-образующие свойства). Такой подход к измерению качества хоть и не ошибочен, но не полон и имеет большую погрешность. Полученный квалиметрический результат (численный показатель уровня качества исследованного объекта по отношению к качеству эталона) – это еще не окончательная оценка качества, а лишь основа оценки качества. Дополнительно требуется установить, в какой степени полученным уровнем качества определяется соответствие интересам или потребностям (*никакой выбранный эталон качества не может удовлетворить всех*). Низший иерархический уровень показателей определяется единичными показателями простейших свойств, формирующих качество. *Показателем качества высшего иерархического уровня является интегральный показатель.* Показатель любого обобщения, кроме самого нижнего (исходного) уровня, предопределяется соответствующими показателями предшествующего иерархического уровня. При комплексной оценке качества все разноразмерные показатели свойств должны быть преобразованы и приведены к одной размерности или выражены в безразмерных единицах измерения. В комплексном показателе качества каждый показатель отдельного свойства должен быть скорректирован коэффициентом его весомости (сумма численных значений коэффициентов весомостей всех показателей качества на любых иерархических ступенях оценки имеет одинаковое значение).

Целостный системологический подход позволяет на основе междисциплинарных исследований и интеграции различных знаний (для изучения отдельных аспектов) комплексно и всесторонне изучить проблему, выделить приоритеты и оптимизировать основные параметры системы. В соответствии с парадоксом иерархичности описание системы возможно только при наличии ее описания как элемента надсистемы, и наоборот, описание системы как элемента надсистемы возможно только при наличии описания данной системы. Выделение подсистем обычно производилось на основе расчленения объектов на множество составных элементов (систем различной природы) и выявления между ними системообразующих межэлементных связей и отношений, придающих целостность, а также путем представления отдельных сторон, являющихся существенными для исследуемой проблемы (смачиваемость, капиллярные процессы и др.), а не всего исследуемого объекта. Известно, целостную систему нельзя разложить на отдельные компоненты без потери интегративных свойств, если изменение любого элемента системы ведет к изменению всей системы. Высший уровень иерархии – национальные интересы страны: территориальная целостность; независимость и свобода; благополучие ее граждан; обеспечение высокого качества жизни\*; защита жизни, собственности\* и конституционных прав. На втором уровне иерархии находятся целостные подсистемы: экономическая\*, политическая, социальная\*, духовная, международных отношений, экологии\* и др. В числе приоритетных

экономическое благополучие\*; подъем и укрепление отечественного производства (конкурентоспособных высокотехнологичных отраслей); национальная безопасность (военная, экономическая\*, экологическая\*, информационная и др.). Естественно, качество строительных материалов должно оцениваться как качество элемента целостной системы с учетом места в иерархической структуре надсистемы (для системы «строительные материалы» выше эти элементы отмечены знаком \*). При этом критерий качества подсистемы должен быть частью общего критерия качества системы, определяемого ее интегративными свойствами (*организмический принцип*). В основе предлагаемых методологических принципов синтеза строительных материалов лежит представление их как систем с соответствующими системными атрибутами (сложность объекта; целостность; интегративность; целостное свойство больше суммы свойств составных элементов; наличие двух и более совокупностей составных элементов, их взаимосвязей и отношений; наличие обмена информацией, энергией или веществом с другими системами или окружающей средой). Рассматривая строительный материал как целостную систему, при анализе ее частей можно воспользоваться методами, позволяющими их агрегирование в систему.

Под управлением качеством системы понимаются действия, направленные на установление, обеспечение и поддержание необходимого уровня качества, а под контролем качества – процедура оценивания соответствия системы требованиям путем наблюдения, измерения, испытания или калибровкой. Качество системы определяется ее свойствами. Так, при разработке радиационно-защитных композитов альтернативные компоненты материала и масштабные уровни определялись на основе когнитивной карты. Учитывались характеристики источника излучения, требования к радиационной защите, виды и характеристики эффективных химических элементов защитных материалов. Определялись химический состав, характеристики химических соединений, компонентный состав композита. Массовое содержание определялось по энергетическим характеристикам источника излучения. На основе имеющейся минералогической базы по выделенным химическим соединениям определялись необходимые виды минералов и горных пород. Предпочтение отдавалось минералам и горным породам с повышенными физико-механическими свойствами и низкой стоимостью. Масштабные уровни выделялись, исходя из объема дисперсной фазы радиационно-защитного материала. С использованием приведенных методологических принципов в результате многокритериального синтеза (основные критерии: прочность, плотность, пористость) и были получены сверхтяжелые бетоны для защиты от радиации [6...8].

### Список литературы

1. 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.
2. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: Библиотека научных разработок и проектов МГСУ, 2012. – 432 с.
3. Данилов, А.М. Сложные системы: идентификация, синтез, управление: монография / А.М. Данилов, И.А. Гарькина. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 308 с.
4. Гарькина, И.А. Тренажеры и имитаторы транспортных систем: выбор параметров вычислений, оценка качества / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, С.А. Пылайкин // Мир транспорта и технологических машин. – 2013. – № 3 (42). – С. 115–120.
5. Будылина, Е.А. Тренажеры по подготовке операторов эргатических систем: состояние и перспективы / Е.А. Будылина, А.М. Данилов, С.А. Пылайкин, Э.В. Лапшин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. – С. 154.

6. 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.
7. Альбакасов, А.И. Оптимизация систем со сложной иерархией / А.И. Альбакасов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 2 (31). – С. 324–327.
8. Гарькина, И.А. Системный подход к разработке материалов: модификация метода ПАТТЕРН / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Вестник МГСУ. – 2011. – № 2–2. – С. 400.

### References

1. Garkina, I.A. Cognitive modeling in the synthesis of composite materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Bulletin of higher educational institutions. Building. – 2009. – №. 3–4 (603–604). – P. 30–37.
2. System analysis in building materials science: monograph / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – M.: Library of scientific developments and projects of MGSU, 2012. – 432 p.
3. Danilov, A.M. Complex systems: identification, synthesis, management: monograph / A.M. Danilov, I.A. Garkina. – Penza: PGUAS. – 2011. – 308 p.
4. Garkina, I.A. Simulators and simulators of transport systems: choice of calculation parameters, quality assessment / I.A. Garkina, A.M. Danilov, S.A. Pylaikin // World of transport and technological machines. – 2013. – №. 3 (42). – P. 115–120.
5. Budylna, E.A. Simulators for training operators of ergatic systems: state and prospects / E.A. Budylna, A.M. Danilov, S.A. Pylaikin, E.V. Lapshin // Modern problems of science and education. – 2014. – №. 4. – P. 154.
6. Garkina, I.A. Evolution of ideas about composite materials from the standpoint of a paradigm shift / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Building materials. – 2018. – №. 1–2. – P. 60–62.
7. Albakasov, A.I. Optimization of systems with a complex hierarchy / A.I. Albakasov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Bulletin of civil engineers. – 2012. – №. 2 (31). – P. 324–327.
8. Garkina, I.A. A system approach to the development of materials: a modification of the PATTERN method / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Vestnik MGSU. – 2011. – №. 2–2. – P. 400.

УДК 519.7:69

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

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

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

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

## ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР В МОДЕЛИРОВАНИИ И УПРАВЛЕНИИ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ

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

Анализируется роль человеческого фактора в управлении как сугубо техническими, так и эргатическими системами как их обобщением. Показывается, что недостаточный учет человеческого факторов при построении тех или иных систем, включающих человека, может привести к неудовлетворительному решению поставленных задач: снижению надежности, уровня безопасности, достоверности и т.п. Выявление значимых человеческих факторов должно охватывать не только сами системы, но и процесс их проектирования. Возрастает роль адекватности теоретических моделей человека: создатели моделей со своими человеческими факторами могут оказаться источниками риска.

Методологическая общность исследований разнородных объектов управления, процессов и систем обеспечивается кибернетическим подходом (с единых позиций рассматривает связи, управление и организацию в объектах независимо от их природы). Показана принципиальная множественность используемых моделей. Для сугубо технических объектов человеческий фактор состоит в выборе вида кибернетической модели для оптимизации и управления. Эффективность выбираемой модели определяется тем, в пределах какой научной дисциплины проще решать задачи идентификации и синтеза материала. Именно с таких позиций рассматривается ряд промышленных приложений методов системного анализа, идентификации и управления как в сугубо технических, так и в эргатических системах (как в сложных).

*Ключевые слова:* системы, сложные системы, эргатические системы, проектирование, множественность моделей, выбор вида, человеческий фактор, приложения

## HUMAN FACTOR IN MODELING AND MANAGEMENT OF COMPLEX SYSTEMS

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

The role of the human factor in the management of both purely technical and ergatic systems as their generalization is analyzed. It is shown that insufficient consideration of human factors in the construction of certain systems that include a person can lead to an unsatisfactory solution of the tasks

set: decrease in reliability, safety level, reliability, etc. The identification of significant human factors should cover not only the systems themselves, but also the process of their design. The role of the adequacy of theoretical human models is growing: the creators of models with their own human factors can be sources of risk.

The methodological commonality of studies of heterogeneous objects of control, processes and systems is provided by a cybernetic approach (from a unified position, it considers connections, control and organization in objects, regardless of their nature). The fundamental multiplicity of the models used is shown. For highly technical objects, the human factor consists in choosing the type of a cybernetic model for optimization and control. The effectiveness of the chosen model is determined by the field within which scientific discipline it is easier to solve problems of identification and synthesis of material. It is from such positions that a number of industrial applications of methods of system analysis, identification and control are considered both in highly technical and in ergatic systems (as in complex ones).

*Keywords: systems, complex systems, ergatic systems, design, multiplicity of models, type selection, human factor, applications*

Рассматриваются некоторые аспекты влияния человеческого фактора на решение задач управления техническими системами с использованием аппарата современной математики. При решении теоретических задач управления основной целью исследований считается построение автоматической (без участия человека) системы оптимального управления техническим объектом: найти оптимальное (наилучшее по принятому критерию) управление, которое и будет заложено в систему управления. Определить, вычленить объекты исследования, приложения научных знаний, постановки прикладных задач позволяют понятия управления, системы управления (основополагающие, инструментальные понятия как базовая парадигма в развитии науки управления). В основе исследований в рамках этой парадигмы лежит аппарат современной математики; *методологическая общность исследований разнородных объектов управления, процессов и систем обеспечивается кибернетическим подходом (с единых позиций рассматривает связи, управление и организацию в объектах независимо от их природы).*

Человеческие факторы в управлении (роль человека при решении задач управления: человеко-машинные системы с человеком-оператором в роли субъекта управления и, с другой стороны, – человек в роли объекта управления) должны учитываться при разработке моделей, методов, математического аппарата, методологий, средств вычислений. Здесь речь идет о факторах, обусловленных ролями человека в жизненном цикле порождения и практического применения разрабатываемых средств решения задач управления и влияющих на практическую значимость и адекватность практического применения теоретических результатов.

Недостаточный учет человеческих факторов при построении тех или иных систем, включающих и человека, может привести к неудовлетворительному решению поставленных задач: снижению надежности, уровня безопасности, достоверности и т.п. Выявление значимых человеческих факторов должно охватывать не только сами системы, но и процесс их проектирования. Возрастает роль адекватности теоретических моделей человека: *создатели моделей со своими человеческими факторами могут оказаться источниками риска.*

При решении практических задач управления человека рассматривают с кардинально различающихся позиций. *Разрыв системы понятий и идей, используемых в разных направлениях, вплоть до придания существенно различного смысла одноименным понятиям, замкнутость направлений затрудняют перенос позитивных знаний между направлениями и их интеграцию.* Так рассматривая память как собрание личности, Б.В. Аверин отмечал: «...личность множественна, многосоставная; имеет интеллектуальный, психологический, моторный центры; объединить все не получается». Аналогично практически нельзя объяснить, как набив всего несколько шишек, малыш уже катается на велосипеде. А в динамической модели (уравнения движения) используются масса нетривиальных понятий: бесконечно малые, предел, непрерывность, точка опоры, скорость, кориолисово ускорение и т.д. Совершенно

очевидна принципиальная *множественность используемых моделей. Для технических объектов человеческий фактор состоит в выборе модели в рамках определенных дисциплин и точности исследований.*

Практические задачи инженерной психологии [1, 2] требуют согласования параметров человека и технического объекта; образуют основу мероприятий по инженерно-психологическому обеспечению проектирования (для эргатических систем обычно оценивается уровнем аварийности). Появились некоторые признаки неадекватности представлений о человеке и его возможностях при решении задач управления, которые сегодня являются традиционными в сложившихся научных направлениях. Уже говорят и о *недостатке новых, даже прорывных идей, вплоть до новых парадигм в моделировании человека* при решении управленческих задач по всем направлениям исследований, в том числе не вполне сформировавшимся. В ряде работ отмечается отсутствие методов анализа и учета человеческого фактора, представление психологических знаний о человеке-операторе в формах, *не пригодных для задач проектирования и формирования сложных эргатических систем, неизвестность науке многих важных аспектов человеческого фактора*, обуславливающих надежность оператора в критических условиях. В задачах материаловедения *эффективность выбираемой модели определяется тем, в пределах какой научной дисциплины проще решать задачи идентификации и синтеза материала. Именно с таких позиций нами и рассматривался ряд промышленных приложений методов системного анализа, идентификации и управления как в сугубо технических, так и в эргатических системах (как в сложных).*

Актуальна имитация воспроизведения штатных условий функционирования сложных систем различной природы, в том числе при изучении отдельных сепаратных подсистем композитных материалов (в частности смачиваемости), предпосылок возникновения особых ситуаций и их протекания как при правильных, так и неправильных действиях оператора эргатической системы в принятом для имитации диапазоне ожидаемых условий эксплуатации. Это связано с построением рациональных математических моделей на базе гибкого модульного программно-математического обеспечения, автоматизации проектирования и испытаний, разработки методик идентификации и корректировки моделей, например по различным классам транспортных средств. Естественно, структура модели должна обеспечить возможность корректировки выходных характеристик обучающего комплекса под реальные технические характеристики объекта, а также оператора [3...5]. Требуемая точность моделирования технических характеристик будет определяться по заложенным в техническом задании обучающим свойствам (в соответствии с разработанными критериями по всем режимам функционирования транспортных средств и из условий формирования полноценных профессиональных навыков). Имитационные свойства должны оцениваться на основе объективных показателей, непосредственно связанных с результирующими характеристиками управления объектом с учетом основных эргономических характеристик (методика формирования объективных оценок должна предусматривать возможность сравнения групп показателей для условий модели и реального объекта). Достижение совпадения управляющих воздействий оператора в условиях тренажера и реального объекта практически невозможно (тренажер будет не менее сложным, чем сам объект). Так что реальной является возможность формирования у оператора на тренажере ложного навыка по управлению объектом (принято считать, что число выходов на тренажер не должно превышать семи). Пока в большинстве случаев нет методов по определению допусков на показатели даже эталонного управления («идеальным оператором»; характеризуется программой (непрерывными и дискретными показателями, определяемыми во временной области, а также рядом функций от параметров состояния)). Поэтому при оценке имитационных характеристик тренажера данные по управлению объектом используются лишь на уровне качественного анализа. Такая процедура применялась при решении задач по обеспечению безопасности движения транспортных систем, определению и нормированию риска [6], для объективизации субъективной *оценки оператором*

эргатической транспортной системы *технических характеристик объекта* с точки зрения управления, а также *имитационных характеристик тренажных комплексов*. Оценка имитационных характеристик непосредственно связана с задачей объективного контроля качества моделирования объекта и сводится к *сравнению управляющих воздействий* в системах «оператор-объект» и «оператор – модель объекта». *Показателями для оценки деятельности оператора принимались:*

- точность выдерживания заданных параметров движения, сохранения безопасных режимов движения при отказах оборудования;
- надежность восприятия, время выполнения двигательных действий;
- структура сбора информации (частота и длительность фиксации, маршруты перемещения и время переноса взгляда, дискретность восприятия);
- параметры психических процессов обнаружения, опознания и принятия решения;
- параметры, определяющие психофизиологическую напряженность оператора;
- субъективные мнения операторов (данные опроса, бесед).

Решение указанных задач пока находится на уровне *когнитивного моделирования с использованием итеративного способа*. С выбором структурной схемы объекта управления обстоит более или менее благополучно, а с выбором структурной схемы человека-оператора и ее связи с объектом в зависимости от параметров внешней среды и психофизиологического состояния оператора не все так гладко. Незавершенность изучения сущности человеческого фактора и его проявлений очевидны. Особенно важен удачный *выбор структурной схемы* по каждому из каналов управления: оператор состоит из двигательной (моторной) системы человека; формирования мысленного образа выходной координаты; формирования ошибки управления центральной нервной системой.

Непосредственная идентификация эргатической системы в силу ее замкнутости через человека встречает, по существу, непреодолимые трудности.

В качестве некоторого приближения для передаточной функции объекта (участие человека в системе не учитывается) использовалась *обобщенная передаточная функция системы*

$$W_c^{об}(j\omega) = \frac{S_{yx}(j\omega)}{S_{xx}(j\omega)}$$

(определялась по синхронным измерениям  $x$  и  $y$  в процессе нормальной эксплуатации). Вход  $x(t)$  включает составляющую, коррелированную с  $y(t)$ , изображение которой имеет вид:

$$y_{кор}(p) = W_1(p)W_c^{об}(p)\theta_{зад} - y(p).$$

При  $W_c^{об} \equiv W_c$  ( $W_{ос}(p) \equiv 0$ ) оператор управляет объектом по разомкнутому каналу; верно и обратное, если оператор управляет по разомкнутому каналу, то  $W_c^{об}(p) \equiv W_c(p)$ .

При предварительной оценке деятельности оператора транспортной системы определялись отклонения от заданных параметров движения в некоторый фиксированный момент времени или максимальные отклонения на некотором интервале (например, отклонение от заданной траектории при ручной посадке, взлете, маневре и т.д.). По полученным данным строились [5, 6] функции или плотности распределений, определялись моменты распределения (математическое ожидание, дисперсия, эксцесс, асимметрия и т.д.). Оценка качества управления в аварийной ситуации производилась по максимальным отклонениям от заданных величин; строились функции распределения отклонений для оценки вероятности выхода параметров за пределы безопасных значений. Осуществлялся корреляционно-спектральный анализ параметров движения. Это дало возможность определить не только средние и среднеквадратические отклонения в выдерживании заданного параметра  $x_i(t)$ , но и степень колебательности процесса. Для обеспечения необходимой точности полученных характеристик использо-

вались реализации процессов большой длительности, что потребовало больших объемов вычислительных работ.

При одновременной оценке управления по всем параметрам каждого из *установившихся режимов* использовали *безразмерный* аддитивный глобальный критерий [7]:

$$K_j = \sum_{i=1}^3 \frac{N_{ij}}{c_{ij}} = \sum_{i=1}^3 \frac{\sqrt{m_{ij}^2 + \sigma_{ij}^2}}{c_{ij}} \left( 1 + \sqrt{x_{ij} - \frac{\pi^2}{T^2}} \right).$$

Заметим, фактически выбор значений  $c_i$  на выдерживание каждого  $i$ -го параметра равносильно введению значений весовых констант с присущими этому элементам субъективизма (избавиться в известной степени можно воспользовавшись приведенной выше методикой их выбора). Возможно использование приведенных подходов к решению проблем многокритериальности при анализе и синтезе большинства сложных технических систем.

*Основная сложность в изучении человеческого фактора состоит в проблеме неопределенности в постановке исходной задачи в проектировании сложных систем: техническое задание на систему с риском выбора физических, химических и др. принципов проектирования. С этим непосредственно связана и проблема нормализации множества критериев качества, задания приоритетов (степени важности) для элементов множества критериев.*

В некоторых случаях возможна оценка процесса или системы по некоторому обобщенному *глобальному критерию* качества  $K$ , являющемуся некоторой функцией локальных критериев  $K_i$ . При оценке *качества композита* частными критериями  $K_i$  были: прочность, твердость, реологические свойства и т.д.; в качестве критериев  $K_{iv}$  – параметры кинетических процессов набора прочности, твердости и т.д. (определяются точкой в факторном пространстве: точки экстремума, экстремальные значения, точки перегиба и т.д.).

При такой оценке обычно используются *два метода*.

*В первом* оценка сводится к решению задачи с ограничениями, имеющей *две модификации*. В первой из всего множества критериев выделяется основной критерий  $K_m$ , по которому и проводится оценка качества; остальные критерии  $K_i$ ,  $i \neq m$  ограничиваются условиями: «не меньше, чем» или «не больше, чем». Во второй множество критериев представляется в виде упорядоченного по степени важности множества, а затем проводится последовательная оценка качества. *Критерий оптимальности из всего множества критериев выбирается субъективно*.

*Второй метод* состоит в формировании глобального критерия качества в виде суммы локальных, взятых со своими весовыми коэффициентами (скаляризация, свертывание критериев). Эффективность метода зависит от степени объективности этих констант.

*Нормализация* (приведение критериев к единой мере) связана с различными размерностями локальных критериев. Она может проводиться с учетом оптимального значения  $K_{i0}$  для каждого локального критерия и определения отклонений  $K_i - K_{i0}$ . *Успешное решение проблемы нормализации зависит от того, насколько точно определены оптимальные значения локальных критериев*.

При анализе и синтезе сложных систем *различной природы* (тренажные и обучающие комплексы для подготовки операторов транспортных систем, механические колебательные системы, композиционные материалы модульной структуры и т.д.) нами эффективно использовалась приводимая в [7...9] методика.

### Список литературы

1. Гарькина, И.А. Инженерно-психологические основы формирования стиля и навыков управления реальным объектом на тренажерах / И.А. Гарькина, А.М. Дани-

лов, А.С. Нугаев // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1–1. – С. 314.

2. Душков, Б.А., Основы инженерной психологии / Б.А. Душков, А.В. Королев, Б.А. Смирнов. – М.: Академический Проект, 2020. – 574 с.

3. Красовский, А.А. Системы автоматического управления полётом и их аналитическое конструирование / А.А. Красовский. – М.: Наука, 1973. – 560 с.

4. Данилов, А.М. Формализация оценки оператором характеристик объекта управления / А.М. Данилов, Э.Р. Домке, И.А. Гарькина // Информационные системы и технологии. – 2012. – № 2 (70). – С. 5–10.

5. Будылина, Е.А. Структурная и параметрическая идентификация сложных эргатических систем / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Р.Л. Дулатов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–5. – С. 919–922.

6. Гарькина, И.А. Проблема многокритериальности при управлении качеством сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, В.О. Петренко // Мир транспорта и технологических машин. – 2013. – № 2 (41). – С. 123–129.

7. Данилов, А.М. Фундаментализация научных знаний в проектировании композитов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 3 (32). – С. 54–58.

8. Будылина, Е.А. Методологические принципы проектирования сложных динамических систем / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 4 (41). – С. 34–41.

9. Гарькина, И.А. Методы системного анализа в проектировании композитов / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 1 (42). – С. 63–68.

#### References

1. Garkina, I.A. Engineering and psychological foundations of the formation of style and skills of real object management on simulators / I.A. Garkina, A.M. Danilov, A.S. Nugaev // Modern problems of science and education. – 2015. – №. 1–1. – P. 314.

2. Dushkov, B.A. Fundamentals of engineering psychology / B.A. Dushkov, A.V. Korolev, B.A. Smirnov. – M.: Academic Project, 2020. – 574 p.

3. Krasovsky, A.A. Automatic flight control systems and their analytical design / . – M A.A. Krasovsky. – M.: Science, 1973. – 560 p.

4. Danilov, A.M. Formalization of the operator's assessment of the characteristics of the controlled object / A.M. Danilov, E.R. Domke, I.A. Garkina // Information systems and technologies. – 2012. – №. 2 (70). – P. 5–10.

5. Budylyna, E.A. Structural and parametric identification of complex ergatic systems / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov, R.L. Dulatov // Fundamental research. – 2015. – №. 2–5. – P. 919–922.

6. Garkina, I.A. The problem of multi-criteria in managing the quality of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.O. Petrenko // The world of transport and technological machines. – 2013. – №. 2 (41). – P. 123–129.

7. Danilov, A.M. Fundamentalization of Scientific Knowledge in Composite Design / A.M. Danilov, I.A Garkina // Regional architecture and engineering. – 2017. – №. 3 (32). – P. 54–58.

8. Budylyna, E.A. Methodological principles for the design of complex dynamic systems / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2019. – № 4 (41). – P. 34–41.

9. Garkina, I.A. Systems analysis methods in composite design / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2020. – № 1 (42). – P. 63–68.

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

**Домке Эдуард Райнгольдович,**  
кандидат технических наук, профессор  
кафедры «Организация и безопасность  
движения»

**Жесткова Светлана Анатольевна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Организация и безопасность  
движения»

**Барсукова Анастасия Игоревна,**  
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

**Domke Edward Raingoldovich,**  
Candidate of Sciences, Professor of the  
department «Organization and Traffic Safety»

**Zhestkova Svetlana Anatolievna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Organization and Traffic  
Safety»

**Barsukova Anastasia Igorevna,**  
Student

## ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДОСТАВКИ МАССОВОГО СТРОИТЕЛЬНОГО ГРУЗА АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Э.Р. Домке, С.А. Жесткова, А.И. Барсукова

Приводится усовершенствованный алгоритм определения оптимальных маршрутов доставки массового строительного груза, основанный на вводе внешних и внутренних фиктивных узлов. Приведен пример решения открытой задачи маршрутизации транспорта на основе разработанного алгоритма.

*Ключевые слова: алгоритм, опасный груз, автомобильный транспорт, оптимальный маршрут*

## OPTIMIZATION OF THE SYSTEM FOR DELIVERY OF BULK CONSTRUCTION CARGO BY AUTOMOBILE TRANSPORT

E.R. Domke, S.A. Zhestkova, A.I. Barsukova

The article provides an improved algorithm for determining the optimal routes for the delivery of construction cargo, based on the input of external and internal fictitious junctions. An example of solving an open problem of transport routing based on the developed algorithm is given.

*Keywords: algorithm, dangerous cargo, road transport, optimal route*

**Введение.** Определение кратчайших маршрутов передвижения транспорта представляет собой математическую задачу, известную как задача маршрутизации.

Определение маршрута является важной частью любой распределительной системы, обслуживающей группу клиентов при их известных потребностях. Цель маршрутизации заключается в снижении стоимости доставки грузов путем уменьшения длины маршрутов и удовлетворения потребности клиентов точно в срок [1-3].

Пока точного решения задачи маршрутизации транспорта не найдено. Одной из причин этого является наличие различных ограничений при определении целевой функции, учитывающих специфику рассматриваемого варианта доставки груза.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при доставке массового строительного груза необходимо учитывать следующие особенности [4-6]:

– маршрут выбирается по разработанной схеме, учитывающей особенности перемещения строительного груза, которое не всегда совпадает с кратчайшим расстоянием между пунктами отправки и потребления;

– для перевозки массового строительного груза используются автомобили большой грузоподъемности;

– доставка может происходить с нескольких пунктов отправки.

Эти особенности требуют решения задачи открытого типа (при неограниченном запасе груза в пунктах отправки) для нахождения оптимального маршрута доставки груза.

Для решения задачи можно использовать метод фиктивных узлов и ветвей, который позволяет посещать пункты отправки и проезжать по дугам между пунктами несколько раз.

Однако, как показали проведенные исследования, применение метода фиктивных узлов и ветвей не всегда обеспечивает выполнение ограничений и, в свою очередь, нуждается в усовершенствовании.

Вариант доставки грузов на строительные объекты, приведенный на рис. 1, рассмотрен на примере компании ООО ПКФ «Термодом». Пункты отправки расположены в квадратах, а пункты потребления – в кружках. Количество маршрутов через каждый пункт отправки не ограничивается, а регулируется наименьшим значением целевой функции – длиной маршрута.

Требуется найти оптимальный маршрут, проходящий через вершины: 4-5, 6-7, 8-9 и 3.

Исходная матрица расстояний показана в табл. 1. В качестве примера приводим кратчайшее описание только одного оптимального хода из всего дерева решений.

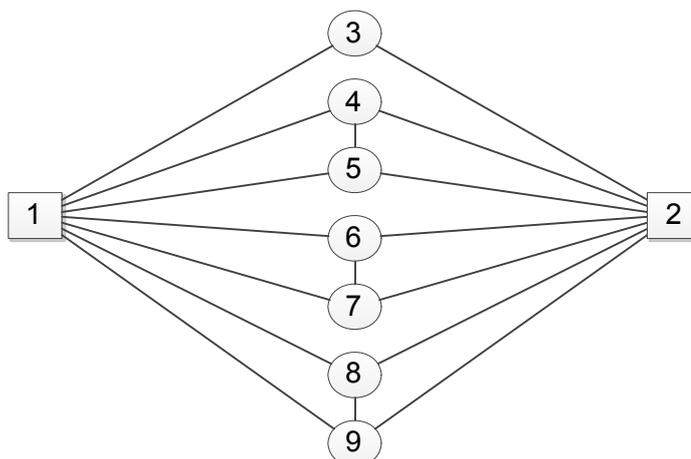


Рис. 1. Транспортный граф

Т а б л и ц а 1

Исходная матрица

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1			1	8	3	12	6	5	5
2			8	4	4	7	3	1	7
3	1	8							
4	8	4			10				
5	3	4		10					
6	12	7					6		
7	6	3				6			
8	5	1							5
9	5	7						5	

Выполним над матрицей операцию приведения по строкам (табл. 2) и по столбцам (табл. 3). После оценки нулевых элементов в таблице 3 два элемента 1-3 и 3-1 имеют наибольшую оценку 7. Вычеркиваем (в качестве примера) ветвь 1-3.

Матрица приведения

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1			0	7	2	11	5	4	4	1
2			7	3	3	6	2	0	6	1
3	0	7								1
4	4	0			6					4
5	0	1		6						3
6	6	1					0			6
7	3	0				3				3
8	4	0							4	1
9	0	2						0		5

Т а б л и ц а 3

Первый шаг преобразования матрицы

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1			$0^7$	4	$0^1$	8	5	4	$0^0$
2			7	$0^3$	1	3	2	$0^0$	2
3	$0^7$	7							
4	4	$0^4$			4				
5	$0^1$	1		3					
6	6	1					$0^3$		
7	3	$0^0$				$0^3$			
8	4	$0^0$							$0^0$
9	$0^0$	2						$0^0$	

Из табл. 3 получим матрицу 8x8 (табл. 4). Создаем фиктивные матрицы путем ввода фиктивного узла 10Ф в пункте 1. В табл. 4 блокирует ячейку 3-1 и производим оценку ее нулевых элементов. Вычеркиваем ветвь 3-10Ф.

Т а б л и ц а 4

Второй шаг преобразования матрицы

	1	2	4	5	6	7	8	9	10Ф
2			$0^3$	1	3	2	$0^0$	2	
3	$\infty$	7							$0^7$
4	4	$0^4$		4					4
5	$0^0$	1	3						$0^0$
6	6	1				$0^6$			6
7	3	$0^0$			$0^3$				3
8	4	$0^0$						$0^0$	4
9	$0^0$	2					$0^0$		$0^0$
10Ф			4	$0^1$	8	5	4	$0^0$	

Получим новую матрицу 8x8. Вводим фиктивный узел 11Ф (табл. 5).

В табл. 6 производим оценку нулевых элементов матрицы и вычеркиваем ячейку 6-7. Получаем новую таблицу (табл. 7). Здесь не вводим фиктивные узлы. Как показали расчеты, их ввод не улучшает рассматриваемый оптимальный вариант маршрута. В табл. 6 блокируем ячейку 7-6.

В табл. 7 производим операцию приведения столбца 6 и оценку нулевых элементов. Здесь вычеркиваем ветвь 2-6 с оценкой 5. Получим таблицу меньших размеров 7x7 (табл. 8).

Т а б л и ц а 5

Третий шаг преобразования матрицы

	1	2	4	5	6	7	8	9	11Ф
2			$0^3$	1	3	2	$0^0$	2	
4	4	$0^4$		4					4
5	$0^0$	1	3						$0^0$
6	6	1				$0^6$			6
7	3	$0^0$			$0^3$				3
8	4	$0^0$						$0^0$	4
9	$0^0$	2					$0^0$		$0^0$
10Ф			4	$0^0$	8	5	4	$0^0$	
11Ф			4	$0^0$	8	5	4	$0^0$	

Т а б л и ц а 6

Четвертый шаг преобразования матрицы

	1	2	4	5	6	8	9	11Ф
2			0	1	3	0	2	
4	4	0		4				4
5	0	1	3					0
7	3	0			$\infty$			3
8	4	0					0	4
9	0	2				0		0
10Ф			4	0	8	4	0	
11Ф			4	0	8	4	0	

Т а б л и ц а 7

Пятый шаг преобразования матрицы

	1	2	4	5	6	8	9	11Ф
2			$0^3$	1	$0^5$	$0^0$	2	
4	4	$0^4$		4				4
5	$0^0$	1	3					$0^0$
7	3	$0^3$						3
8	4	$0^0$					$0^0$	4
9	$0^0$	2				$0^0$		$0^0$
10Ф			4	$0^0$	5	4	$0^0$	
11Ф			4	$0^0$	5	4	$0^0$	
					3			

Т а б л и ц а 8

Шестой шаг преобразования матрицы

	1	2	4	5	8	9	11Ф	12Ф
4	4	$0^0$		4			4	$0^0$
5	$0^0$	1	3				$0^0$	1
7	3	$\infty$					3	$0^3$
8	4	$0^0$				$0^0$	4	$0^0$
9	$0^0$	2			$0^0$		$0^0$	2
10Ф			4	$0^0$	4	$0^0$		
11Ф			4	$0^0$	4	$0^0$		
12Ф			$0^3$	1	$0^0$	2		

Создаем фиктивную матрицу, добавляя в нее фиктивный узел 12Ф в пункт 2 (см. табл. 8). Здесь блокируем клетку 7-2 против заикливания, а по результатам оценки элементов удаляем клетку 12Ф-4. Записываем табл. 9, в которой блокируем клетку 4-12Ф.

Т а б л и ц а 9

Седьмой шаг преобразования матрицы

	1	2	5	8	9	11Ф	12Ф
4	4	0 <sup>4</sup>	4			4	∞
5	0 <sup>0</sup>	1				0 <sup>0</sup>	1
7	3					3	0 <sup>3</sup>
8	4	0 <sup>0</sup>			0 <sup>0</sup>	4	0 <sup>0</sup>
9	0 <sup>0</sup>	2		0 <sup>4</sup>		0 <sup>0</sup>	2
10Ф			0 <sup>0</sup>	4	0 <sup>0</sup>		
11Ф			0 <sup>0</sup>	4	0 <sup>0</sup>		

После оценки нулевых элементов вычеркиваем ветвь 4-2 с оценкой 4. Новая матрица показана в табл. 10. Здесь производим оценку нулевых элементов. Вычеркиваем ветвь 9-8 и получаем табл. 11. Здесь блокируем ячейку 8-9 и вычеркиваем ветвь 8-12Ф. Получаем табл. 12.

Т а б л и ц а 10

Восьмой шаг преобразования матрицы

	1	5	8	9	11Ф	12Ф
5	0 <sup>0</sup>				0 <sup>0</sup>	1
7	3				3	0 <sup>3</sup>
8	4			0 <sup>0</sup>	4	0 <sup>0</sup>
9	0 <sup>0</sup>		0 <sup>4</sup>		0 <sup>0</sup>	2
10Ф		0 <sup>0</sup>	4	0 <sup>0</sup>		
11Ф		0 <sup>0</sup>	4	0 <sup>0</sup>		

Т а б л и ц а 11

Девятый шаг преобразования матрицы

	1	5	9	11Ф	12Ф
5	0 <sup>3</sup>			0 <sup>3</sup>	1
7	3			3	0 <sup>3</sup>
8	4		∞	4	0 <sup>4</sup>
10Ф		0 <sup>0</sup>	0 <sup>0</sup>		
11Ф		0 <sup>0</sup>	0 <sup>0</sup>		

После оценки ее элементов вычеркиваем ветвь 5-11Ф с оценкой 3. В полученной табл. 12 блокируем элемент 11Ф-5. Из нее вычеркиваем в маршруте звено 7-1 с оценкой ∞. Новая матрица размером 2x2 показана в табл. 14. Здесь вычеркиваемые ветви очевидны: 10Ф-5 и 11Ф-9.

Т а б л и ц а 12

Десятый шаг преобразования матрицы

	1	5	9	11Ф
5	0 <sup>3</sup>			0 <sup>3</sup>
7	3			3
10Ф		0 <sup>0</sup>	0 <sup>0</sup>	
11Ф		0 <sup>0</sup>	0 <sup>0</sup>	

Одиннадцатый шаг преобразования матрицы

	1	5	9
7	$0^\infty$		
10Ф		$0^\infty$	$0^0$
11Ф		$\infty$	$0^\infty$

Таким образом, в процессе вычисления были вычеркнуты следующие ветви: 1-3; 3-10Ф; 6-7; 2-6; 12Ф-4; 4-2; 9-8; 8-12Ф; 5-11Ф; 7-1; 1-Ф-5; 11Ф-9. Путем склейки находим маршрут: 1-3-10Ф-5-11Ф-9-8-12Ф-4-2-6-7-1 (рис. 2). Отбрасывая фиктивные узлы, получаем схему передвижения: 1-3-1-5-1-9-8-2-4-2-6-7-1 длиной 48 единиц. Отметим, что ввиду симметричности матрицы расстояний передвигаться по схеме можно в любом направлении.

Т а б л и ц а 14

Двенадцатый шаг преобразования матрицы

	5	9
10Ф	$0^\infty$	0
11Ф		$0^\infty$

Как видно из рис. 3, маршрут не проходит через пункт 4-5. Это противоречит постановке задачи. Таким образом, показано, что метод ветвей и границ может не давать правильные решения поставленной задачи при двух пунктах в маршруте. Значит, модель маршрутизации необходимо усовершенствовать.

Основная идея модернизации заключается в том, что между двумя действительными вершинами маршрута вводим внешний фиктивный узел. Соединяем его с действительными пунктами фиктивными ветвями. Длина каждой из них равна половине расстояния между действительными узлами. Действительную хорду удаляем.

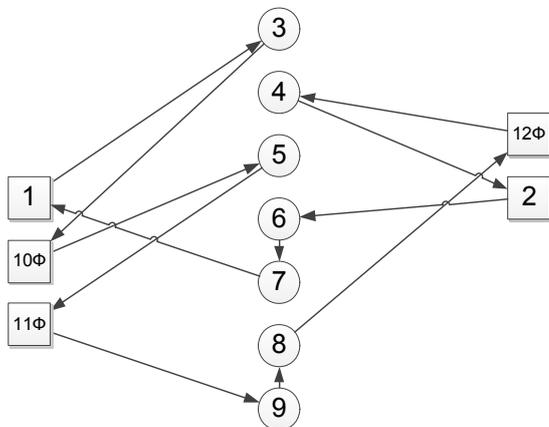


Рис. 2. Граф фиктивного маршрута

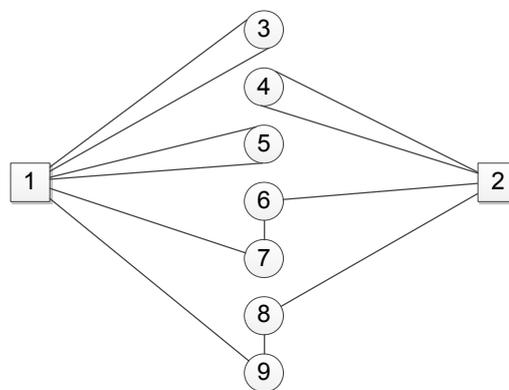


Рис. 3. Граф оптимальной схемы передвижения

Таким образом, получаем транспортный граф с внешним фиктивным узлом (рис. 4) для рассмотренного ранее примера.

Следует отметить, что функции внешнего, вводимого до решения матрицы весов, и внутреннего фиктивных узлов противоположны по своему назначению. Первый предназначен для обеспечения движения вперед от исходного к смежному следующему узлу. Фиктивный внутренний узел, который появляется в процессе решения матрицы весов, наоборот, создает возможность двигаться назад и посещать исходный узел еще раз, когда это необходимо для минимизации целевой функции.

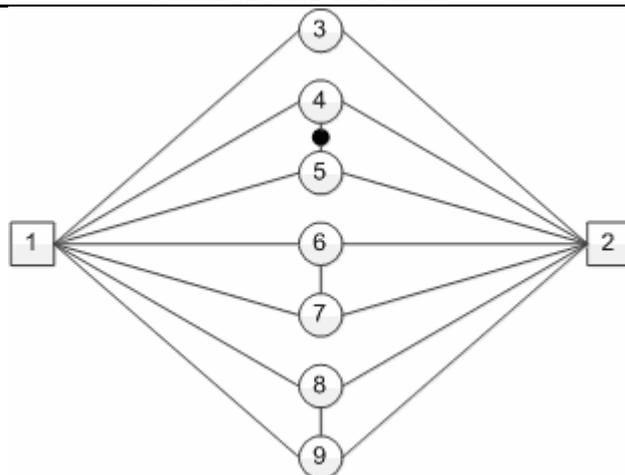


Рис. 4. Транспортный граф с внешним фиктивным узлом

В рассматриваемом фиктивном транспортном графе в первую очередь необходимо, по условию задачи, обеспечить последовательное посещение вершин на рассматриваемом маршруте. Поэтому требуется блокировать в алгоритме фиктивных узлов и ветвей движение из внешнего во внутренний фиктивный узел, чтобы проехать до фиктивной вершины или назад по цепочке.

#### Доказательство повышения эффективности развозки массовых строительных грузов автотранспортом на основе метода фиктивных узлов и ветвей

Решение по усовершенствованному алгоритму проиллюстрируем на примере ранее рассмотренной транспортной задачи.

Исходная дислокация показана на рис. 4. Даны кратчайшие расстояния между пунктами назначения и базами, введен внешний фиктивный узел 10Ф.

Матрица расстояний приведена в табл. 15.

Т а б л и ц а 15

Матрица исходных расстояний

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10Ф
1			1	8	3	12	6	5	5	
2			8	4	4	7	3	1	7	
3	1	8								
4	8	4								5
5	3	4								5
6	12	7					6			
7	6	3				6				
8	5	1							5	
9	5	7						5		
10Ф				5	5					

Таким образом, в процессе вычисления были вычеркнуты следующие ветви: 1-3; 3-1001Ф; 4-10Ф; 10Ф-5; 2002Ф-4; 1001Ф-5; 6-7; 7-1011Ф; 1011Ф-9; 9-1; 2002Ф-8; 8-2; 2-6. Путем склейки находим маршрут: 1-3-1001Ф-5-10Ф-4-2002Ф-8-2-6-7-1011Ф-9-1 (рис. 5). Отбрасывая фиктивные узлы, получаем схему передвижения: 1-3-1-5-4-2-8-2-6-7-1-9-1 длиной 46 единиц. Отметим, что ввиду симметричности матрицы расстояний передвигаться по схеме можно в любом направлении.

Таким образом, при открытой задаче маршрутизации база №1 посещается три раза, а на базу №2 необходимо совершить две ездки (рис. 5, 6).

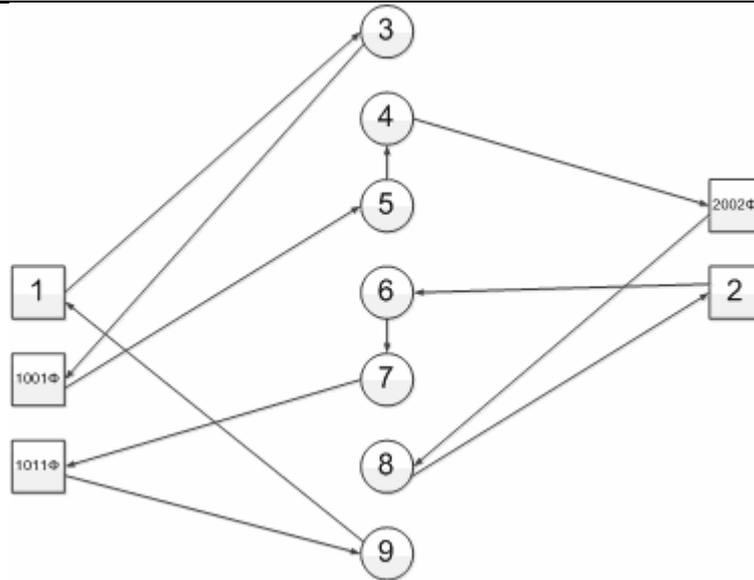


Рис. 5. Оптимальная схема передвижения в фиктивном графе

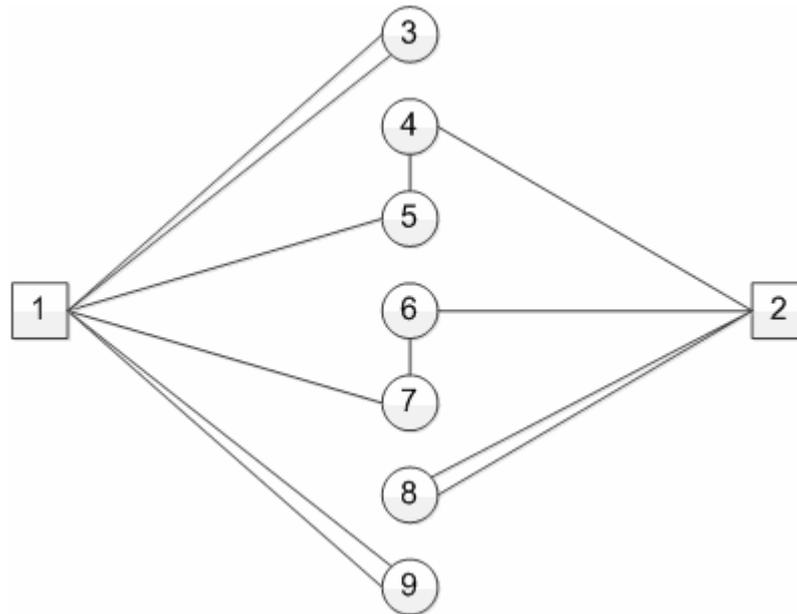


Рис. 6. Оптимальный маршрут

### Выводы

1. Представлены пути повышения эффективности развозки грузов методом фиктивных узлов и ветвей при решении задачи маршрутизации транспорта.
2. Предложен усовершенствованный алгоритм метода фиктивных узлов и ветвей, позволяющий получить точное решение задачи маршрутизации транспорта.

### Список литературы

1. Домке, Э.Р. Повышение эффективности перевозки нефтепродуктов автомобильным транспортом / Э.Р. Домке, С.А. Жесткова, К.С. Подшивалова // Вестник МАДИ. – 2012. – №3(30). – С. 70–74.
2. Домке, Э.Р. Особенности модели функционирования интегрированной системы развозки грузов / Э.Р. Домке, С.А. Жесткова // Мир транспорта и технологических машин. – 2012. – №3(38). – С. 94–100.
3. Домке, Э.Р. Совершенствование организации перевозочного процесса грузов автомобилями: моногр. / Э.Р. Домке, С.А. Жесткова. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 120 с.

4. Домке, Э.Р. Методы оптимизации маршрутных схем развозки грузов автомобильным транспортом / Э.Р. Домке, С.А. Жесткова. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 164 с.
5. Жесткова, С.А. Использование метода ветвей и границ при решении задачи маршрутизации транспорта / С.А. Жесткова // Мир транспорта и технологических машин. – 2012. – №1(36). – С. 94–101.
6. Подшивалова, К.С. Использование фиктивных узлов для определения оптимальной комбинации маршрутов с совместным центром / К.С. Подшивалова, Э.Р. Домке, С.Ф. Подшивалов, С.А. Жесткова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. – 2011. – №2(18). – С. 81–92.

### References

1. Domke, E.R. Improving the efficiency of transportation of petroleum products by road / E.R. Domke, S.A. Zhestkova, K.S. Podshivalova // MADI Bulletin. – 2012. – №3(30). – P. 70–74.
2. Domke, E.R. Features of the functioning model of the integrated cargo delivery system / E.R. Domke, S.A. Zhestkova // World of transport and technological machines. – 2012. – №3(38). – P. 94–100.
3. Domke, E.R. Improvement of the organization of the cargo transportation process by cars: monograph / E.R. Domke, S.A. Zhestkova. – Penza: PGUAS, 2013. – 120 p.
4. Domke, E.R. Methods of optimization of route schemes of cargo transportation by road / E.R. Domke, S.A. Zhestkova. – Penza: PGUAS, 2014. – 164 p.
5. Zhestkova, S.A. Using the method of branches and borders in solving the problem of transport routing / S.A. Zhestkova // World of transport and technological machines. – 2012 – №1(36). – P. 94–101.
6. Podshivalova, K.S. Using fictitious junctions to determine the optimal combination of routes with a joint center / K.S. Podshivalova, E.R. Domke, S.F. Podshivalov, S.A. Zhestkova // News of higher educational institutions. Volga region. – 2011. – №2(18). – P. 81–92.

УДК 698

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

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

**Ерёмкин Александр Иванович,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

*Пензенский государственный аграрный университет*

Россия, 440014, г. Пенза,  
ул. Ботаническая, д.30,  
тел.: (8412) 628-359; факс: (8421) 628-354

**Пономарева Инна Константиновна,**  
кандидат экономических наук,  
доцент кафедры «Управление, экономика  
и право»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Eremkin Alexander Ivanovich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Heat, Gas Supply  
and Ventilation»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

*Penza State Agrarian University*

Russia, 440014, Penza, 30,  
Botanicheskaya St.,  
tel.: (8412) 628-359; fax: (8412) 628-354

**Ponomareva Inna Konstantinovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Management, Economics  
and Law»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВОЗДУХООБМЕНА СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ВЫТЕСНЯЮЩЕГО ТИПА В ЗАЛАХ БОГОСЛУЖЕНИЯ ПРАВОСЛАВНЫХ СОБОРОВ

А.И. Еремкин, И.К. Пономарева

Разработкой методик и рекомендаций по расчету воздухообмена для различных зданий и сооружений занимались многие ученые, составлены нормативные акты. При этом разработчики для поддержания искусственного микроклимата ( $t_v$ ,  $\phi_v$ ,  $V_v$ ) в помещениях основывались на применении схем воздухообменов «сверху вниз», «снизу вверх», «сверху вверх» и др. Аналогичный подход предусматривается и в основных нормах при проектировании системы вентиляции и кондиционирования воздуха в православных соборах.

При расчете воздухообмена по существующим методикам учитываются разбавления всех теплоизбытков и других вредностей. Это ведет к значительному завышению количества приточного воздуха и экономически необоснованным затратам. Для решения проблемы оптимизации затрат авторами предлагается система вытесняющей вентиляции и кондиционирования воздуха. В этом случае приточный воздух подается в нижнюю зону, где находятся прихожане, поэтому предлагается рассчитывать воздухообмен для ассимиляции только части теплоизбытков и других вредностей, поступающих в нижнюю зону высотой до 2 метров от уровня пола. Остальная часть вредностей конвективным потоком и приточным воздухом вытесняется в верхнюю зону и удаляется наружу. Данное решение проблемы позволяет оптимизировать затраты на вентиляцию и кондиционирование воздуха в залах богослужения православных храмов.

*Ключевые слова:* кондиционирование воздуха, вытесняющая вентиляция, воздухообмен, православный собор, зал богослужения, восходящий тепловой поток, температура, относительная влажность, подвижность воздуха, микроклимат, коэффициент эффективности воздухообмена, коэффициент теплоступлений, ассимиляция вредностей

## METHOD FOR AIR EXCHANGE CALCULATING OF AIR CONDITIONING SYSTEM OF BREATHABLE TYPE IN ORTHODOX CATHEDRALS

A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva

Many scientists have been developing methods and recommendations for calculating air exchange for various buildings and structures, including normative acts. Moreover, the authors, in order to maintain the artificial microclimate  $t_v$ ,  $\phi_v$ ,  $V_v$ , in the premises, base on the use of “top-down”, “bottom-up”, “top-up” air exchange schemes. A similar approach is provided for in the basic norms when designing a ventilation and air conditioning system in Orthodox churches.

When calculating air exchange according to existing methods, dilutions of all heat surpluses and other hazards are taken into account. This leads to a significant overestimation of the amount of supply air and to unreasonable costs. To solve the problem of cost optimization, the authors propose a displacement ventilation and air conditioning system. In this case, the supply air is supplied to the lower zone, where the congregation is located. In this case, it is proposed to calculate the air exchange for the assimilation of only part of the heat surplus and other harmful substances entering only the lower zone, up to 2 meters high from the floor level. The rest of the hazards is displaced by convective flow and supply air to the upper zone and is removed to the outside. The proposed solution of the problem to optimizes the cost of ventilation and air conditioning in Orthodox churches.

*Keywords: air conditioning, displacing ventilation, air exchange, Orthodox cathedral, hall of worship, ascending heat flow, temperature, relative humidity, air mobility, microclimate, air exchange efficiency coefficient, heat transfer coefficient, hazard assimilation*

Разработкой методик и рекомендаций по расчету воздухообмена для различных зданий и сооружений занимались многие ученые, составлены нормативные акты [1, 2, 4, 12]. При этом разработчики для поддержания искусственного микроклимата ( $t_v$ ,  $\phi_v$ ,  $V_v$ ) в помещениях основывались на применении схем воздухообменов «сверху вниз», «снизу вверх», «сверху вверх» и др. Аналогичный подход предусматривается и в основных нормах при проектировании системы вентиляции и кондиционирования воздуха в православных соборах [1, 2, 10].

На основе проведенного авторами анализа существующих рекомендаций и методик расчета воздухообмена для православных соборов можно сделать вывод, что на данный период у проектировщиков вентиляции и кондиционирования воздуха отсутствует стандартная отраслевая методика расчета оптимального воздухообмена. При расчете воздухообмена в залах богослужения по схемам «сверху вниз», «снизу вверх», «сверху вверх» с использованием существующих методик расчета и схем воздухообмена приходится учитывать разбавление всех теплоизбытков и других специфических вредностей, выделяющихся в залах для богослужения. Это ведет к значительному завышению количества приточного воздуха и экономически необоснованным затратам на его приготовление и приобретение оборудования.

В связи с этим авторы статьи для решения проблемы предлагают использовать в православных соборах вытесняющую систему вентиляции и кондиционирования воздуха и схему воздухообмена «снизу вверх» [3, 12]. При этой схеме приточный воздух подается непосредственно в нижнюю зону зала богослужения, где находятся прихожане. В этом случае предлагается рассчитывать воздухообмен для ассимиляции только части теплоизбытков и других вредностей, поступающих в нижнюю зону высотой до 2 метров от пола. Остальная часть вредностей конвективным потоком вытесняется в верхнюю зону зала богослужения и удаляется наружу. Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что существующие методики расчета воздухообмена эти особенности не учитывают и, следовательно, не могут использоваться для оптимального расчета воздухообмена применительно к разработанной системе кондиционирования воздуха вытесняющего типа и схеме воздухообмена «снизу сверху» в залах богослужения православных соборов. В данном случае рекомендуется применять классические формулы и зависимости для расчета воздухообменов при разбавлении вредностей и поддержания требуемых параметров микроклимата [9]. При этом в известные методики предлагается включить показатели, уточняющие

количество вредностей, поступающих в нижнюю зону и удаляемых из верхней зоны зала богослужения.

Традиционно объемы воздухообмена в соборах рассчитываются в зависимости от количества вредностей, поступающих в зал богослужения. Известно, что основными вредностями в зале богослужения являются выделяющиеся от прихожан и служителей теплота, влага и углекислый газ, а также тепlopоступления от освещения и горящих свечей; кроме того, вредными выделениями являются пыль, сажа, копоть и влага от лампад, кадил и сгорания свечей. В теплый период года теплота в зал поступает от солнечной радиации через наружные ограждения, стены, остекление и покрытия [4, 5, 8, 13].

Указанные вредности отрицательно отражаются на микроклимате в зале богослужения и на убранстве собора [5, 7, 9, 11]. Климатическое обеспечение в залах богослужения необходимо проектировать в соответствии с требованиями нормативных документов на проектирование отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха [1, 2, 6, 10]. Вентиляция и кондиционирование в залах богослужения предусматривается для обеспечения допустимых и оптимальных климатических нормативов внутреннего воздуха.

Допустимые параметры внутреннего воздуха в соборах, рекомендуемые в отраслевых стандартах АВОК и обеспечиваемые системой вентиляции, приведены в табл. 1 [1].

Т а б л и ц а 1

## Допустимые параметры внутреннего воздуха в соборах

Период года	Наименование помещения	Параметры воздуха		
		$t_{в}, ^\circ\text{C}$	$\phi_{в}, \%$	$V_{в}, \text{м/с}$
Холодный и переходный	Алтарь	14...16	30...55	0,1
	Ризница, диаконский предел	14...16	30...55	0,2
	Центральная часть собора	12...14	30...55	0,2
Теплый	Другие помещения	$\leq 28$	$\leq 75$	$\leq 0,3$

Оптимальные параметры внутреннего воздуха в помещении православного собора, рекомендуемые в стандартах АВОК и поддерживаемые с помощью системы кондиционирования, приведены в табл. 2 [1, 2].

Т а б л и ц а 2

## Оптимальные параметры внутреннего воздуха в соборах

Период года	Наименование помещения	Параметры воздуха		
		$t_{в}, ^\circ\text{C}$	$\phi_{в}, \%$	$V_{в}, \text{м/с}$
Холодный и переходный	Алтарь	16	40...55	0,1
	Ризница, диаконский предел	16	40...55	0,2
	Центральная часть собора	14	40...55	0,2
Теплый	Другие помещения	20...22	50...55	0,2
		23...25	50...55	0,2

Расчет системы вентиляции и кондиционирования воздуха предлагается осуществлять исходя из максимальных воздухообменов, полученных для ассимиляции поступающих в зал богослужения вредностей. В теплый период года воздухообмен рассчитывается по суммарным теплоизбыткам.

Расход приточного воздуха для разбавления выделяющейся теплоты от различных источников рассчитывается по следующей формуле [1, 4, 6]:

$$L_{\text{пр}} = \frac{3,6 \sum Q}{(i_{\text{yx}} - i_{\text{пр}}) \times \rho_{\text{в}}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (1)$$

где  $\sum Q$  – суммарные теплоизбытки в зале богослужения, Вт;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность внутреннего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $i_{\text{yx}}, i_{\text{пр}}$  – соответственно энтальпия уходящего и приточного воздуха, кДж/кг.

В любой период года расчет приточного воздуха для ассимиляции водяного пара рекомендуется производить по формуле [7, 8, 10]:

$$L_{\text{пр}} = \frac{\sum G_{\text{w}}}{(d_{\text{yx}} - d_{\text{пр}}) \times \rho_{\text{в}}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (2)$$

где  $\sum G_{\text{w}}$  – суммарные влаговыделения в зале богослужения, кг/ч;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность внутреннего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $d_{\text{yx}}, d_{\text{пр}}$  – соответственно влагосодержание уходящего и приточного воздуха, г/кг с.в.

Расход приточного воздуха для разбавления углекислого газа, выделяемого в зале богослужения собора, рассчитывается по формуле [6, 7, 8, 10]:

$$L_{\text{пр}} = \frac{\sum G_{\text{CO}_2}}{(C_{\text{в}} - C_{\text{пр}})}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (3)$$

где  $\sum G_{\text{CO}_2}$  – количество углекислого газа, выделяемого людьми, при сгорании свечей и действии кадил в зале богослужения, л/ч;  $C_{\text{в}}, C_{\text{пр}}$  – соответственно концентрация углекислого газа у внутреннего и приточного воздуха, л/м<sup>3</sup>.

По формуле (3) предлагается определять  $L_{\text{пр}}$  для ассимиляции копоти, сажи и других вредностей при известных значениях их концентрации.

Проведенные авторами расчеты показали, что в холодный период года максимальный расход приточного воздуха  $L_{\text{пр}}$ , м<sup>3</sup>/ч, требуется для ассимиляции углекислого газа, поступающего в зал богослужения собора от разных источников.

В статье представлена разработанная на основании полученных результатов исследования для теплого периода года методика расчета воздухообменов систем вентиляции и кондиционирования воздуха вытесняющего типа в залах богослужения православных соборов. Как показало исследование, из всего количества теплоты, выделяемой в зале богослужения от оборудования (кадил, лампад и др.), освещения, сгорания свечей, теплопоступлений от солнечной радиации через стены, покрытия, световые проемы, от людей в нижнюю зону пребывания прихожан поступает незначительная часть, которая уточняется с помощью коэффициентов теплопоступлений  $k$ :

$$(k_1 Q_{\text{обор}}; k_2 Q_{\text{осв}}; k_3 Q_{\text{рад верт}}; k_4 Q_{\text{рад покр}}; k_5 Q_{\text{рад ост}}; k_6 Q_{\text{люд}}; k_7 Q_{\text{свеч}})$$

Остальная часть теплоизбытков  $(1 - k_i) Q_i$  вытесняется конвективным потоком в верхнюю зону, откуда удаляется наружу с уходящим воздухом.

Числовые значения коэффициентов теплопоступлений ( $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$ ) определяются экспериментально и характеризуют количество теплоты, поступающей в нижнюю зону до 2 метров от пола соответственно от оборудования, освещения, солнечной радиации через стены, покрытия и остекление, а также от людей и горения свечей.

Тогда общее количество приточного воздуха ( $L_{\text{пр}}$ , м<sup>3</sup>/ч), необходимого для ассимиляции и вытеснения тепловыделений из нижней в верхнюю зону зала богослужения, а также обеспечения требуемых параметров микроклимата, определяется по формуле

$$L_{\text{пр}} = \frac{3,6 \cdot \left( k_1 Q_{\text{обор}} + k_2 Q_{\text{осв}} + k_3 Q_{\text{рад верт}} + k_4 Q_{\text{рад покр}} + k_5 Q_{\text{рад ост}} + k_6 Q_{\text{люд}} + k_7 Q_{\text{свеч}} + Q_{\text{пр}} \right)}{K_3 (i_{\text{yx}} - i_{\text{пр}}) \cdot \rho_{\text{в}}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (4)$$

где  $i_{yx}-i_{пр}$  – соответственно энтальпия уходящего и приточного воздуха, кДж/ кг с.в.;  $\rho_{в}$  – плотность внутреннего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $Q_{пр}$  – прочие теплопоступления в количестве 5 % от суммарного количества, Вт;  $K_3$  – коэффициент эффективности воздухообмена.

Коэффициент  $K_3$  для разработанной системы кондиционирования воздуха вытесняющего типа определяется по формуле

$$K_3 = \frac{t_{yx} - t_{пр}}{t_{в} - t_{пр}}, \quad (5)$$

где  $t_{пр}$ ,  $t_{yx}$ ,  $t_{в}$  – соответственно температура внутреннего, приточного и удаляемого воздуха из верхней зоны, °С.

Проведенные авторами исследования показали, что для системы кондиционирования воздуха вытесняющего типа величина коэффициента  $K_3$  значительно больше единицы и может достигать параметров 2,5–4, что подтверждает высокую эффективность разработанной системы вытесняющего типа и схемы подачи приточного воздуха в нижнюю зону с его удалением из верхней зоны зала богослужения.

Температура уходящего (удаляемого) воздуха  $t_{yx}$ , °С зависит от величины теплопоступлений в верхнюю зону зала богослужения:  $(1-k_1) \times Q_{обор}$ ;  $(1-k_2) \times Q_{осв}$ ;  $(1-k_3) \times Q_{рад\ верг}$ ;  $(1-k_4) \times Q_{рад\ покp}$ ;  $(1-k_5) \times Q_{рад\ стат}$ ;  $(1-k_6) \times Q_{люд}$ ;  $(1-k_7) \times Q_{свеч}$ ;  $Q_{пр}$  – и количества удаляемого воздуха  $L_{yx}$ , м<sup>3</sup>/ч.

Исходя из вышеизложенного,  $t_{yx}$ , °С, вычисляем по формуле

$$t_{yx} = \frac{3,6 \cdot \left[ (1-k_1)Q_{обор} + (1-k_2)Q_{осв} + (1-k_3)Q_{рад\ верг} + (1-k_4)Q_{рад\ покp} + (1-k_5)Q_{рад\ стат} + (1-k_6)Q_{люд} + (1-k_7)Q_{свеч} + Q_{пр} \right]}{3,6L_{yx} C_{yx} \rho_{yx}}, \quad (6)$$

где  $C_{yx}$  – теплоемкость удаляемого воздуха, кДж/(кг·°С);  $L_{yx}$  – рекомендуемая кратность воздухообмена по санитарным нормам, м<sup>3</sup>/ч;  $\rho_{yx}$  – плотность удаляемого воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Усредненные значения коэффициентов теплопоступлений  $k_i$ , полученные авторами экспериментальным путем для теплого и холодного периодов, приведены в табл. 3.

При расчете воздухообменов  $L_{пр}$  в теплый период года учитываются в формуле (6) теплопоступления, уточненные коэффициентами  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ ,  $k_5$ ,  $k_6$ ,  $k_7$ , в холодный период – только  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_6$ ,  $k_7$ .

Т а б л и ц а 3

Усредненные численные значения коэффициентов теплопоступлений

Теплопоступления в помещении	Коэффициенты теплопоступлений $k$													
	В нижнюю зону зала							В верхнюю зону зала						
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_7$	$1-k_1$	$1-k_2$	$1-k_3$	$1-k_4$	$1-k_5$	$1-k_6$	$1-k_7$
В нижнюю зону зала богослужения	0,55	0,45	0,4	0,2	0,35	0,65	0,55	-	-	-	-	-	-	-
В верхнюю зону зала богослужения	-	-	-	-	-	-	-	1-0,45	1-0,55	1-0,6	1-0,8	1-0,65	1-0,35	1-0,55

Разработанная инженерная методика позволяет рассчитывать воздухообмен для ассимиляции теплоизбытков с помощью системы кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции и схемы воздухообмена «снизу вверх» в залах богослужения православных соборов.

Далее приводится методика расчета воздухообмена в холодный период года для разбавления углекислого газа, поступающего в зал богослужения православного собора от прихожан и персонала  $G_{люд}$ , горения свечей  $G_{свеч}$ , кадил  $G_{кад}$ , лампад  $G_{лам}$  и

прочих источников  $G_{пр}$  [4, 5, 7]. Для этого предлагается аналогичный подход как и при ассимиляции теплоизбытков. При этом используются формула (3) и уточняющие коэффициенты поступления углекислого газа ( $C$ ) в нижнюю зону зала богослужения на уровень до 2 метров от уровня пола:  $C_1 \times Q_{люд}$ ;  $C_2 \times Q_{свеч}$ ;  $C_3 \times Q_{кад}$ ;  $C_4 \times Q_{лампы}$ ;  $Q_{пр}$ . Другая часть  $(1-C_i)$  вместе с конвективным потоком вытесняется в верхнюю зону зала и далее удаляется в атмосферу.

Количественные значения уточняющих коэффициентов  $C_1, C_2, C_3, C_4$  авторами определены опытным путем и приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Усредненные численные значения уточняющих коэффициентов поступления углекислого газа

Поступление углекислого газа в помещение	Значения коэффициентов поступления углекислого газа в помещение				
	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_{пр}$
Нижняя зона зала богослужения православного собора	0,64	0,45	0,7	0,6	1

Общее количество приточного воздуха, подаваемого в зал богослужения православного собора в холодный период года  $L_{пр}$ ,  $m^3/ч$ , для разбавления и вытеснения углекислого газа из нижней в верхнюю зону зала и обеспечения требуемых параметров микроклимата рассчитывается по формуле

$$L_{пр} = \frac{C_1 Q_{люд} + C_2 Q_{свеч} + C_3 Q_{кад} + C_4 Q_{лампы} + Q_{пр}}{C_{вн} - C_{прит}}, m^3/ч, \quad (7)$$

где  $C_{вн}$ ,  $C_{прит}$  – концентрация углекислого газа соответственно у внутреннего и приточного воздуха,  $л/м^3$ ;  $Q_{проч}$  – прочие поступления углекислого газа, 3 % от общего количества,  $m^3/ч$ .

К преимуществам системы кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции и схемы движения воздуха «снизу вверх» по сравнению с системой перемешивающего типа относятся:

- приточный воздух подается чистым в зону нахождения прихожан;
- приточный воздух не перемешивается с внутренним воздухом в нижней зоне зала, а вытесняет его к вытяжным устройствам;
- обеспечивается движение приточного воздуха совместно с движением конвективных потоков;
- создается устойчивый конвективный поток в центре зала, вытесняющий загрязненный воздух в верхнюю зону, что препятствует попаданию вредностей на стены, иконы, фрески и другие убранные;
- воздухообмен сокращается до 55 % и более;
- параметры внутреннего воздуха в нижней зоне обеспечиваются при оптимальных энергозатратах, которые снижаются до 45 %.

Указанные преимущества подтверждают достаточно высокую эффективность разработанной системы вентиляции и кондиционирования воздуха вытесняющего типа и схемы воздухообмена «снизу вверх».

#### Список литературы

1. АВОК. Стандарт – 2-2004. Храмы православные. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: отраслевой стандарт: дата введения НП «АВОК» 09.06.04. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2004. – 14 с.

2. МДС 31-9.2003. Православные храмы. Т.2. Православные храмы и комплексы / Архитектурно-художественный центр Московской Патриархии; сост. М.Ю. Кеслер. – М.: Технорматив, 2008. – 194 с.
3. Кочев, А.Г. Микроклимат православных храмов: монография / А.Г. Кочев; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2004. – 449 с.
4. Чем дышат храмы? Благовест. – URL: <http://blagovest.ru/blog/chem-dyshatphramy>, свободный – (11.01.2020).
5. СП 31-103 – 99. Здания, сооружения и комплексы православных храмов / Госстрой России. – М.: АХЦ «Арххрам», ГУП ЦПП, 2000.
6. Щукина, Т.В. Влияние на микроклимат количества людей при разной заполнимости храмов / Т.В. Щукина, Н.А. Драпалюк, М.Н. Шерлыкина, М.А. Бойченко // СОК. – 2019. – № 11. – С.66–69.
7. Кочев, А.Г. Особенности создания микроклимата в православных храмах / А.Г. Кочев, М.М. Соколова, А.С. Сергиенко, А.С. Москалева, Е.А. Кочева // Известия ВУЗов. Строительство. – 2016. – № 4. – С.74–82.
8. Девина, И.В. Микроклимат церковных зданий. Основы нормализации температурно-влажностного режима памятников культурной архитектуры / И.В. Девина, И.В. Илларионова. – М.: РИО ГосНИР, 2000 – 120с.
9. СП 391.132.5800. 2018. Храмы православные. Правила проектирования / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. – М., 2018.
10. Еремкин, А.И. Разработка комбинированной естественно-механической вытесняющей вентиляции в соборе святых Первоверховных апостолов Петра и Павла, г. Пенза. Аллея науки / А.И. Еремкин, К.А. Петрова. – URL: [https://www.alleyscience.ru/domains\\_data/files/13January2019/RAZRABOTKA%20KOMBINIROVANNOY%20ESTESTVENNOMENANICHESKOY%20VYTESNYaYuShEY%20VENTILYaCII%20V%20SOBORE%20SVYaTYH%20PERVOVERHOVNYYH.pdf](https://www.alleyscience.ru/domains_data/files/13January2019/RAZRABOTKA%20KOMBINIROVANNOY%20ESTESTVENNOMENANICHESKOY%20VYTESNYaYuShEY%20VENTILYaCII%20V%20SOBORE%20SVYaTYH%20PERVOVERHOVNYYH.pdf) свободный – (01.06.2020).
11. Ливчак, А.В. Вытесняющая вентиляция в школах / А.В. Ливчак // АВОК. – 2004. – №8. – С. 12–15.
12. Еремкин, А.И. Совершенствование путей энергосбережений объектов капитального строительства при реализации национальных проектов / А.И. Еремкин // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №2. – С. 48–53.

## References

1. АВОК. Standard – 2-2004. Orthodox churches. Heating, ventilation and air conditioning: industry standard: date of introduction of NP АВОК 09.06.04. – М.: АВОК-PRESS, 2004. – 14p.
2. MDS 31-9.2003. Orthodox churches. Vol.2. Orthodox churches and complexes / Architectural and Art Center of the Moscow Patriarchate; compiled by M.Yu. Kesler. – М.: Technical standard, 2008. – 194 p.
3. Kochev A.G. The microclimate of Orthodox churches: monograph / A.G. Kochev; Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering. – Nizhny Novgorod: NNGASU, 2004. – 449 p.
4. How temples breathe? The gospel. – URL: <http://blagovest.ru/blog/chem-dyshatphramy>, free – (11.01.2020).
5. ISP 31 – 103 – 99. Buildings, structures and complexes of Orthodox churches / Gosstroy of Russia. – М.: The Arkhkhram Art Center, State Unitary Enterprise TsPP, 2000.
6. Schukina, T.V. The effect on the microclimate due to number of people with different occupancy of temples / T.V. Schukina, N.A. Drapalyuk, M.N. Sherlykina, M.A. Boychenko // SOK. – 2019. – No. 11. – P.66–69.

7. Kochev, A.G. Features of creating a microclimate in Orthodox churches / A.G. Kochev, M.M. Sokolova, A.S. Sergienko, A.S. Moskaleva, E.A. Kocheva // Bulletin of universities. Building. – 2016. – No. 4. – P.74–82.

8. Devina, I.V. Microclimate of church buildings. Fundamentals of normalizing the temperature-wet regime of cultural architecture monuments / I.V. Devina, I.V. Illarionova.– M.: RIO GosNIR, 2000 – 120 p.

9. SP 391.132.5800. 2018. Orthodox churches. Design rules. / Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. – M., 2018.

10. Eremkin, A.I. Development of combined natural-mechanical displacement ventilation in the Cathedral of the Holy Apostles Peter and Paul of the city of Penza. Alley of Science / A.I. Eremkin, K.A. Petrova. – URL: [https://www.alleyofscience.ru/domains\\_data/files/13January2019/RAZRABOTKA%20KOMBINIROVANNOY%20ESTESTVENNOMEHANICHESKOY%20VYTESNYaYuShEY%20VENTILYaCII%20V%20VYEFYORE%202020](https://www.alleyofscience.ru/domains_data/files/13January2019/RAZRABOTKA%20KOMBINIROVANNOY%20ESTESTVENNOMEHANICHESKOY%20VYTESNYaYuShEY%20VENTILYaCII%20V%20VYEFYORE%202020).

11. Livchak, A.V. Displacing ventilation in schools / A.V. Livchak // ABOK. – 2004. – No. 8. – P. 12–15.

12. Eremkin, A.I. Improving the ways of energy saving of capital construction projects during the implementation of national projects / A.I. Eremkin // Regional architecture and engineering. – 2020. – N 2. – P. 48–53.

УДК 698

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

**Ерёмкин Александр Иванович**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

*Пензенский государственный аграрный университет*

Россия, 440014, г. Пенза,  
ул. Ботаническая, д.30,  
тел.: (8412) 628-359; факс: (8421) 628-354

**Пономарева Инна Константиновна**,  
кандидат экономических наук,  
доцент кафедры «Управление, экономика  
и право»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

**Eremkin Alexander Ivanovich**,  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Heat, Gas Supply  
and Ventilation»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

*Penza State Agrarian University*

Russia, 440014, Penza, 30,  
Botanicheskaya St.,  
tel.: (8412) 628-359; fax: (8412) 628-354

**Ponomareva Inna Konstantinovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Management, Economics  
and Law»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПУТЕЙ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ

А.И. Еремкин, И.К. Пономарева

Модель контракта на жизненный цикл позволяет заказчику делегировать проектные, строительные и эксплуатационные риски подрядчику и сосредоточиться на ключевых показателях качества объекта капитального строительства и мониторинге поставленных задач. Величина эксплуатационных издержек прямо пропорциональна качеству выполненных работ, что стимулирует повышение качества работ на всех стадиях производства.

*Ключевые слова: капитальное строительство, комфортная среда, контракт жизненного цикла, национальный проект, ресурсосбережение, энергосбережение*

## IMPROVEMENT OF ENERGY SAVING OF CAPITAL CONSTRUCTION OBJECTS UNDER THE IMPLEMENTATION OF NATIONAL PROJECTS

A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva

The model of the life cycle contract helps the customer to delegate design, construction and operational risks to the developer and focus on key indicators of the capital construction project and monitoring tasks. The value of operating costs is directly proportional to the quality of work performed, that stimulates an increase in the quality of work at all stages of production.

*Keywords: capital construction, comfortable environment, life cycle contract, national project, resource saving, energy saving*

Состояние и развитие инвестиционно-строительной отрасли в Российской Федерации и ее субъектах представлено в нормативно-правовых актах, отражающих жилищную политику нашего государства, а именно в национальных проектах Российской Федерации поставлены основные приоритеты развития строительной индустрии на ближнюю и дальнюю перспективу. Учитывая высокий уровень неопределенности, значительную мультиформатность и востребованность проявления такого

феномена, как прорывное научно-технологическое и социально-экономическое развитие на основе реализации национальных проектов, выделяют одно из ключевых направлений обеспечения этой национальной стратегии – управление объектами капитального строительства и недвижимости в процессе их воспроизводства и содержания, как ключевыми элементами национального богатства страны [1].

Проводились исследования развития объектов капитального строительства на основе контрактов на жизненные циклы при реализации таких национальных проектов, как «Жилье и городская среда», «Безопасные и качественные автомобильные дороги», «Мосты и путепроводы» и др. Такой подход позволит обеспечить создание комфортной среды, реализацию энергосберегающих и ресурсосберегающих мероприятий в процессе строительства на всем жизненном цикле объекта эксплуатации, что положительно скажется на экономике страны и условиях проживания граждан.

Основная проблемная ситуация при реализации национальных проектов заключается в действии двух взаимоисключающих тенденций [2]:

– во-первых, это приоритет повышения энергоэффективности, энергосбережения, импортозамещения, увеличения количества используемых современных технологий, материалов и научно-технических достижений в строительстве продукции инновационного характера при создании комфортных условий для жизнедеятельности, что потребует значительных дополнительных инвестиций;

– во-вторых, формирование государственных контрактов на жизненные циклы приведет к экономии бюджетных средств, сокращению стоимости инвестиционных проектов и объектов капитального строительства в процессе воспроизводства всех типов недвижимости, что потребует ввода достаточного количества доступного жилья, в том числе социального типа, при реализации национального проекта «Жилье и городская среда», строительства большого количества безопасных автомобильных дорог в ходе выполнения национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги», ремонта мостов и путепроводов, находящихся в аварийном и предаварийном состоянии в рамках реализации национального проекта «Мосты и путепроводы».

Для оценки влияния контракта жизненного цикла на качество объектов строительства, сроки эксплуатации, экономию капитальных вложений, энергоэффективность и комфортные условия проживания проанализируем национальный проект «Жилье и городская среда», срок реализации которого 2018-2024 гг. [3].

В рамках контракта жизненного цикла важно обозначить цели данного национального проекта:

– обеспечение доступным жильем семей со средним достатком, в том числе создание возможностей для приобретения (строительства) ими жилья с использованием ипотечного кредита, ставка по которому должна быть менее 8 процентов, строительство;

– развитие арендного жилья для граждан с низким достатком;

– увеличение объема жилищного строительства не менее чем до 120 млн квадратных метров в год;

– кардинальное повышение комфортности городской среды, увеличение индекса качества городской среды на 30 процентов, сокращение в соответствии с этим индексом количества городов с неблагоприятной средой проживания в два раза;

– создание эффективного механизма прямого участия граждан в формировании комфортной городской среды, увеличение доли граждан, принимающих участие в решении вопросов развития городской среды;

– обеспечение устойчивого сокращения непригодного для проживания жилищного фонда;

– развитие малоэтажного комфортного деревянного строительства;

– планирование и строительство взамен непригодного жилья экономкласса.

Для достижения поставленных целей рассмотрим следующие задачи проекта:

– совершенствование механизмов финансирования жилищного строительства, в том числе посредством развития рынка ипотечных центров и строительства арендного жилья, поэтапного перехода от привлечения денежных средств для долевого строительства многоквартирных домов и иных объектов недвижимости к другим

формам финансирования жилищного строительства, обеспечивающим защиту прав граждан и снижение рисков для них;

- модернизация строительной отрасли и повышение качества индустриального жилищного строительства, в том числе посредством установленных ограничений на использование устаревших технологий и стимулирования внедрения передовых технологий в проектировании и строительстве, совершенствование механизмов государственной поддержки строительства стандартного жилья;

- снижение административной нагрузки на подрядчиков и застройщиков, совершенствование нормативно-правовой базы и порядка регулирования в сфере жилищного строительства;

- обеспечение эффективного использования земель в целях массового жилищного строительства при условии сохранения и развития зеленого фонда и территорий, на которых располагаются природные объекты, имеющие экологическое, историко-культурное, рекреационное, оздоровительное и иное ценное значение;

- реализация мероприятий, осуществляемых федеральными органами власти и исполнительной власти субъектов РФ, по оказанию гражданам поддержки в улучшении жилищных условий, включая обеспечение жильем категорий граждан, установленных федеральным законодательством, многодетных и молодых семей;

- развитие среднего профессионального образования в области строительства, городского хозяйства и архитектуры, а также реализация программ по повышению квалификации специалистов в данных направлениях;

- создание механизмов развития комфортной городской среды, комплексного развития городов и других населенных пунктов с учетом качества городской среды;

- создание механизмов переселения граждан из непригодного для проживания жилищного фонда, обеспечивающих соблюдение их жилищных прав, установленных законодательством РФ.

Для реализации национального проекта «Жилье и городская среда» к 2024 году Правительство РФ обеспечивает необходимые условия и ставит следующие задачи [4]:

- увеличение доступности ипотечных кредитов и снижение ставки по ним до 8 %;

- ежегодное введение в строй 120 миллионов квадратных метров жилья.

Рассматриваемый национальный проект предполагает в течение шести лет ежегодный ввод в эксплуатацию более 1,5 миллиона квартир и триста тысяч индивидуальных домов; наряду с этим предусматривается повышение индекса качества городской среды на 30 процентов и сокращение количества городов с неблагоприятной средой в два раза, а также создание действенного механизма расселения граждан из аварийного жилья.

Тридцать миллионов российских семей должны переселиться из аварийного в комфортное жилье в течение шести лет реализации национального проекта «Жилье и городская среда». При этом важно строить жилые дома для переселения граждан в местах их постоянного проживания. На эти цели будет направлено около одного триллиона рублей, при этом 90 % средств поступят из федерального бюджета, остальные – из регионов и муниципалитетов, плюс средства из внебюджетных источников. Ежегодно планируется расселять не менее пяти миллионов единиц аварийного жилищного фонда [5].

Для этого предполагается финансовое обеспечение реализации национального проекта: 2019 год – 6 млрд рублей; 2020 год – 4,3 млрд рублей; 2021 год – 3,6 млрд рублей. Одним из путей решения задач является контракт жизненного цикла, который позволит обеспечить качество строительства объектов и сокращение затрат на весь период цикла

Актуальность контракта жизненного цикла рассмотрим на примере национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» (2018-2024гг.), на реализацию которого из бюджета РФ выделены средства в размере 4,7 млрд руб.

Целями данного проекта являются:

- увеличение доли автомобильных дорог регионального значения, соответствующих нормативным требованиям, в их общей протяженности не менее чем до 50 % (относительно их протяженности по состоянию на 31 декабря 2017 г.);
- снижение доли автомобильных дорог федерального и регионального значения, работающих в режиме перегрузки, в их общей протяженности на 10 % по сравнению с 2017 г.;
- уменьшение количества мест концентрации ДТП (аварийно-опасных участков) на дорожной сети в два раза по сравнению с 2017 г.;
- снижение смертности в результате ДТП в 3,5 раза по сравнению с 2017 г. до уровня, не превышающего четырех человек на 100 тыс. населения (к 2030 г. стремление к нулевому уровню смертности);
- создание Реестра новых и наилучших технологий, материалов и технологических решений повторного применения и доведение доли контрактов на осуществление дорожной деятельности в рамках нацпроекта, предусматривающих использование новых технологий и материалов, включенных в Реестр, до 80 % к концу 2024 г.;
- доведение доли контрактов на осуществление дорожной деятельности в рамках национального проекта, предусматривающих выполнение работ на принципах контракта жизненного цикла, объединяющего в один контракт различные виды дорожных работ, до 70 % к концу 2024 г. в общем объеме новых государственных контрактов на выполнение работ по капитальному ремонту, ремонту и содержанию автомобильных дорог;
- увеличение доли автомобильных дорог Минобороны России, соответствующих нормативным требованиям, до 60 % к концу 2024 г.

Для реализации целей национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» поставлены следующие задачи:

- ежегодное выполнение дорожных работ на сети автомобильных дорог общего пользования в целях приведения их в нормативное состояние;
- принятие нормативно-правовых актов, предусматривающих доведение норматива зачисления налоговых доходов бюджетов субъектов РФ от акцизов до 100 %;
- внесение изменений в Бюджетный кодекс РФ, предусматривающих увеличение коэффициента для формирования базового размера Федерального дорожного фонда;
- создание федерального центра по координации работы по профилактике нарушений норм и правил в области дорожного движения;
- обеспечение функционирования автоматизированной информационной системы тахографического контроля в целях соблюдения водителями транспортных средств режима труда и отдыха;
- поставка хроматографов для выявления состояния опьянения в районные медучреждения и др.

В итоге решения вышепоставленных задач и проблем планируется к 2024 году выйти на следующие показатели:

- создание и введение в действие Реестра новых и наилучших технологий, материалов и технологических решений повторного применения;
- принятие нормативно-правовых актов, направленных на совершенствование системы профессиональной подготовки водителей;
- внедрение и обеспечение функционирования информационной системы контроля за формированием и использованием средств дорожных фондов всех уровней, а также ежегодная актуализация внесенных в нее данных;
- развитие системы организации движения транспортных средств и пешеходов, повышение безопасности дорожных условий;
- развитие системы оказания помощи пострадавшим в ДТП;
- принятие нормативных правовых актов, направленных на усиление ответственности за отдельные наиболее опасные правонарушения в области дорожного движения;
- обеспечение безопасного участия детей в дорожном движении и др.

Мероприятия, предусмотренные федеральными проектами, согласно результатам коллективной экспертной оценки, являются эффективными и достаточными для достижения национальных целей развития Российской Федерации на период до 2024 года. Целесообразность данных мероприятий также подтверждена методом коллективной экспертной оценки, проводившейся с учетом необходимости оптимизации финансирования указанных мероприятий.

Приведение автомобильных дорог в нормативное состояние способствует повышению качества жизни населения, экономическому и социальному развитию субъектов Российской Федерации, улучшению экономических связей между субъектами Российской Федерации и качества предоставляемых автотранспортных услуг. Реализация данных мероприятий национального проекта обеспечит позитивные демографические тренды, а также социально-экономическое развитие регионов.

Контракты на жизненные циклы объектов дорожного капитального строительства, по мнению авторов, будут способствовать:

- увеличению доли контрактов, предусматривающих использование новых технологий и материалов на основе импортозамещения;
- увеличению доли автомобильных дорог регионального, межмуниципального значения и дорожной сети городских агломераций, соответствующих нормативным требованиям.

Приведем пример укрупненного алгоритма подготовки и заключения контрактов на жизненные циклы объектов капитального строительства при реализации национальных проектов:

- проведение мониторинга заключенных ранее контрактов;
- проведение сравнительной оценки заключенных (действующих) контрактов и контрактов, планируемых к заключению;
- оценка возможности увеличения объемов/видов работ в рамках планируемых к заключению контрактов, укрупнения лотов при заключении контрактов, пересмотра условий действующих контрактов в соответствии с Федеральным законом от 05.04.2013 N 44-ФЗ, пересмотра условий действующих контрактов в соответствии с Федеральным законом от 18.07.2011 N 223-ФЗ;
- выявление возможности включения дополнительных видов работ в контракты, заключенные и/или заключаемые;
- оценка планов работ по конкретному объекту капитального строительства с учетом прогнозируемого изменения действующих нормативных правовых актов;
- включение условий о выполнении показателя в соглашение о предоставлении иных межбюджетных трансферов;
- выбор способа размещения государственного заказа (по Федеральному закону от 05.04.2013 N 44-ФЗ или по Федеральному закону от 18.07.2011 N 223-ФЗ);
- подготовка документации для заключения контрактов на жизненные циклы объектов капитального строительства с учетом информации, выводов и решений, принятых по вышеперечисленным пунктам;
- принятие акта высшего органа исполнительной власти субъекта РФ, муниципального образования по вопросу укрупнения лотов и/или видов (объемов) работ с прямым указанием на необходимость выполнения Указа от 07.05.2018 года N 204;
- заключение контрактов на жизненные циклы объектов капитального строительства в рамках конкурсной документации;
- выполнение работ, сдача результатов.

По мнению авторов, предполагаемая начальная (максимальная) цена контракта на жизненные циклы объектов капитального строительства может (в том числе) рассчитываться и заключаться в ценах составления проектно-сметной документации единым документом. При этом могут быть использованы различные обосновывающие подходы, не противоречащие действующему законодательству Российской Федерации.

Заключение контракта жизненного цикла объектов капитального строительства в рамках общего контракта на стадии проектирования, строительства и эксплуатации позволит решить цели и задачи, предусмотренные в рамках реализации национальных проектов в РФ.

В дальнейших исследованиях при заключении контрактов жизненного цикла необходимо провести анализ рисков и преимуществ для заказчика и подрядной организации в области капитального строительства. В ходе тематического исследования важно представить математический алгоритм оценки влияния контракта жизненного цикла в целом на экономику объектов капитального строительства.

### Список литературы

1. Баронин, С.А. Стоимостное моделирование жизненных циклов строительства зданий на основе совокупных затрат и оценка стоимости контрактов на жизненные циклы недвижимости / С.А. Баронин, К.Ю. Кулаков // Недвижимость: экономика, управление. – 2019. – №1. – С.32–38.
2. Правительство России. – URL: <http://government.ru/projects/selection/735/35560/>, свободный – (10.04.2020).
3. Правительство России. – URL: <http://government.ru/projects/selection/735/35558/>, свободный – (10.04.2020).
4. Еремкин, А.И. Энергосберегающие мероприятия при климатизации зданий за рубежом и в России / А.И. Еремкин, М.А. Горожанина // Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: сборник статей XX Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2019. – С. 59–63.
5. Баронин, С.А. Методические аспекты формирования и управления совокупной стоимостью жизненных циклов недвижимости с разным уровнем энергоэффективности / С.А. Баронин. – Пенза, 2017.
6. Еремкин, А.И. Об энергосбережении в строительстве / А.И. Еремкин, И.Н. Фильчакина // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2018. – № 5 (18). – С.153–162.
7. Еремкин, А.И. Пути эффективного потребления энергоресурсов при строительстве новых домов и ранее построенного жилого фонда / А.И. Еремкин, А.А. Савельев, А.Г. Багдасарян // Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: сборник статей XX Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2019. – С. 64–69.

### References

1. Baronin, S.A. Cost-based modeling of building construction life cycles based on total costs and cost estimation of contracts for real estate life cycles / S.A. Baronin, K.Yu. Kulakov // Real Estate: Economics, Management. – 2019. – No. 1. – P. 32–38.
2. The Government of Russia. – URL: <http://government.ru/projects/selection/735/35560/>, free – (10/04/2020).
3. The Government of Russia. – URL: <http://government.ru/projects/selection/735/35558/>, free – (10/04/2020).
4. Eremkin, A.I. Energy-saving measures in the climate control of buildings abroad and in Russia / A.I. Eremkin, M.A. Gorozhanina // Problems of Energy Saving in the Industrial and Housing and Communal Complexes: Collection of articles of the XX International Scientific and Practical Conference. – Penza, 2019. – P. 59–63.
5. Baronin, S.A. Methodological aspects of formation and management of total cost of life cycles of real estate with different levels of energy efficiency / S.A. Baronin. – Penza, 2017.
6. Eremkin, A.I. About energy saving in construction / A.I. Eremkin, I.N. Filchakina // Education and science in the modern world. Innovation. – 2018. – No. 5 (18). – P.153–162.
7. Eremkin, A.I. Ways of efficient energy consumption in the construction of new houses and previously built housing stock / A.I. Eremkin, A.A. Savelyev, A.G. Bagdasaryan // Problems of Energy Saving in Industrial and Housing and Communal Complexes: Collection of articles of the XX International Scientific and Practical Conference. – Penza, 2019. – P. 64–69.

# АРХИТЕКТУРА

# ARCHITECTURE

УДК 72.03 (470.40)

Филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России»  
Научно-исследовательский институт  
теории и истории архитектуры и  
градостроительства (НИИТИАГ)

Россия, 11024, г. 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  
Email: gulchachak.n@gmail.com

*Research Institute of Theory and History of  
Architecture and Urban Planning, Branch of  
the Central Research and Project Institute of  
Ministry of Construction, Housing and  
Utilities of the Russian Federation*

Russia, 110024, Moscow, 9, Dushinskaya St.,  
tel.: +7 (499) 951 82 72

**Nugmanova Gulchachak Gilemkanovna**,  
Candidate of Art History, leading researcher  
of the department of history of architecture  
and town planning of ancient world and  
middle ages  
Email: gulchachak.n@gmail.com

## ГУБЕРНСКИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМИССИИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫМИ ПРАКТИКАМИ В РОССИИ СЕРЕДИНЫ XIX ВЕКА\*

Г.Г. Нугманова

На основе не публиковавшихся ранее архивных материалов воссоздана история формирования губернских строительных комиссий в структуре Главного управления путей сообщения и публичных зданий. Установлено, что открыты они были с 1833 года только временно «в виде опыта» сроком на два года. На примере Казанской губернии показан процесс поиска оптимальной модели регионального архитектурно-строительного учреждения в России середины XIX века.

*Ключевые слова: губернские строительные комиссии, система управления, архитектурно-строительные практики, Казанская губерния*

## PROVINCIAL CONSTRUCTION COMMISSIONS IN ARCHITECTURAL AND CONSTRUCTION PRACTICES GOVERNANCE SYSTEM IN MID-NINETEENTH CENTURY RUSSIA

G.G. Nugmanova

The article offers a history of creation of provincial construction commissions as part of General directorate of communications and public buildings in mid-nineteenth century Russia. This study of

\* Исследование выполнено за счет средств Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013–2020 гг. в рамках плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН, тема 2020 г. «Управление архитектурно-градостроительными практиками в российской провинции, 1806-1860-е гг.: формирование института и опыт местных учреждений (случай Казанской губернии)».

local architectural and construction institutions introduced since 1833 temporarily “on an experimental basis” for a period of two years is based on un-published archival materials.

*Keywords: Provincial construction commissions, governance system, architectural and construction practices, Kazan Province*

Действовавшие с 1833 года в структуре Главного управления путей сообщения и публичных зданий губернские строительные комиссии являлись результатом реформирования архитектурно-строительной отрасли в рамках более масштабной программы правительства Николая I по «общему преобразованию в губерниях», направленной на дальнейшую централизацию бюрократического аппарата в стране и усиление власти «на местах». Знание о них в значительной степени ограничивается сведениями об открытии и преобразовании в 1849 году в губернские строительные и дорожные комиссии. Представленные в настоящей статье архивные материалы по Казанской губернии открывают неизвестные факты деятельности этих региональных учреждений, введенных в действие временно – «в виде опыта», который предстояло изучить и осмыслить.

Назначенное на 15 мая 1833 года открытие в регионах вместо существующих при губернских правлениях строительных экспедиций губернских строительных комиссий на деле затянулось. Первое заседание Казанской губернской строительной комиссии, сформированной пока из членов строительной экспедиции асессора К.А. Попова и губернского архитектора А.К. Шмидта, состоялось только в конце августа. Об открытии в Казани губернской строительной комиссии казанский военный губернатор С.С. Стрекалов доложил в Главное управление путей сообщения и публичных зданий [1–3].

Обязанности губернских строительных комиссий были прописаны в «Положении о новом образовании строительной части гражданского губернского ведомства» [4]. В соответствии с ним казанской комиссии предписывалось иметь планы, фасады и описи всем переданным в ее ведение гражданским общественным зданиям со сведениями о том, чем каждое из них было занято, когда построено и в каком состоянии находилось. Проверку ветхостей и повреждений надлежало производить регулярно, командировав для этого архитектора или инженерного офицера. На ответственности комиссий лежали разработка проектов и составление смет на перестройку существующих и строительство новых зданий, производство всех казенных работ по утвержденным проектам, составление технических отчетов для представления в ГУПСИПЗ. «Непосредственно предметом занятий» комиссии стали также частное строительство, построение и починка мостов, сочинение планов для Казани и уездных городов, устройство каменных и торцовых мостовых, улучшение водяных и сухопутных сообщений Казани с предместьями и слободами [1].

Разработка проектной документации для сторонних ведомств не вменялась в непрременную обязанность губернским строительным комиссиям, которые, тем не менее, должны были оказывать им всяческое содействие по распоряжению ГУПСИПЗ, но «без ощутительного отклонения от прямых своих обязанностей». Неоднократное повторение этой установки, например, в письме от 26 января 1834 года или циркулярах от 21 февраля и 10 октября 1834 года, касавшихся таможенного и почтового ведомств, придавало ей обязательный характер. В последнем случае вообще речь шла о безотлагательном удовлетворении требований почтовых контор по составлению планов и смет на устройство почтовых домов [5].

В первый же год обнаружилась настоятельная необходимость в усилении штата. Об этом в конце 1834 года заявил главноуправляющий К.Ф. Толь: «Некоторые губернские и областные строительные комиссии, иные прямо от себя, а другие чрез начальников губерний, представляли в разное время в Главное управление путей сообщения и публичных зданий о недостатке существующего для оных штата, и о предположениях своих по сему предмету». Данное обстоятельство побудило инициировать расширение состава комиссий, не дожидаясь завершения установленного для приобретения опыта двухлетнего срока («усматривая, что многие строительные комиссии действительно требуют некоторого усиления их способов»). От

подведомственных учреждений были затребованы «самые справедливейшие с устранением всяких излишних предположений местные сведения о тех в штат оных комиссий дополнениях, которые существенно необходимы по местному опыту и без коих комиссия обойти не может для всегда успешных своих действий».

Меры по усовершенствованию своего штата Казанская губернская строительная комиссия представила летом 1835 г. В первую очередь, по ее мнению, следовало увеличить с 500 до 750 рублей заработную плату архитекторскому помощнику. За два года попытка найти специалиста на назначенный Положением оклад оказалась безуспешной, позволив нанять лишь чертежника. Впрочем, как показал опыт, даже появление штатного помощника архитектора не могло в полной мере удовлетворить потребности по искусственной части. Чертежников требовалось не менее двух – при губернском архитекторе и офицере Корпуса инженеров путей сообщения. Их предлагалось изыскать из лучших кантонистов Казанского военного сиротского отделения «дабы они, с большею надежностью быв усовершенствованы в практических упражнениях под руководством означенных чиновников, могли быть навсегда полезны в делах комиссии по сей части». Кроме того, для лучшего наблюдения за строительством необходимо было добавить второго кондуктора, избрав его из тех же кантонистов. Второй блок предложений касался делопроизводства. Из-за большого объема сопровождавшей работу комиссии переписки она вынуждена была принять на службу сверх назначенных штатом четырех канцелярских служащих двух внештатных писарей. Эти штатные единицы предлагалось сохранить, выгадав на совмещении в одном лице должностей столоначальника и журналиста для ведения журналов по производству дел и протоколов комиссии. В результате численный состав губернских строительных комиссий увеличивался с шести до четырнадцати человек, включая асессора, губернского архитектора и его помощника, двух чертежников, двух кондукторов, секретаря, журналиста, совмещавшего обязанности столоначальника, и пять канцелярских служащих. Проект новых штатов, подписанный вице-губернатором Е.В. Филипповым, асессором К.А. Поповым, инженер-майором Деком и губернским архитектором Ф.И. Петонди, был препровожден в ГУПСИПЗ.

К этому времени подошел и срок представления губернскими комиссиями результатов своей двухгодичной деятельности. Управляющий ГУПСИПЗ К.Ф. Толь запросил от них предложения по параграфам *Положения о новом образовании строительной части гражданского губернского ведомства* от 29 сентября 1832 года. Заверив, что Главное управление бдительно следило за всеми вызывавшими вопросы случаями, снабжая комиссии «многими наставлениями и сведениями», он объявил о решимости немедленно приступить к завершению «сего весьма важного дела» – написанию окончательной версии документа. «Местные соображения и мнения» требовалось представить к первому января 1836 года; в случае игнорирования распоряжения или его неудовлетворительного выполнения Толь грозился отправить за сведениями своего курьера, возложив на виновника дорожные расходы [6].

Для удобства сравнения данные предлагалось оформить единообразно в виде таблицы, разделенной по вертикали на три столбца. В крайней левой колонке помещался текст параграфа в его исходном виде; в средней записывался текст в рекомендованной редакции с разъяснением, «в чем именно [было] найдено нужным сделать перемены или дополнения»; справа прилагалось обоснование. Документ под названием «Соображения и мнение по Казанской губернской строительной комиссии по статьям изданного 29 сентября 1832 года в виде опыта Положения о новом образовании строительной части гражданского губернского ведомства» затрагивал двадцать один параграф.

Согласно Положению территория страны делилась на округа, в каждом из которых имелись технические отделения, где проекты и сметы предварительно до отправления их в ГУПСИПЗ подвергались проверке. Двухгодичный опыт убедил Казанскую комиссию в ненужности этих окружных технических отделений, представлявших, по ее мнению, совершенно лишнюю инстанцию. Проектная документация доставлялась в столицу не позднее 1 июля – в противном случае рассмотрение ее переносилось на

следующий год. Во избежание задержек казанский военный губернатор вынужден был обращаться к главному управляющему ПСиПЗ напрямую, минуя технический отдел третьего округа, к которому Казанская губерния относилась.

Содержавшееся в двенадцатом параграфе требование иметь при комиссиях планы и фасады состоящим в ее ведении казенным гражданским зданиям предлагалось дополнить ежегодной обязанностью представлять в ГУПСИПЗ данные об их физическом состоянии. Казанская комиссия одобрила введенный в практику в 1834 году отказ от заблаговременной подачи списка предстоящих в следующем году работ по ремонту и перестройке зданий, сочтя нужным, однако, сохранить этот порядок для вновь возводимых сооружений с представлением проектов и смет в установленный срок не позднее 1 июля. Она признала целесообразным увеличить с 500 до 1000 рублей размер стоимости работ, при которой комиссии могли сами производить перестройки и ремонт зданий с разрешения начальника губернии. Требовавшие вышестоящего согласования сметы на сумму свыше 1000 рублей предлагалось направлять непосредственно в ГУПСИПЗ, исключив промежуточный уровень – окружной технический отдел.

Решительное возражение казанской комиссии вызвало назначение ее членов на работы в разных городах и уездах, где более эффективным представлялось отдавать строительство на подряды по контрактам, поручив наблюдение за работами местным чиновникам – городничим, стряпчим и членам уездных судов, а на членов комиссии возложить только освидетельствование («внезапное»). Поддержку получило распоряжение ГУПСИПЗ, предписавшее в 1834 г. чиновникам по искусственной части наблюдать за исполнением подрядчиками своих обязанностей по контрактам исключительно в местах пребывания комиссий, т.е. губернских центрах.

Одно из предложений касалось разрешения использовать назначенную для экстренных починок («пожаром, бурей или наводнением причиненных») ежегодную сумму размером 6000 рублей на текущее поддержание казенных зданий – присутственных мест, домов губернаторов, казначейств, тюремных замков и пр. Торги на работы, выполняемые из сумм городских доходов, переносились в помещениях городских дум, в то время как за казенными палатами сохранялось проведение торгов на постройку и починку зданий из сумм строительного капитала, приказов, земского сбора и других сторонних ведомств. Казанская комиссия одобрила действовавшие уже требования в обязательном порядке включать в контракты пункты о залогах, оставляемых подрядчиками до окончательного освидетельствования построек, трехэтапной выдаче денег, приложении к контрактам подробных ведомостей о количестве поставок с указанием их предназначения. Удостоверяться в исправном производстве работ надлежало до выдачи денег по результатам осмотра объекта всеми членами комиссии («всем присутствием») или назначенным от комиссии лицом. При ремонтах стоимостью до 5000 рублей работы принимались самой комиссией через непричастного к ней члена, а в случаях нового строительства, ремонта или перестройки стоимостью более 5000 рублей – в присутствии окружного начальника. Вместо предварительной пересылки планов, фасадов и смет окружному начальнику было разрешено передавать их ему по прибытии на место.

Казанская губернская строительная комиссия рекомендовала увеличить с 500 до 1000 рублей верхний предел стоимости ремонтных работ, производимых без составления технических отчетов. Она поддержала введенную циркулярным предписанием от 5 апреля 1835 года обязанность начальников губерний представлять ежегодно в Главное управление краткие ведомости о всех назначенных в прошедшем году суммах на постройку и починку зданий в дополнение к присылаемым строительными комиссиями общим годовым отчетам о приходе, расходе и остатке выделенных денежных сумм. Статья о проектировании сторонним ведомствам в своей новой версии закрепляла принятое в 1834 году дополнение, касавшееся предоставления, помимо планов и фасадов, еще и смет.

Доставленные из регионов «местные мнения и соображения» легли в основу второй версии документа о губернских строительных комиссиях. В начале 1836 г.

«Проект нового гражданской строительной части положения с штатами губернских строительных комиссий» поступил на предварительное рассмотрение в Государственный Совет, где пролежал около полутора лет. В июне 1837 г. канцелярия запросила от ГУПСИПЗ дополнительные сведения, охватив теперь уже не двухлетний, а весь четырехлетний период деятельности губернских строительных комиссий. «В самом незамедлительном времени» требовалось представить данные о том, какие работы и на какую сумму были произведены ими со времени присоединения строительной части к губернскому управлению, и какие еще продолжали производиться; какие именно постройки были освидетельствованы комиссиями за указанный период и на какие суммы подготовлены ими отчеты [5].

Показатели Казанской губернской строительной комиссии за период со времени её открытия 25 августа 1833 года по 1 июня 1837 года отражались в трех ведомостях. Первая содержала сведения о строительных работах, выполненных в Главном управлении путей сообщения и публичных зданий. Из нее следовало, что за указанное время были полностью окончены шестнадцать объектов – по восемь в Казани и уездных городах. В Казани возвели здания военного каземата в крепости, экзерцизгауз, баню и службы при доме военного губернатора, жандармские и казачьи казармы, устроили больницу в гражданском тюремном замке, исправили губернские присутственные места, выполнили разные мелочные исправления казенных строений из губернской ремонтной суммы. В уездных городах появились два каменных здания казначейства и были исправлены шесть тюремных замков. Оставались незавершенными возведение фельдшерской школы, устройство каменной мостовой в крепости, перестройка зданий второй полицейской части и первой гимназии, а также внутренняя отделка корпусов жандармских и казачьих казармах в Казани, временных деревянных тюрем в Свияжске, Лаишеве и Цивильске. Предстояли строительство присутственных мест с тюрьмами в Свияжске и Лаишеве, окружных лечебниц в Чебоксарах и Лаишеве, больницы в Спасске и исправление здания казначейства в Тетюшах, на которые уже были утверждены проекты и выделены деньги.

Вторая ведомость сообщала о произведенных членами Казанской губернской строительной комиссии освидетельствованиях, существенно расширяя представление о масштабах охваченной ею деятельности. Помимо работ, упомянутых в первой ведомости, здесь назывались возведение мостов по Большому Вятскому тракту в Козмодемьянском уезде, устройство деревянных и каменных мостовых и каналов и др. Комиссия вела наблюдение за строительством двух значительных архитектурных комплексов Казани – Школы батальонов военных кантонистов и Казанского университета, возводившихся особыми комитетами. Учрежденный в 1827 году Комитет по устройству школы батальонов военных кантонистов в Казани с архитектором П.Г. Пятницким завершал работы по приспособлению бывших арсенального и литейных зданий в крепости [7]. Строительный комитет при Казанском университете во главе с ректором Н.И. Лобачевским развернул свою деятельность с лета 1833 года, продолжив начатое Пятницким создание университетского ансамбля по проекту и под непосредственным наблюдением приглашенного из Симбирска архитектора М.П. Коринфского [8]. Третья ведомость касалась отчетности [5].

Проделанный обзор иллюстрирует сильную загруженность Казанской губернской строительной комиссии, испытывавшей острую нехватку архитекторов. Однако в этом отношении Казань, по-видимому, не была исключением – в 1835 году ГУПСИПЗ указало губернаторам на повсеместно встречаемое несоблюдение губернскими архитекторами технической отчетности и неудовлетворительное ведение ими рабочих журналов. По убеждению казанского губернского архитектора К.А. Шмидта, требование это могло быть выполнено исключительно после окончательного устройства строительной части с появлением возможности командировать на каждый объект «особенного чиновника» [9]. Только в 1842 году ГУПСИПЗ смогло направить в Казань («для усиления способов строительной комиссии») двух архитекторов – связано это было с восстановлением города после большого пожара [10].

Новая, переработанная с учетом четырехлетнего опыта функционирования губернских строительных комиссий версия Положения об этих комиссиях не дошла до утверждения – эксперимент продолжался. В 1842 г. к некоторым из них были присоединены строительные комитеты, учрежденные в предшествующее десятилетие в ряде городов для управления частной застройкой, вместе с прикрепленными к ним арестантскими ротами, что вызвало неоднородность этих учреждений по стране [11]. Единую структуру губернские комиссии приобрели в 1849 г. с образованием Губернских строительных и дорожных комиссий, снова учрежденных временно с предписанием ГУПСИПЗ представить Положение о них в январе 1852 года [12]. Представления не последовало, а преобразование архитектурно-строительной отрасли 1865 года являлось частью другой эпохи «великих реформ» правительства Александра II.

#### Список литературы

1. Государственный архив Республики Татарстан. Ф.1. Оп. 2. Д. 27. По отношению г. Министра внутренних дел о присоединении строительной части гражданского ведомства к Главному управлению путей сообщения.
2. Государственный архив Республики Татарстан. Ф.409. Оп. 1. Д. 79. По отношению Казанской губернской строительной комиссии о прекращении действий по Строительному комитету и о передаче дел оного комитета.
3. Государственный архив Республики Татарстан. Ф. 409. Оп. 4. Д. 11. Копия с указа Синода о позволении образования строительной части.
4. Полное собрание законов российской империи. Собр. 2. Т. 7. 1832 г. № 5624 от 29 сентября. Высочайше утвержденное Положение о новом образовании строительной части гражданского губернского ведомства.
5. Государственный архив Республики Татарстан. Ф. 409. Оп. 1. Д. 314. По отношению Главного управления путями сообщения и публичных зданий об усилении способов для губернских строительных комиссий.
6. Государственный архив Республики Татарстан. Ф. 409. Оп. 6. Д. 16. По предписанию Главного управления путями сообщения о доставлении соображений по статьям Положения об образовании строительной части гражданского ведомства.
7. Государственный архив Республики Татарстан. Ф. 409. Оп. 1. Д. 516. По отношению г. Министра внутренних дел по предмету положения о устройстве г. Казани.
8. Полное собрание законов российской империи. Собр. 2. Т. 8. 1833 г. № 6220 от 23 мая. Об учреждении строительного комитета при Казанском университете.
9. Государственный архив Республики Татарстан. Ф. 409. Оп. 1. Д. 414. Дело Казанской губернской строительной комиссии о соблюдении технической отчетности и ведении рабочего журнала со стороны губернского архитектора, наблюдающего за работами.
10. Государственный архив Республики Татарстан. Ф. 409. Оп. 1. Д. 1764. По отношению Комитета об оказании пособия жителям г. Казани с правилами о раздаче в ссуду денег жителям на возобновление домов, погоревших 24 августа 1842 г.
11. Полное собрание законов Российской империи. Собр. 2. Т. 17. 1842. № 15951 от 11 августа. О подчинении Строительных комитетов по устройству губернских городов Главному Управлению путями сообщения и публичными зданиями.
12. Полное собрание законов Российской империи. Собр. 2. Т. 24. 1849. № 23213 от 28 апреля 1849 г. Высочайше утвержденное Положение о губернских строительных и дорожных комиссиях.

#### References

1. State Archive of the Republic of Tatarstan. F. 1. Op. 2. D. 27. In relation to the Minister of internal Affairs on the accession of the construction part of the Civil Department to the Main Department of Railways.

2. State archive of the Republic of Tatarstan. F. 409. Op. 1. D. 79. in relation to the Kazan provincial construction Commission on the termination of actions on the Construction Committee and on the transfer of cases of this Committee.
3. State archive of the Republic of Tatarstan. F. 409. Op. 4. D. 11. Copy of the decree of the Synod on allowing the formation of the construction part.
4. Complete collection of laws of the Russian Empire. Coll. 2. Vol. 7. 1832, No. 5624 of September 29. The most highly approved Regulation on the new formation of the construction part of the Civil Provincial Department.
5. State archive of the Republic of Tatarstan. F. 409. Op. 1. D. 314. In relation to the General administration of communication routes and public buildings on strengthening methods for provincial construction commissions.
6. State archive of the Republic of Tatarstan. F. 409. Op. 6. D. 16. By order of the Main Directorate of the Railways on conveyance considerations relating to provision for the education building part of civilian agencies.
7. State archive of the Republic of Tatarstan. F. 409. Op. 1. D. 516. In relation to the Minister Of internal Affairs on the subject of the regulations on the device of Kazan.
8. Complete collection of laws of the Russian Empire. Coll. 2. Vol. 8. 1833, No. 6220 of may 23. On the establishment of the construction Committee at Kazan University.
9. State archive of the Republic of Tatarstan. F. 409. Op. 1. D. 414. The case of the Kazan Provincial Construction Commission on compliance with technical reporting and maintenance of a work log by the provincial architect overseeing the work.
10. State archive of the Republic of Tatarstan. F. 409. Op. 1. D. 1764. In relation to the Committee on the provision of benefits to residents of Kazan with the rules on the distribution of money on loan to residents for the renewal of houses that burned down on August 24, 1842.
11. Complete collection of laws of the Russian Empire. Coll. 2. Vol. 17. 1842. No. 15951 of August 11. About subordination of Construction committees for the arrangement of provincial cities to the main management of communication routes and public buildings.
12. Complete collection of laws of the Russian Empire. Coll. 2. Vol. 24, 1849, No. 23213 of April 28, 1849. Imperially approved Regulation on the provincial Building and Road Commission.

УДК 72.025.3(470.13)

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН,  
Сыктывкар

167610 ГСП, Россия, Республика Коми,  
Сыктывкар, ул. Первомайская д. 54

**Астахова Ирина Сергеевна**,  
кандидат геолого-минералогических наук,  
руководитель геологического музея  
E-mail: astakhova@geo.komisc.ru

**Жданова Лилия Раиковна**,  
младший научный сотрудник  
геологического музея  
E-mail: zhdanova@geo.komisc.ru

*Institute of Geology, Komi Science Center,  
Ural Branch of the Russian Academy of  
Sciences, Syktyvkar*

167610, Russia, Komi Republic,  
Syktyvkar, 54, Pervomaiskaya St.

**Astakhova Irina Sergeevna**,  
Candidate of Geological and Mineralogical  
Sciences, Head of the Geological Museum  
E-mail: astakhova@geo.komisc.ru

**Zhdanova Lilia Raikovna**,  
Junior Researcher of the Geological Museum  
E-mail: zhdanova@geo.komisc.ru

## ПРИРОДНЫЙ КАМЕНЬ В АРХИТЕКТУРНОМ ОФОРМЛЕНИИ Г. СЫКТЫВКАРА: ИСТОРИЯ, СОХРАНЕНИЕ И РЕСТАВРАЦИЯ

И.С. Астахова, Л.Р. Жданова

Приведены результаты анализа особенностей использования природного камня в архитектуре г. Сыктывкара. Изложена история применения в строительстве города облицовочного и бутового камня. Диагностированы основные типы горных пород и указаны их месторождения. Впервые приведены данные о состоянии памятников г. Сыктывкара.

*Ключевые слова: архитектура, памятники, современное состояние, восстановление*

## NATURAL STONE IN THE ARCHITECTURAL DESIGN OF SYKTYVKAR: HISTORY, CONSERVATION AND RESTORATION

I.S. Astakhova, L.R. Zhdanova

The article is devoted to the analysis of the use of natural stone in the architecture of Syktyvkar. The history of the use of facing and rubble stone in the construction of the city is given. The main types of rocks are diagnosed and their deposits are indicated. Data on the state of monuments is provided.

*Keywords: architecture, monuments, history, current state, restoration*

### Введение

В архитектуре городов отражаются процессы жизни общества, его достижения, состояние и уровень развития. Архитектурные сооружения нередко называют каменными страницами истории. И действительно, дома, дворцы, соборы, мосты, набережные и другие сооружения могут рассказать о времени, их родившем, о событиях и вкусах разных эпох и народов не менее выразительно, чем живопись, музыка или литература. Северо-запад России занимает лидирующие позиции в стране по количеству месторождений и разнообразию различных типов горных пород, которые используются в архитектуре городов. С использованием природного камня в убранстве зданий, площадей, мостов связана история целых городов. Так, неповторимый облик Санкт-Петербурга неразрывно связывают с его каменными дворцами, мостами и памятниками, гранитными набережными Невы, Фонтанки, Мойки.

Сегодня роль декоративно-облицовочных пород в архитектуре города Сыктывкара остается очень значительной. Они используются при облицовке зданий, набережных, из камня высекают памятники. Внешняя и внутренняя облицовка придают зданиям и различным сооружениям особую архитектурную выразительность и монументаль-

ность, создавая целые городские ансамбли. В условиях северного климата каменная облицовка повышает сохранность и долговечность зданий и освобождает от необходимости ремонта наружных частей на многие десятилетия. В настоящее время изучение каменной летописи города Сыктывкара актуально, так как город растет, меняет свой облик, воздвигаются новые здания.

В Сыктывкаре природный камень для внешнего украшения зданий и памятников применялся до недавнего времени крайне скудно. В 1783 г. архитекторы П.Р. Никитин и П.И. Обухов разработали «План города Усть-Сысольска (ныне г. Сыктывкар)», в котором был использован опыт Санкт-Петербурга. В основу плана была положена трехлучевая система в сочетании с прямоугольной планировкой. Была запроектирована центральная площадь и парадная набережная. Улицы располагались лучами, расходящимися от реки Сысолы, и дугами, параллельными ей. Первые каменные здания в городе связаны с духовенством: одноэтажная каменная Покровская церковь (1740), Спасская церковь (1808), Троицкая церковь (1768), которые вместе составляли Троицкий собор на берегу реки Сысолы. Памятником каменной архитектуры этого периода на сегодня остается дом Сухановых (1804). Он построен по «образцовому» проекту, составленному в конце XVIII в. Это типичный провинциальный особняк в стиле русского классицизма с выступом в виде портика и фронтоном в центре фасада. Во 2-й половине XIX в. были построены гражданские каменные здания: дом Суворовых (1879), подворье Ульяновского монастыря (1881), трехэтажное духовное училище с пятигранным выступом в центре фасада (1890), дом лесопромышленника Оплеснина с декоративными элементами древнерусской архитектуры и барокко, сохранившийся и сегодня (1892). Самым крупным зданием в дореволюционном Усть-Сысольске был Стефановский собор, действовавший с 1883 г. (рис. 1). Располагался храм в самом центре города, и в преимуществе одноэтажном Усть-Сысольске был виден практически с любой точки города. С архитектурной точки зрения ничего особенного храм не представлял. Храм украшал огромный трехъярусный иконостас, состоявший из трех больших икон, подаренных Исаакиевским собором (Санкт-Петербург), и других заказанных икон. Но обустройство храма так и не было закончено. Собор был разрушен в годы Советской власти (1938 г.) и был заново восстановлен в 2002 г. По данным историков, единственным в дореволюционном г. Усть-Сысольске облицовочным средством для каменных церквей и монастырей города являлась штукатурка [1]. В строительстве использовались материалы, добытые на местных карьерах и в естественных обнажениях. В советское время основа архитектурного наследия была уничтожена, лишь пуск Дырносского кирпичного завода в 1931 г. позволил развернуть более широкое строительство капитальных зданий, но и в них нигде не применяли облицовочный материал.



Рис. 1. Вид на Стефановский собор, г. Усть-Сысольск (ныне г. Сыктывкар), нач. XIX в.

**Каменное убранство г. Сыктывкара**

С 50-х годов XX в. стали использовать природный камень в памятниках и облицовке зданий г. Сыктывкара. Точно установить, какое здание в городе было облицовано первым, не удалось, но, по мнению бывшего главного архитектора г. Сыктывкара В.И. Сенькина, это, скорее всего, наружные лестницы одного из двух учреждений: библиотеки им. В.И. Ленина (1958) или Коми обкома КПСС (1960).

В целом в маловыразительный архитектурный облик современного Сыктывкара внесли разнообразие здания и памятники, построенные с начала 90-х годов XX века, в которых широко использовались облицовочные камни. Хотя в Республике Коми известны десятки месторождений и проявлений природного камня, но в основном весь облицовочный материал привозной из других регионов России или ближнего зарубежья (Украина). Лидером среди каменной палитры для внешней облицовки современных зданий является гранит. Долговечность, стойкость к низким температурам и атмосферным явлениям делает гранит наиболее предпочтительным камнем для облицовки зданий в районах Крайнего Севера. Капустинский гранит (Украина) наиболее часто использовался в облицовке зданий. Кирпично-рыжие удлиненные выделения полевого шпата располагаются на темном, почти черном, фоне, что придает породе контрастность, яркость и индивидуальность. Им облицованы Торгово-промышленная палата, Центр международной торговли, цоколь магазина «Эльдорадо», Ухтабанка, офисного здания компании «Лукойл». В несколько меньшем объеме он использован для отделки здания Северного народного банка (в сочетании с емеляновским гранитом), в цоколе здания Администрации города и Свято-Стефановском соборе. Карельский гранит с Шальского месторождения использован в основании колонн диагностического центра. Порода равномерно пятнистая серовато-коричневого цвета.

В облицовке современных зданий все чаще используется гранит с месторождения Калгуваара (Карелия). Крупнозернистые ярко розово-красные удлиненные выделения полевого шпата придают камню пестрый рисунок. Полированными пластинами калгувааринского гранита реставрированы крыльцо Института биологии и Президиума Коми научного центра. В облицовке входного комплекса «Торговый двор», построенного в 2008 г., использована шлифованная фактура гранита, в которой также улавливается своеобразная текстура камня.

В архитектурном ансамбле Сыктывкара часто используется техника мозаики, где сочетаются различные по составу, цвету, текстурно-структурным особенностям гранит, мрамор и другие породы. Она прослеживается в холле Президиума Коми научного центра, в лестничном и фонтанном комплексах администрации города, на входе в Представительство министерства иностранных дел Российской Федерации. К сожалению, данные по месторождениям используемого облицовочного камня не сохранились, многие породы в облицовке визуальнo трудно диагностировать и не представляется возможным определить принадлежность к тому или иному месторождению.

Информацию по использованным камням в памятниках, знаках и досках легче восстановить по архивным материалам, воспоминаниям художников и скульпторов. Памятники города чаще выполнены из бронзы, постаменты и его площадки облицованы горными породами, различными по составу, цвету, текстурно-структурным особенностям. Всего в городе установлено 17 памятников, 2 мемориала, 11 памятных знаков, 1 скульптура, 1 часовня [2]. Первый памятник из камня был воздвигнут в 1967 г. Авторами скульптуры являются художник Л.Е. Кербель и В.И. Буякин, архитекторами – С.А. Феоктистов и В.К. Датюк. Высота памятника составляет около 6 м. Памятник В. И. Ленину сделан из гранита Красногранитного месторождения (Украина). Гранит представлен мелко-среднезернистой разновидностью, где полевой шпат розового цвета располагается на темно-серо-зеленом фоне. Периодический уход за памятником поддерживает его чистоту, его сохранность удовлетворительная. Визуально на установленной поверхности постамента зафиксированы желто-ржавые пятна и пятна серой пленки, в стыках блоков установлено развитие растительности.

Наиболее разнообразным с позиции применения облицовочных материалов является мемориал вечной славы воинам-сыктывкарцам, павшим в годы Великой Отечественной войны 1941–1945 гг. (1981, 1995, 2005). В 1980-х г. в центре Аллеи героев был сооружен стилобат с вечным огнем в центре, который был облицован красно-коричневым гранитом [2]. К сожалению, не осталось архивных материалов по первой облицовке памятника. В 2005 г. он был реконструирован, и в облицовке современной скульптуры был использован гранит пятнистый с овоидной текстурой из украинских месторождений. В оформлении Аллеи героев были задействованы черное габбро, лабрадорит, светло-серый мрамор из месторождений Украины и кварцитопесчаник Кожимского месторождения Республики Коми.

В сквере Государственного академического театра драмы им. В. Савина установлен памятник писателю, поэту и композитору В.А. Савинову (1994). Автор памятника скульптор В.А. Безумов, архитекторы А.П. Толмачева, Н.А. Тюлюкова, М.А. Шахов. Скульптура изготовлена из бронзы и установлена на небольшой пьедестал. В 2008 г. при реставрации был использован амфиболит гранатовый из месторождения Нигрозеро (рис. 2). Причудливый рисунок, создаваемый красными выделениями граната на черном фоне с тонкими разводами белого кварца, придает своеобразие памятнику.

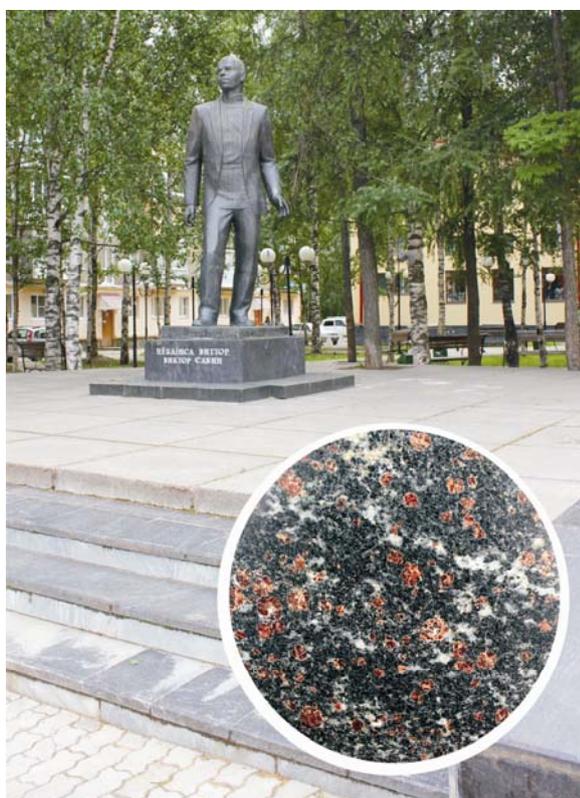


Рис. 2. Памятник В.А. Савинову

Преимущественно карельский мелко- и среднезернистый гранит с небольшими розовыми вкраплениями полевого шпата размером до 0,7 см обнаружен в постаментах памятников первому Коми поэту И.А. Куратову (1977), в скульптурных бюстах Г. Димитрову (1982) и Г.К. Орджоникидзе (1985). Из гранитов в городе применяется также равномерный пятнистый серовато-коричневый гранит Шальского месторождения (Карелия) для стелы в честь Героя СССР Н. В. Оплеснина.

В ландшафтном дизайне и при изготовлении памятников местные скульпторы достаточно часто используют валуны. В архитектурной композиции около здания администрации г. Сыктывкара сочетаются большие штUFFы до 1,5 м в поперечнике малинового кварцитопесчаника с Кожимского месторождения Республики Коми и карельские гранитные ледниковые валуны. Преимущественно из валунов гранитного состава изготовлены скульптуры в аллее Национальной галереи Республики Коми.

Для местных мастеров источником валуном является с. Палевицы Сыктывдинского района. Валуны высотой от десятой доли сантиметра до 5 метров рассредоточены в южных районах Республики Коми. Ледник притащил их со Скандинавского щита, охватывающего Северную Эстонию, Финляндию и Карелию. Однако наиболее интересным объектом является памятник Стефану Пермскому, изготовленный скульптором В.А. Рохиним в 1995 году, который сделан из гранитного валуна, заложенного в свое время в фундамент Стефанского собора [2].

В 2000 г. был открыт памятник подполковнику Управления ФСБ А.И. Алексееву, Герою Российской Федерации, который погиб при исполнении служебного долга в 1996 г. Скульптура изготовлена из темно-серого мелкозернистого мансуровского гранита. Им же в сочетании с калгувааринским гранитом трахитоидной текстуры облицован лестничный комплекс (рис. 3).



Рис. 3. Памятник Герою Российской Федерации подполковнику А.И. Алексееву

В последние годы облик г. Сыктывкара украсили пять фонтанов. По словам заместителя генерального директора ООО «Мега-центр» К. Сорокина, чаши фонтанов на Театральной площади облицованы гранитом с Шальского месторождения (Карелия). В облицовке других фонтанов города использована мозаика из гранитных пластин разных месторождений, отличающихся по цвету, текстурным и структурным особенностям. Однако можно с уверенностью говорить о граните с месторождения Сюскюянсари, который отличается практически однородным среднезернистым насыщенно красно-розовым цветом с массивной текстурой.

В 2014 г. возле главного корпуса Сыктывкарского государственного университета был открыт памятник известному русско-американскому социологу, уроженцу Коми края Питириму Сорокину. Бронзовая скульптура помещена на основание, облицованное плиткой гранита из месторождения Возрождение (Карелия). Легкость и своеобразие памятнику придает бледно-розовый, светло-серый цвет гранита с овоидами полевого шпата до 3 см.

В мемориальных досках увековечена память о выдающихся людях, которые сделали большой вклад в развитие Республики Коми. Чаще всего они расположены на стенах домов и учреждений, где проживали или работали известные актеры, летчики, писатели и поэты, ученые, учителя и врачи. Всего в Сыктывкаре было установлено 95 досок [2]. Сегодня 17 досок утрачены. На мемориальной доске обычно изображен профиль или бюст человека и пояснительная надпись из цветного металла, которая

зачастую является объектом для вандализма. В память о выдающихся людях мемориальные доски восстанавливают или создают новые. Так, в 2015 г. на здании Института геологии Коми НЦ УрО РАН была открыта мемориальная доска выдающемуся ученому-геологу, директору Института геологии (в 1985–2008 гг.) академику Николаю Павловичу Юшкину (рис. 4).



Рис. 4. Мемориальная доска академику Н. П. Юшкину

Бронзовый барельеф с надписью расположен на мемориальной доске шириной 120 см, длиной 180 см. Единая плита изготовлена из габбро-диабазы Дугорецкого месторождения (Карелия). Мелкозернистый габбро-диабаз черного цвета характеризуется офитовой структурой, образованной беспорядочным расположением мелких кристалликов плагиоклаза вытянутой формы с авгитом. Долговечность, высокие художественные свойства, плотность и однородность горной породы делают камень высококачественным материалом.

#### Заключение

В ходе изучения особенностей применения облицовочных материалов в г. Сыктывкаре использовались архивные материалы, воспоминания архитекторов, скульпторов и визуальный осмотр, который позволил оценить состояние памятников и зданий. К сожалению, не удалось восстановить принадлежность многих пород к определенным месторождениям.

Архитекторы постоянно стремятся к тому, чтобы их произведения отвечали в полной мере той триаде, которой следовали еще зодчие древности — польза, прочность, красота. Высокая долговечность, хорошая полируемость и причудливый рисунок позволяют использовать гранит в облицовке зданий, памятниках и в мемориальных досках и делают его бесспорным лидером среди декоративно-поделочных и облицовочных камней.

Постоянно ухудшающиеся экологические условия городской среды, северный климат, воздействие человека ставят перед специалистами серьезные вопросы по сохранению и реставрации объектов архитектуры Сыктывкара разных стилей и эпох. Визуальная оценка состояния скульптур и памятных мест позволяет говорить о средней сохранности. Наиболее несохранным камнем является природный гранит. Металлические конструкции памятников несут отчетливые признаки коррозии металла, памятники покрываются поверхностными налетами и отложениями химической и биогенной природы. Значительная часть памятников покрыты биопленками серо-черного цвета и лишайниками. Такая же пленка формируется на цементных стыках памятников. У некоторых монументов снижено качество полированной поверхности.

Наихудшее состояние имеют постаменты, стелы и лестничные комплексы памятников советского периода. При воссоздании каменных элементов не учитывают оригинальный природный камень монумента, так как камень современных месторождений иногда трудно совместим с оригинальным камнем на памятнике по цвету и рисунку. Реставрационные работы с использованием строительно-облицовочного камня напрямую зависят не только от соблюдения существующих в мировой практике принципов реставрации, но и просто от здравого смысла. Так, в 2010 г. нижнюю часть постамента памятника В.И. Ленину покрасили краской. Секретарь Коми Рескома КПРФ Б. Скроцкий объяснил данный поступок как меру уничтожения вандализма [3]. Постановление главы администрации г. Сыктывкара от 27 февраля 1998 г. категорически запрещает производить окраску фасадов и наружных частей здания, облицованных естественным или искусственным камнем, а также оштукатуренных растворами с применением каменной крошки и слюды. На сегодня краска снята. Однако воздействие агрессивной химической среды сказалось на сохранности камня.

Таким образом, в числе приоритетных заданий по сохранению архитектурного облика Сыктывкара должна стоять задача дальнейшей диагностики природного камня и его месторождения. Данная информация будет необходима в дальнейшем для проведения деликатных реставрационных работ.

*Авторы выражают благодарность за предоставленную информацию П.А. Куратову, М.Б. Рогачеву, Н.Б. Миледино, П.Е. Нестеркову, В.М. Капитанову.*

#### Список литературы

1. Обедков, А.П. Градостроительство, архитектура и зодчие Сыктывкара / А.П. Обедков, Л.С. Федосов. – Сыктывкар, 1999. – 52 с.
2. Чупрова, Л.Н. Время не властно над именем. Путеводитель по памятникам, памятным знакам и мемориальным доскам города Сыктывкара / Л.Н. Чупрова, И.В. Колегова. – Сыктывкар, 2008. – 207 с.
3. Сикорская, О. Оранжевая революция? Зачем памятник Ленину в Сыктывкаре покрасили в цвет мусорок? / О. Сикорская // Красное знамя. – Август. – 2010.

#### References

1. Obedkov, A.P. Town planning, architecture and architects of Syktyvkar / A.P. Obedkov, L.S.Fedosov. – Syktyvkar, 1999. – 52 p.
2. Chuprova, L.N. Time has no power over the name. Guide to monuments, memorials and plaques of Syktyvkar / L.N. Chuprova, I.V. Kolegova. – Syktyvkar, 2008. – 207 p.
3. Sikorskaya, O. Orange revolution? Why was the monument to Lenin in Syktyvkar painted in the color of garbage cans ? / O. Sikorskaya // Red banner. – August. – 2010.