

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель

Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства

Главная редакция:

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

Адрес редакции:

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

Редакторы: М.А. Сухова
Н.Ю. Шалимова

Дизайн обложки Е.Г. Лапшина

Компьютерная верстка
Н.А. Сазонова

Перевод О.В. Гринцова

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

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

Подписной индекс:
36946 в каталоге Роспечати

Авторы опубликованных материалов
несут ответственность за достоверность
приведенных сведений, точность данных
по цитируемой литературе и за исполь-
зование в статьях данных, не подлежа-
щих открытой публикации.

Редакция может опубликовать статьи
в порядке обсуждения, не разделяя точку
зрения автора.

Подписано к печати 15.03.2019.
Формат 60x84 1/8.
Уч.-изд.л. 26,75. Тираж 500 экз. Первый завод 100.
Заказ № 197.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

**РЕГИОНАЛЬНАЯ
АРХИТЕКТУРА
И СТРОИТЕЛЬСТВО**
1(38)/2019

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 5

**Хвастунов В.Л., Хвастунов А.В.,
Махамбетова К.Н., Чиркина М.А.**
ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВОВ
КАРБОНАТНО-ШЛАКОВЫХ ВЯЖУЩИХ.....5

Иноземцев С.С.
ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ
ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛАСТОМЕРНОГО БЕТОНА
ДЛЯ УСТРОЙСТВА ЗОН СОПРЯЖЕНИЯ
ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ С ДЕФОРМАЦИОННЫМИ
ШВАМИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ 15

Данилов А.М., Гарькина И.А.
ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ
АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....24

Логанина В.И., Фролов М.В.
ВЛИЯНИЕ ВИДА НАПОЛНИТЕЛЕЙ
НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ
ДЛЯ ГАЗОБЕТОНА..... 30

Макридин Н.И., Максимова И.Н., Полубарова Ю.В.
ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ПРОЧНОСТЬ
ДИСПЕРСНО-КРИСТАЛЛИТНОЙ СТРУКТУРЫ
ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ36

Логанина В.И., Мажитов Е.Б.
РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗОЛЬ-
СИЛИКАТНЫХ КРАСОК45

Жегера К.В.
ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМОСИЛИКАТОВ
В КАЧЕСТВЕ МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ
ДОБАВКИ В ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМАХ.....51

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ
И СООРУЖЕНИЯ 56

Скачков Ю.П., Снежкина О.В., Ладин Р.А.
ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ОТ ИХ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ..... 56

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

| | |
|---|---|
| Шенин А.И. БЕЗОПАСНОСТЬ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ С НЕСУЩИМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ РАМАМИ В ТЕХПОДПОЛБЕ 62 | Нежданов К.К., Артюшин Д.В., Жуков А.Н., Курткеев Д.Х. ГАРАНТИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ П-ОБРАЗНЫХ РАМ КАРКАСОВ ТЭЦ..... 138 |
| Бакушев С.В. ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВНЕЦЕНТРЕННО НАГРУЖЕННОГО УПРУГОГО СТЕРЖНЯ.. 69 | Зернов В.В., Зайцев М.Б. МЕТОДИКА РАСЧЕТА СТАЛЬНЫХ РАМ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПО ДЕФОРМИРОВАННОЙ СХЕМЕ 143 |
| Бакушев С.В. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ДЕКАРТОВЫХ КООРДИНАТАХ ПРИ БИЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ЗАМЫКАЮЩИХ УРАВНЕНИЙ (геометрически линейная модель)..... 76 | Арискин М.В., Гарькин И.Н. УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПОДКРАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ 149 |
| Береговой А.М., Береговой В.А. ВЫБОР КОНСТРУКЦИЙ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ С УЧЕТОМ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ 86 | ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ 154 |
| Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Безрукова М.С. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДУПРЕЖДАЮЩИХ ДЕЙСТВИЙ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ДЕФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ МОНТАЖЕ ПЛАСТИКОВЫХ ОКОН..... 91 | Ерёмкин А.И., Орлова Н.А., Фильчакина И.Н. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ВДОЛЬ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ С РАВНОМЕРНОЙ РАЗДАЧЕЙ ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА 154 |
| Карпова О.В. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ «ЗЕЛЕННЫХ» ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМАХ СЕРТИФИКАЦИИ ЗДАНИЙ 99 | Еремкин А.И., Баканова С.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УВЛАЖНЕНИЯ КОНДИЦИОНИРОВАННЫМ ВОЗДУХОМ ТЕКСТИЛЬНЫХ ПОЛУ- ФАБРИКАТОВ НА ОСНОВЕ МАТЕМА- ТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 164 |
| Зворыгина С.В., Викторова О.Л. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПЛИТНО-СТЕРЖ- НЕВЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДАПТАЦИОННОГО МЕТОДА 105 | Усачев А.П., Шурайц А.Л., Бирюков А.В., Усуев З.М. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УЗЛА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ БЫСТРОСЪЕМНОЙ КРЫШКИ ГАЗОВОГО ФИЛЬТРА..... 171 |
| Кочеткова М.В. ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ И СХЕМЫ РАЗРУШЕНИЯ РОСТВЕРКОВ ПОД КОЛОННУ С МНОГОРЯДНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ СВАЙ..... 112 | Королева Т.И., Аржаева Н.В., Мельников И.Е. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛАЖНОСТНЫХ ПОЛЕЙ В ТОЛЩЕ ОБЛЕГЧЕННОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ 177 |
| Гарькина И.А., Данилов А.М. ЕДИНАЯ КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ..... 119 | Гришин Б.М., Бикунова М.В., Шенин А.И., Осипова Н.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБРАБОТАННОГО В ЭЛЕКТРОЛИЗЁРЕ АКТИВНОГО ИЛА АЭРОТЕНКА 187 |
| Вдовин В.М., Карпов В.Н. КЛЕЕННЫЕ КРУПНОРАЗМЕРНЫЕ ПАНЕЛИ ПЕРЕКРЫТИЯ С НЕСУЩИМИ ДЕРЕВЯННЫМИ РЕБРАМИ 124 | Андреев С.Ю., Яхкинд М.И., Князев В.А. УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСРЕДНЕННЫХ МЕСТНЫХ СКОРОСТЕЙ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В ГИДРАВЛИЧЕСКИ ГЛАДКИХ И ВПОЛНЕ ШЕРОХОВАТЫХ ТРУБАХ..... 193 |
| Гучкин И.С., Булавенко В.О., Ласьков Н.Н. УСИЛЕНИЕ ПЛИТ ИЗ ЯЧЕЙСТОГО БЕТОНА ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ЗДАНИЯ 132 | |

| | | | |
|--|-----|--|-----|
| АРХИТЕКТУРА | 203 | Васин Л.А. ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ИЗУЧЕНИИ СЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ CISCO | 209 |
| Петрянина Л.Н. КОНЦЕПЦИЯ ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ И РЕАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ЦЕНТРА ГОРОДА: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ | 203 | | |

Contents

| | | | |
|--|----|---|-----|
| BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS..... | 5 | Shein A.I. SAFETY OF PREFABRICATED CONCRETE PUBLIC BUILDINGS WITH LOAD-CARRING TRANSFER FRAME IN SUBSTRUCTURES | 62 |
| Khvastunov V.L., Khvastunov A.V., Makhambetova K.N., Chirkina M.A. BASES OF OPTIMIZATION CARBONATE SLAG BINDING COMPOSITIONS | 5 | Bakushev S.V. DISPLACEMENTS OF NONCENTRAL LOADED ELASTIC ROD | 69 |
| Inozemtsev S.S. EXPERIENCE IN THE APPLICATION OF ELASTOMERIC CONCRETE FOR THE CONTACT AREA OF EXPANSION JOINT WITH PAVING | 15 | Bakushev S.V. DIFFERENTIAL EQUATIONS OF SOLID ENVIRONMENT EQUILIBRIUM FOR FLAT DEFORMATION IN CARTESIAN COORDINATES AT BILINEAR APPROXIMATION OF TRAILING EQUATIONS (geometrically linear model) | 76 |
| Danilov A.M., Garkina I.A. APPROXIMATE METHODS OF ANALYTICAL CONSTRUCTION OF COMPOSITE MATERIALS | 24 | Beregovoy A.M., Beregovoy V.A. SELECTION OF EXTERNAL ENCLOSURES TAKING INTO ACCOUNT ENERGY SAVING IN CONDITIONS OF AGGRESSIVE EFFECTS OF THE ENVIRONMENT | 86 |
| Loganina V.I., Frolov M.V. THE INFLUENCE OF FILLERS TYPE ON CRACKING RESISTANCE OF THERMAL INSULATION COATINGS FOR AERATED CONCRETE | 30 | Makarova L.V., Tarasov R.V., Bezrukova M.S. ASSESSMENT THE EFFICIENCY OF PREVENTIVE ACTIONS TO ELIMINATE DEFECTS ARISING AT INSTALLATION OF PLASTIC WINDOWS | 91 |
| Makridin N.I., Maksimova I.N., Polubarova Y.V. PHASE COMPOSITION AND STRENGTH OF DISPERSED-CRYSTALLINE STRUCTURE OF CEMENT STONE | 36 | Karpova O.V. THE EVALUATION CRITERIA OF “GREEN” TECHNOLOGIES IN CERTIFICATION SYSTEMS OF BUILDINGS | 99 |
| Loganina V.I., Mazhitov Y.B. RHEOLOGICAL PROPERTIES OF ASH-SILICATE PAINTS | 45 | Zvorygina S.V., Viktorova O.L. DETERMINATION OF RATIONAL GEOMETRICAL PARAMETERS OF SPATIAL PLATE-CORE SYSTEMS USING ADAPTIVE METHOD | 105 |
| Zhegera K.V. APPLICATION OF ALUMOSILICATES AS A MODIFYING ADDITIVE IN CEMENT SYSTEMS | 51 | Kochetkova M.V. CRACKING AND DESTRUCTION SCHEME OF GRILLAGE UNDER THE COLUMN WITH MULTI-ROW PILES ARRANGEMENT | 112 |
| BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS | 56 | Garkina I.A., Danilov A.M. UNIFIED CONCEPT OF SYSTEM DESIGN OF COMPLEX SYSTEMS | 119 |
| Skachkov Yu.P., Snezhkina O.V., Ladin R.A. STRENGTH DEPENDENCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS ON GEOMETRICAL CHARACTERISTICS IN THE AREA OF TRANSVERSE FORCES | 56 | | |

| | |
|--|---|
| Vdovin V.M., Karpov V.N. GLUED LARGE SIZE ROOF SLABS WITH BEARING WOODEN RIBS 124 | Usachev A.P., Shuraitis A.L., Biryukov A.V., Usuev Z.M. DEVELOPMENT OF A MODEL NODE TO ENSURE A LEAK-PROOF QUICK-RELEASE LID GAS FILTER 171 |
| Guchkin I.S., Bulavenko V.O., Laskov N.N. STRENGTHENING OF CELLULAR CONCRETE PLATES AFTER PROLONGED USE IN INDUSTRIAL BUILDINGS COVERING 132 | Koroleva T.I., Arzhaeva N.V., Melnikov I.E. THE STUDY ON MOISTURE FIELDS IN THICKNESS OF LIGHTWEIGHT ENCLOSING STRUCTURE 177 |
| Nezhdanov K.K., Artyushin D.V., Zhukov A.N., Kurtkeзов D.Kh. RELIABILITY AND DURABILITY GUARANTEE U-SHAPED FRAMES OF AT THERMOELECTRIC PLANTS 138 | Grishin B.M., Bikunova M.V., Shein A.I., Osipova N.N. THE STUDY OF SEDIMENTATION CHARACTERISTICS OF PRE-TREATED IN THE ELECTROLYZER ACTIVE SLUDGE AERATION TANK 187 |
| Zernov V.V., Zaytsev M.B. CALCULATION METHODS OF STEEL FRAMES OF INDUSTRIAL BUILDINGS USING A VARIETY OF BUCKLING MODES ON THE DEFORMED SCHEME 143 | Andreev S.Yu., Yakhkind M.I., Knyazev V.A. SPECIFIED TECHNIQUE FOR DETERMINING MEDIUM AREA LOCAL FLOW RATE SPEEDS IN HYDRAULIC SMOOTH AND QUITE ROUGH PIPES 193 |
| Ariskin M.V., Garkin I.N. STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE OVERHEAD-CRANE STRUCTURES 149 | ARCHITECTURE 203 |
| ENGINEERING SYSTEMS 154 | Petryanina L.N. THE CONCEPT BEHIND THE DESIGN DECISIONS AND THE REAL CITY CENTRE DEVELOPMENT: COMPARATIVE ANALYSIS 203 |
| Yermukin A.I., Orlova N.A., Filchakina I.N. METHOD OF DETERMINING REGULARITIES OF CHANGES IN PARAMETERS OF FLOW ALONG DIFFUSER WITH UNIFORM DISTRIBUTION OF SUPPLY AIR 154 | Vasin L.A. APPROACH TO THE ORGANIZATION OF THE EDUCATIONAL PROCESS IN THE STUDY OF NETWORK TECHNOLOGIES IN ARCHITECTURAL AND CIVIL ENGINEERING UNIVERSITY WITH THE USE OF CISCO EQUIPMENT 209 |
| Eremkin A.I., Bakanova S.V. STUDY OF HYDRATION PROCESSES OF AIR CONDITIONING OF TEXTILE SEMI- FINISHED PRODUCTS ON THE BASIS OF MATHEMATICAL MODELING 164 | |

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.2:669.162.144

*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

Хвастунов Виктор Леонтьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: techbeton@pguas.ru

Хвастунов Алексей Викторович,
кандидат технических наук
E-mail: alexey_pnz@mail.ru

Махамбетова Камажай Нурабуллаевна,
кандидат технических наук
E-mail: knmakhambetova@gmail.com

Чиркина Марина Александровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационные
системы и технологии»
E-mail: chm-77@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

Khvastunov Viktor Leontievich,
Doctor of Sciences,
Professor of the department «Technology
of building materials and wood processing»
E-mail: techbeton@pguas.ru

Khvastunov Aleksey Viktorovich,
Candidate of Sciences
E-mail: alexey_pnz@mail.ru

Makhambetova Kamazhay Nurabullaevna,
Candidate of Sciences
E-mail: knmakhambetova@gmail.com

Chirkina Marina Alexandrovna
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Information computing
systems»
E-mail: chm-77@mail.ru

ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВОВ КАРБОНАТНО-ШЛАКОВЫХ ВЯЖУЩИХ

В.Л. Хвастунов, А.В. Хвастунов, К.Н. Махамбетова, М.А. Чиркина

Рассмотрены принципы формирования высокоэффективных минерально-шлаковых композиций, отвержденных малыми дозировками щелочи, проанализированы изменения их предела прочности на сжатие и коэффициента размягчения в зависимости от рецептурных и технологических факторов. Произведена оптимизация составов. Установлено, что прочность карбонатно-шлаковых композиций зависит от количества шлака, концентрации щелочного раствора, количества воды затворения, дисперсности карбонатных пород. Определены зависимости прочности при сжатии от указанных факторов.

Ключевые слова: карбонатно-шлаковое вяжущее, прочность на сжатие, коэффициент размягчения, рецептурные и технологические факторы, концентрация щелочного раствора, дисперсность карбонатных пород, количество шлака, оптимизация составов

BASES OF OPTIMIZATION CARBONATE SLAG BINDING COMPOSITIONS

V.L. Khvastunov, A.V. Khvastunov, K.N. Makhambetova, M.A. Chirkina

The principles of formation high-performance mineral slag compositions cured with small doses of alkali are considered. The analysis of changes of their compressive strength and softening coefficient depending on the formulation and technological factors is given. Optimization of compositions is made. It is determined that the strength of carbonate-slag compositions depends on the amount of slag, the concentration of alkaline solution, the amount of mixing water, the dispersion of carbonate rocks. The dependence of compressive strength on these factors is determined.

Keywords: carbonate-slag binder, compressive strength, the coefficient of softening, prescriptive and technological factors, concentration of alkaline solution, dispersity of carbonate rocks, amount of slag, optimization of compositions

Высокая стоимость многих видов природных ресурсов, производимой энергии, большой объем техногенных отходов, постоянное совершенствование технологий обогащения рудных и нерудных пород поставили в ряд первостепенных и актуальных задач использование безотходных технологий, которые обеспечивали бы благоприятную экологическую обстановку, экономию энергоресурсов, уменьшение транспортных расходов в такой материал- и энергоёмкой отрасли экономики РФ, как производство строительных материалов и изделий.

В современных технологиях строительных материалов особый интерес для науки представляют комбинированные вяжущие, в состав которых могут входить самостоятельно твердеющие природные минералы. Отечественных и зарубежных ученых-материаловедов давно волнует проблема создания безобжиговых вяжущих и строительных материалов на их основе для замены энерго- и ресурсоёмкого портландцемента хотя бы в тех сферах строительства, где не нужны его высокие технические функциональные свойства.

Превращение горных пород в вяжущие материалы малоэнергоёмкими безобжиговыми способами, путём химической, механогидрохимической, термической и комплексной активации и катализа является чрезвычайно важным направлением в строительном материаловедении.

Как показали ранее проводившиеся исследования [1-3, 5-12], связующими звеньями в этом синтезе должны быть многотоннажные отходы шлака и золы. Шлаки и золы могут быть охарактеризованы как химически активные искусственные «породы», которые, в отличие от естественных горных пород близкого химического состава, взаимодействуют с водой, гидратируются ею.

Масштабное потребление высокодисперсных горных пород должно быть ориентировано на создание твердеющих композиций в смеси со шлаками и золами по принципу «отход+отход+активизатор (также может быть отходом) =вяжущее».

Широкий диапазон полиморфных модификаций горных пород, их химико-минералогический состав открывают перспективу для нужного поиска безобжиговых вяжущих веществ из тонкодисперсных пород путём их модифицирования шлаками и щелочными активаторами.

Известные стремления по созданию высокопрочных шлакощелочных вяжущих с расходом щелочных активаторов – щелочей, соды, поташа, силикатов щелочных металлов – в количестве 8-12 % от массы шлака не способствовали улучшению многих свойств бетонов, особенно низкому высолообразованию [11].

Проведенные нами исследования по теории твердения композиционных вяжущих [3, 6, 7, 11] показали, что наиболее эффективными активаторами отверждения горных пород в щелочной среде по своей природе являются основные и нейтральные гранулированные металлургические шлаки.

Установлено, что роль шлака как основного связующего матричного вещества, которую он играет в чистых шлакощелочных вяжущих, кардинально меняется в композиционных минерально-шлаковых вяжущих нового поколения, особенно в малошлаковых, геотшлаковых и малощелочных. Поэтому разработка новых высоконапол-

ненных низкощелочных безобжиговых минерально-шлаковых композиционных вяжущих с содержанием активизатора не более 2-3 % взамен известных высокощелочных, высокосодовых и высокожидкостекольных шлакощелочных вяжущих и бетонов на их основе является актуальной задачей в материаловедческом, экологическом и экономическом аспектах.

Около 45 % всех эксплуатируемых месторождений промышленности нерудных строительных материалов приходится на долю карбонатных пород в виде кальциевых и доломитизированных известняков, а также доломитов [11]. При добыче таких пород для различных видов производственной деятельности (дорожное строительство, производство заполнителей и наполнителей композиционных материалов и др.) образуется до 30-35 % и более отсевов камнедробления с содержанием фракции 0-5 мм. Такие отходы имеют пониженную энергоёмкость на помол, так как во всех фракциях 0-5 мм содержится около 40 % тонкодисперсных частиц. Химическая и кристаллографическая природа известняков предопределяет возможность их комбинирования со многими вяжущими веществами, в том числе с цементами и гранулированным доменным шлаком.

Исходя из кристаллографического разнообразия карбонатных пород, существования нескольких тысяч сингоний кристаллов кальцита, высокой поверхностной реакционной активности граней кристаллов делается вывод о возможности эпитаксиального и синтаксического срастания продуктов гидратации шлака с поверхностью карбонатных частиц при формировании прочности и предпочтительности использования карбонатов в смешанных карбонатно-шлаковых вяжущих [1, 2, 5-7, 11, 12].

Проведённая оценка термодинамической и кинетической возможности взаимодействия карбонатных пород с щелочным активизатором NaOH позволила выявить реакционную активность карбоната магния $MgCO_3$ в щелочной среде и химическую инертность карбоната кальция $CaCO_3$.

Качественный химический анализ подтвердил реакционно-химическую активность карбонатных пород, содержащих $MgCO_3$, при взаимодействии со щелочами с образованием гидроксида магния $Mg(OH)_2$, карбоната щелочного металла Me_2CO_3 и реакционно неактивного карбоната кальция $CaCO_3$.

Выделены пять основных стадий физико-химических процессов, происходящих в гетерогенной доломитощелочной системе:

- 1 – адсорбция щелочи на твёрдой поверхности карбонатной породы;
- 2 – химическое взаимодействие реагента с карбонатной породой с образованием твёрдого $Mg(OH)_2$ и ионно-растворённого карбоната щелочного металла Me_2CO_3 ;
- 3 – десорбция продуктов реакции с твёрдой поверхности;
- 4 – обратная диффузия продуктов реакции и их выход в жидкую фазу;
- 5 – диффузия новых порций щелочного реагента к твёрдой поверхности карбонатной породы.

Из анализа основных стадий физико-химического изменения доломитощелочной смеси можно сделать вывод о том, что скорость химической реакции между карбонатной породой и щёлочью в доломитощелочной системе определяется скоростью внутренней диффузии щелочного реагента к зоне реакции через слой продуктов реакции, т.е. кинетика процесса является диффузионной.

Составы на основе карбонатных пород, содержащих реакционно-активный карбонат магния $MgCO_3$, на 28-е сутки твердения показали прочность в пределах 8–25 МПа при расходе NaOH в пределах 2–8 % от массы сухих компонентов. Состав на основе кальцита с расходом щёлочи 5 % по массе практически не обладал прочностью, что свидетельствует об отсутствии реакционного процесса между кальцитом и щёлочью. Наблюдаемое взаимодействие доломитизированных карбонатных пород с щёлочью позволило выдвинуть гипотезу о возможности образования в системе «доломит–щёлочь» твердеющей структуры, основной вклад в формирование которой вносит кристаллический брусит $Mg(OH)_2$, образующийся в результате реакционного процесса на поверхности эпитаксиально-активного кальцита.

Установлено, что процесс твердения доломитощелочных систем обусловлен следующими факторами:

– топохимическим образованием на поверхности частиц карбонатной породы нерастворимого брусита $Mg(OH)_2$ и ионно-растворимого карбоната натрия Na_2CO_3 с последующим распространением реакции в глубь зерна и заполнением капиллярного пространства коллоидными массами брусита вследствие возникающего осмотического давления;

– перекристаллизацией компонентов системы и образованием в молекулярно-пористом пространстве частиц кальцита, двойных кристаллогидратных солей состава $Na_2CO_3 \cdot CaCO_3 \cdot 2H_2O$, сокристаллизацией продуктов с образованием оксикарбонатов магния типа $MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 3H_2O$ и безводных солей состава $Na_2CO_3 \cdot MgCO_3$, $2NaCO_3 \cdot CaCO_3$, $Na_2CO_3 \cdot CaCO_3$ [1, 2, 5–7, 9–11].

Цементация всех новообразований дополнительно обусловлена эпитаксиальным наращиванием их на кристаллах кальцита, что определяет рост прочности образующегося камня во времени. Наличие указанных новообразований подтверждается результатами рентгенофазового анализа.

Для превращения твердеющего на воздухе неводостойкого доломитощелочного вяжущего в более водостойкие твердеющие структуры применили основной доменный гранулированный шлак, способный использовать в качестве активизатора твердения не только добавку $NaOH$, но и щелочь, полученную в ходе реакции гидролизной извести шлака и Na_2CO_3 , образующейся в результате предыдущего реакционного взаимодействия химически активного $MgCO_3$ карбонатной породы со щёлочью.

С этой целью методом прессования при влажности смеси 12 % и удельном давлении прессования 15 МПа были изготовлены образцы-кубы размером $30 \times 30 \times 30$ мм при использовании сырьевой шихты на основе доломитизированного известняка, доломита и кальциевого известняка, гранулированного шлака Новолипецкого металлургического комбината и раствора щелочи $NaOH$ в количестве 3 и 5 % от массы вяжущего в пересчете на сухое вещество. Этими экспериментами показано, что прочность образцов на доломите и доломитизированном известняке превышает прочностные показатели образцов на кальциевом известняке на 30–50 %. Такое повышение прочности можно объяснить образованием кристаллов брусита $Mg(OH)_2$ и гидромагнетита $MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 3H_2O$. При анализе скорости набора прочности образцов было также замечено, что образцы с 5-% содержанием щелочи оказались менее прочными и менее скоростными по набору прочности, чем образцы с 3 % содержанием щелочи. Это можно объяснить тем, что избыток $NaOH$ приводит к образованию значительного количества соды Na_2CO_3 , полностью не вступающей в реакцию с гидролизной известью шлака и вредно отражающейся на прочностных показателях прессованных образцов. Для количественной оценки содержания основных продуктов реакции бруситизации в доломитшлаковой системе при расходе щелочи 3 % и 5 % был проведен химический анализ, который установил, что скорость поглощения Na_2CO_3 при введении 3 % $NaOH$ происходит более интенсивно, чем при введении 5 % $NaOH$. И в конечные сроки твердения доломитшлаковой системы, активизированной щелочью в количестве 5 %, часть Na_2CO_3 не связывается и остаётся в свободном состоянии. На основании проведенных экспериментов и теоретических объяснений был сделан вывод о том, что введение щелочи $NaOH$ как активизатора твердения доломитшлаковой системы не должно превышать 3 % по массе. Разработаны схемы реакционных процессов в кальцитшлакощелочной и доломитшлакощелочной композиции, определяющих формирование прочности.

Согласно схеме (рис. 1), реакционный процесс образования продуктов гидратации в карбонатно-шлаковом вяжущем на кальциевом известняке и щелочном активизаторе $NaOH$ связан с воздействием щелочного раствора на шлаковые минералы и шлаковое стекло. Кальцит не затрагивается щелочью, но служит идеальной эпитаксиальной подложкой для кристаллизации продуктов гидратации шлака, и прежде всего гидросиликатов и гидроалюминатов.

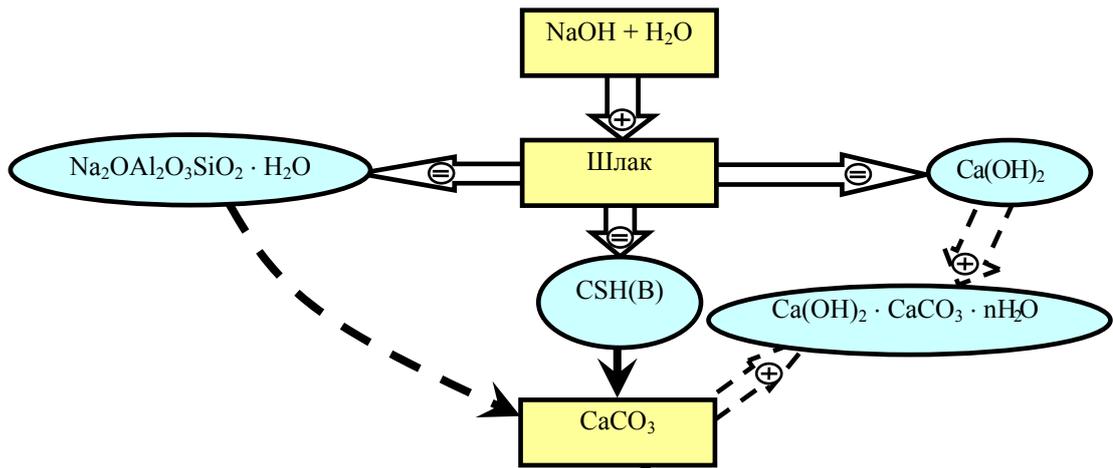


Рис. 1. Реакционный процесс образования продуктов гидратации в карбонатно-шлаковом вяжущем на кальциевом известняке и щелочном активаторе NaOH

В доломитошлакощелочной системе (рис. 2) происходит протекание двух конкурирующих реакционных процессов: часть щелочи вступает в реакцию бруситизации с карбонатной породой с образованием соды Na_2CO_3 , брусита $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и кальцита CaCO_3 , а другая часть щелочи взаимодействует со шлаком. Образовавшаяся в результате реакции бруситизации сода вступает в реакцию каустификации с известью $\text{Ca}(\text{OH})_2$, в результате чего образуются вторичная щелочь NaOH и кальцит CaCO_3 . Одна часть вторичной щелочи идет на взаимодействие с карбонатной породой, а другая – на взаимодействие со шлаком. Кальцит CaCO_3 , образовавшийся в доломитошлакощелочной системе в результате процессов каустификации и бруситизации, кристаллизуется на изоморфных ему частицах исходного кальцита и выступает в качестве эпитаксиальной подложки для наращивания на его кристаллах шлаковых новообразований. Основной продукт бруситизации $\text{Mg}(\text{OH})_2$ может переходить в $3\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, обеспечивая с $\text{Mg}(\text{OH})_2$ дополнительную прочность доломитошлакощелочному вяжущему.

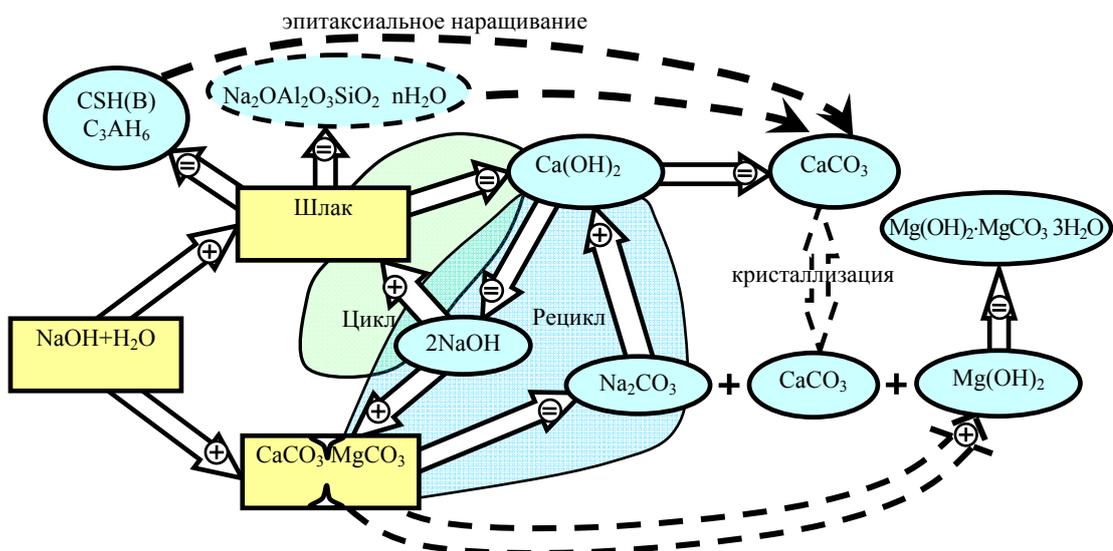


Рис. 2. Реакционный процесс активации шлака щелочью, бруситизации магнезита и каустификации образовавшейся соды гидролизной известью с регенерацией щелочи при наличии доломита в известняке:

– исходные вещества;
 – продукты реакции;
 \rightleftarrows – акт взаимодействия;
 \Rightarrow – акт получения продуктов;
 \dashrightarrow – эпитаксиальное наращивание

С помощью рентгенофазового анализа изучен состав продуктов взаимодействия в тройной системе «шлак–карбонат–щелочь». Идентифицированы минералы: кальцит, β-кварц, анкерит. Гидратные силикатные фазы представлены тоберморитоподобными волокнистыми гидросиликатами кальция. Алюминатная фаза образует гексагональный метастабильный двухкальциевый гидроалюминат или гидрогеленит. Из-за содержания в шлаке алюминатной фазы, при её гидратации с водой возможно образование соединений типа гидрокарбоалюминатов кальция [5–7, 11].

На следующем этапе работы в соответствии с проведенными теоретическими исследованиями осуществлялись получение и анализ уравнений регрессии изменения предела прочности на сжатие карбонатно-шлаковых материалов на первые, седьмые, двадцать восьмые сутки и их коэффициента размягчения в зависимости от рецептурных и технологических факторов, построение изолиний, оптимизация составов с помощью полученных зависимостей. Установлено, что прочность карбонатно-шлаковой смеси зависит от таких факторов, как количество шлака, его дисперсность, концентрация щелочного раствора, количество воды затворения.

В ходе экспериментов использовались молотые липецкий гранулированный шлак ($S_{уд}=300-350 \text{ м}^2/\text{кг}$) и доломитизированный известняк трех дисперсностей ($S_{уд}=300; 600; 900 \text{ м}^2/\text{кг}$), раствор NaOH. Для определения влияния факторов на прочность и водостойкость карбонатно-шлаковых композиций, оптимизации их состава был проведен многофакторный эксперимент [4]. Варьируемыми факторами были параметры состава:

- X_1 – доля шлака в системе компонентов вяжущего шлак–известняк;
- X_2 – количество воды затворения в % от массы сухой смеси;
- X_3 – расход щелочного компонента в % от массы композиционного вяжущего;
- X_4 – удельная поверхность известняка, $\text{см}^2/\text{г}$.

По результатам изменения прочности карбонатно-шлаковых композитов на сжатие, а также их коэффициентов размягчения методами планирования эксперимента [4] получены зависимости в виде полиномов первой и второй степени.

$$R_{сж}^{28} = 3,850 + 48,179 \cdot X_1 - 4,317 \cdot X_2 + 6,471 \cdot X_3 + 5,760 \cdot 10^{-4} \cdot X_4 - 10,894 X_1^2 + 0,210 X_2^2 - 0,514 X_3^2 + 0,342 \cdot 10^{-7} \cdot X_4^2;$$

$$K_p = 0,281 + 0,450 \cdot X_1 + 0,030 \cdot X_2 + 0,043 \cdot X_3 + 2,500 \cdot 10^{-4} \cdot X_4 - 0,287 X_1^2 - 0,011 X_2^2 - 0,006 X_3^2 - 0,238 \cdot 10^{-8} \cdot X_4^2.$$

Наименьшее влияние на композиционную систему оказывает дисперсность известняка, наибольшее – доля шлака и щелочи. С целью выявления оптимального расхода щелочи в карбонатно-шлаковых композициях были получены зависимости $R_{сж}^{28}$ и K_p от исследуемых факторов:

- X_1 – при значениях (0,5; 0,6; 0,7);
- X_2 – при значениях (8; 12; 16) %;
- X_3 – при значениях (3000; 6000; 9000) $\text{см}^2/\text{г}$;
- Уравнения изолиний имеют вид:
при $X_4 = 3000 \text{ см}^2/\text{г}$

$$R_{сж}^{28} = 5,8860 + 48,179 X_1 + 4,317 X_2 + 6,471 X_3 - 10,894 X_1^2 + 0,209 X_2^2 - 0,154 X_3^2;$$

при $X_4 = 6000 \text{ см}^2/\text{г}$

$$R_{сж}^{28} = 8,538 + 48,179 X_1 + 4,317 X_2 + 6,471 X_3 - 10,894 X_1^2 + 0,209 X_2^2 - 0,154 X_3^2;$$

при $X_4 = 9000 \text{ см}^2/\text{г}$

$$R_{сж}^{28} = 11,807 + 48,179 X_1 + 4,317 X_2 + 6,471 X_3 - 10,894 X_1^2 + 0,209 X_2^2 - 0,154 X_3^2.$$

Анализ результатов исследований прочности и водостойкости карбонатно-шлаковых вяжущих, приведенных на рис. 3 и в уравнениях зависимостей $R_{сж} = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$, $K_p = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$, свидетельствует о том, что путём изменения рецептурных и технологических факторов можно изменять их прочность в пределах от 7,5 до 50,8 МПа, а коэффициент водостойкости – от 0,65 до 0,83. Учитывая, что при домоле известняка с 6000 до 9000 см²/г значительно возрастают дополнительные затраты электроэнергии, для практического применения следует рекомендовать дисперсность известняка от 3000 до 6000 см²/г. Наибольшее влияние на набор прочности композиционной системы оказывают два фактора: доля шлака в составе композиционного вяжущего и доля щелочи от массы композиционного вяжущего или шлака. Оптимальное количество щелочи для композиционной системы карбонатно-шлаковых вяжущих составляет от 2 до 3 % от массы вяжущего в пересчете на сухое вещество.

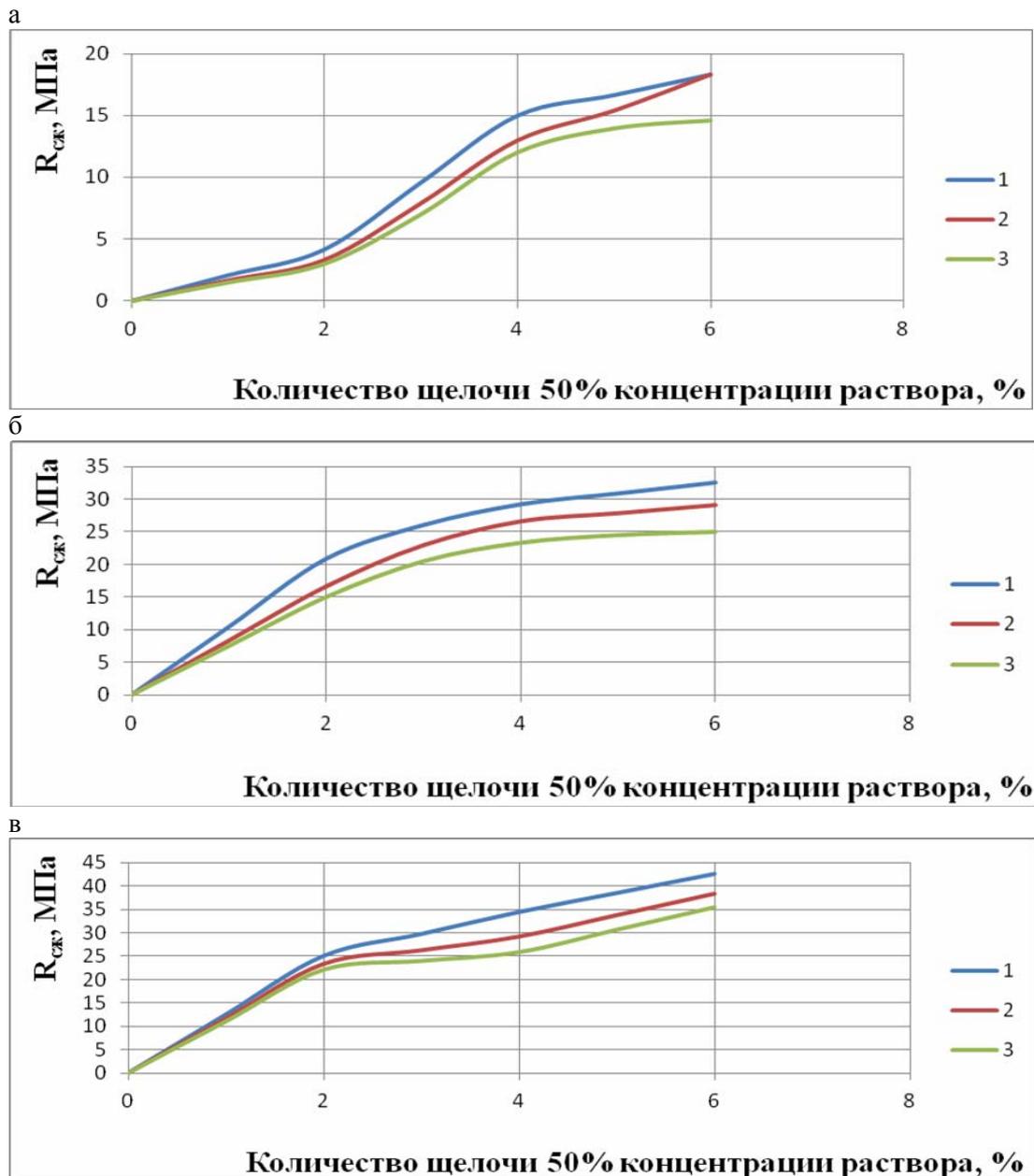


Рис. 3. Прочность при сжатии карбонатно-шлаковых вяжущих в зависимости от содержания щелочи при водосодержании 8 %, 12 %, 16 % и удельной поверхности известняка 600 м²/кг на: а – 1-е сутки твердения; б – 7-е сутки твердения; в – 28-е сутки твердения.

Номера линии на графиках: 1, 2, 3 – количество шлака в композициях 0,7; 0,6; 0,5; соответственно

Анализируя характер пор по ГОСТ 12730.3–78 и ГОСТ 12730.4–78, сделали вывод о том, что карбонатно-шлаковые композиции характеризуются средним размером пор ($\lambda=1,1$) и однородностью условно-замкнутых пор ($\alpha=0,3-0,5$). Карбонатно-шлаковые материалы с содержанием шлака 60 % и приведенными параметрами пористости позволили получить их морозостойкость марки F200 и более, что вполне можно использовать для изготовления мелкоштучных изделий. Экспериментально был определен коэффициент теплопроводности композиционного карбонатно-шлакового материала, который находился в пределах 0,32–0,41 Вт/(м·°С) [5]. Установлено, что на его величину оказывают влияние количество шлака, удельная поверхность известняка, плотность композита. Композит с большим содержанием шлака показал более низкую теплопроводность. С уменьшением удельной поверхности известняка происходит снижение плотности композита, что сопровождается падением коэффициента теплопроводности.

Технико-экономический анализ, проведенный для одного из вариантов использования карбонатно-шлакового вяжущего при изготовлении мелкоштучных изделий, показал, что себестоимость безобжигового кирпича на предлагаемом вяжущем ниже себестоимости силикатного в 1,3 раза и керамического обжигового в 2,2 раза, даже при условии транспортировки доменного гранулированного шлака на расстояние 400–600 км [1–3, 5–12]. Это дает возможность выбора карбонатно-шлаковых вяжущих для их использования в изготовлении изделий, эксплуатирующихся либо в сухих условиях, либо в среде повышенной влажности. Применяя современные методы гидрофобизации готовых изделий с низким коэффициентом водостойкости, можно существенно увеличить их срок эксплуатации.

Список литературы

1. Викторова, О.Л. Карбонатно-шлаковые композиционные строительные материалы: автореф. дис. ... канд. техн. наук / О.Л. Викторова. – Пенза: ПГАСА, 1998. – 24 с.
2. Калашников, В.И. Теоретические предпосылки поверхностной активности карбонатов и формирования прочности карбонатно-цементных и карбонатно-шлаковых вяжущих / В.И. Калашников, В.Л. Хвастунов, О.Л. Викторова [и др.] // Современные проблемы строительного материаловедения: материалы Пятых академических чтений РААСН. – Воронеж, 1999. – С. 181–187.
3. Калашников, В.И. Глиношлаковые строительные материалы / В.И. Калашников, В.Ю. Нестеров, В.Л. Хвастунов [и др.]; под общ. ред. д.т.н., проф. В.И. Калашникова. – Пенза: ПГАСА, 2000. – 206 с.
4. Гарькина, И.А. Планирование эксперимента. Обработка опытных данных / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, А.П. Прошин, Ю.А. Соколова; под ред. д.т.н., проф. А.М. Данилова. – М.: Палеотип, 2005. – 272 с.
5. Шумкина, А.А. Модифицированные доломитшлаковые вяжущие и строительные материалы на их основе: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.А. Шумкина. – Пенза: ПГУАС, 2005. – 22 с.
6. Хвастунов, В.Л. Безобжиговые малощелочные минерально-шлаковые вяжущие и бетоны на их основе / В.Л. Хвастунов, В.И. Калашников, А.В. Хвастунов // Технологии бетонов. Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. – 2007. – №1. – С. 8–10.
7. Хвастунов, В.Л. Минерально-шлаковые вяжущие и бетоны на их основе / В.Л. Хвастунов, В.И. Калашников // Цементы, бетоны, строительные растворы и сухие смеси. Ч. II: справ. / Ю.А. Беленцов, В.Н. Вернигорова, В.С. Демьянова, В.И. Калашников, В.Л. Хвастунов [и др.]; под ред. П.Г. Комохова. – СПб.: НПО «Профессионал», 2009. – С. 118–150.
8. Калашников, В.И. Сравнительная оценка виброуплотненного и вибропрессованного глиношлакового и карбонатно-шлакового безобжигового кирпича различного назначения: монография / В.И. Калашников, В.Л. Хвастунов, А.А. Карташов. – Деп. в ФГУП ВНИИТПИ, 2003. – 114 с.

9. Калашников, В.И. Формирование прочности карбонатно-шлаковых и каустифицированных вяжущих: монография / В.И. Калашников, В.Л. Хвастунов, Р.Н. Москвин. – Деп. в ФГУП ВНИИТПИ, № 11886. Вып. 1, 2003. – 97 с.
10. Калашников, В.И. Карбонатно-шлаковые композиционные строительные материалы: монография / В.И. Калашников, В.Л. Хвастунов, О.Л. Викторова. – Деп. в ФГУП ВНИИТПИ, № 11888. Вып.1, 2003. – 101 с.
11. Хвастунов, В.Л. Экспериментально-теоретические основы получения композиционных вяжущих и строительных материалов из шлаков и высокодисперсных горных пород: дис. ... д-ра техн. наук / В.Л. Хвастунов. – Пенза: ПГУАС, 2005. – 534 с.
12. Калашников, В.И. Методология получения геосинтетических и геошлаковых композиционных строительных материалов на основе осадочных силицитовых горных пород: монография / В.И. Калашников, Ю.В. Грачева, К.Н. Махамбетова. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 120 с.

References

1. Viktorova, O.L. Carbonate-slag composite building materials: abstract of the dissertation of the candidate of sciences / O.L. Viktorova. – Penza: Penza State Academy of Architecture and Construction, 1998. – 24p.
2. Kalashnikov, V.I. Theoretical background of the surface activity of carbonates and the formation of the strength of carbonate-cement and carbonate-slag binders / V.I. Kalashnikov, V.L. Khvastunov, O.L. Viktorova [etc.] // Modern problems of building materials science: materials of the fifth academic readings of the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences. – Voronezh, 1999. – P. 181–187.
3. Kalashnikov, V.I. Clay-slag building materials / V.I. Kalashnikov, V.Yu. Nesterov, V.L. Khvastunov [etc.]; under the general editorship of the doctor of sciences, professor V.I. Kalashnikov. – Penza: Penza State Academy of Architecture and Construction, 2000. – 206 p.
4. Garkina, I.A. Planning an experiment. Processing of experimental facts / I.A. Garkina, A.M. Danilov, A.P. Proshin., Yu.A. Sokolova; under the general editorship of the doctor of sciences, professor A.M. Danilov. – M.: Paleotype, 2005. – 272 p.
5. Shumkina, A.A. Modified dolomite-slag binders and building materials based on them: abstract of the dissertation of the candidate of sciences / A.A. Shumkina. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2005. – 22 p.
6. Khvastunov, V.L. Unbaked low alkaline mineral-slag binders and concretes based on them / V.L. Khvastunov, V.I. Kalashnikov, A.V. Khvastunov // Concrete Technologies. Building materials, equipment and technologies of the XXI century. – 2007. – Vol. 1. – P. 8–10.
7. Khvastunov, V.L. Mineral-slag binders and concretes based on them / V.L. Khvastunov, V.I. Kalashnikov // Cements, concretes, mortars and dry mixes. P. II: reference book / Yu.A. Belentsov, V.N. Vernigorova, V.S. Demyanova, V.I. Kalashnikov, V.L. Khvastunov, [etc.]; Edited by P.G. Komokhov. – St. Petersburg: Scientific and Professional Association «Professional», 2009. – P. 118–150.
8. Kalashnikov, V.I. Comparative assessment of vibropressed and vibropressed clay-slag and carbonate-slag unbaked bricks for various purposes: monograph / V.I. Kalashnikov, V.L. Khvastunov, A.A. Kartashov. – Dep. in Federal State Unitary Enterprise, All-Union Scientific Research Institute of the problems of scientific and technological progress and information in construction, 2003. – 114 p.
9. Kalashnikov, V.I. Formation of the strength of carbonate-slag and caustifying binders: monograph / V.I. Kalashnikov, V.L. Khvastunov, R.N. Moskvina. – Dep. in Federal State Unitary Enterprise, All-Union Scientific Research Institute of the problems of scientific and technological progress and information in construction. Vol. 11886 (1), 2003. – 97 p.
10. Kalashnikov V.I. Carbonate-slag composite building materials: monograph / V.I. Kalashnikov, V.L. Khvastunov, O.L. Viktorova. – Dep. in Federal State Unitary Enterprise, All-Union Scientific Research Institute of the problems of scientific and technological progress and information in construction. Vol. 11888 (1), 2003. – 101 p.

11. Khvastunov, V.L. Experimental and theoretical foundations for the production of composite binders and building materials from slags and highly dispersed rocks: dissertation of the doctor of sciences / V.L. Khvastunov. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2005. – 534 p.

12. Kalashnikov, V.I. Methodology of obtaining geosynthetic and geoslag composite building materials based on sedimentary silicite rocks: monograph / V.I. Kalashnikov, Yu.V. Gracheva, K.N. Makhambetova. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2011. – 120 p.

УДК 691.175+624.21.095.3

*Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет*

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

Иноземцев Сергей Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные материалы
и материаловедение»
E-mail: inozemcevss@mgsu.ru

*National Research Moskovsky State University
of Civil Engineering*

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

Inozemtsev Sergey Sergeevich,
Doctor of Sciences, Associate Professor
of the department «Building materials and
materiology»
E-mail: inozemcevss@mgsu.ru

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛАСТОМЕРНОГО БЕТОНА ДЛЯ УСТРОЙСТВА ЗОН СОПРЯЖЕНИЯ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ С ДЕФОРМАЦИОННЫМИ ШВАМИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

С.С. Иноземцев

Дан аналитический обзор представленной в отечественной и зарубежной литературе научно-технической информации об эластомерных материалах, применяемых для устройства зон сопряжения дорожной одежды с деформационными швами мостовых сооружений. Установлены недостатки и преимущества рассматриваемых материалов. Рассмотрены методы исследования свойств эластомерных бетонов. Предложена декомпозиция критериев качества материалов, применяемых в сопряжении дорожной одежды с деформационными швами, позволяющая сформировать подход при разработке и проектировании составов, а также отражающая эксплуатационную надежность эластомерных бетонов.

Ключевые слова: эластомерный бетон, свойства, качество, деформационный шов, дорожное покрытие

EXPERIENCE IN THE APPLICATION OF ELASTOMERIC CONCRETE FOR THE CONTACT AREA OF EXPANSION JOINT WITH PAVING

S.S. Inozemtsev

The article gives an analytical review of scientific and technical information about elastomeric materials used for the device of zone clothing and expansion joints of bridge structures presented in domestic and foreign literature. Some disadvantages and advantages of the materials in question are identified. Methods for studying the properties of elastomeric concretes are considered. The proposed decomposition of the quality criteria of materials used in mated road pavement with expansion joints, allows to create approaches for the development and design of compositions, as well as reflect the operational reliability of elastomeric concretes.

Keywords: elastomeric concrete, properties, quality, expansion joint, paving

Введение

Современная конструкция мостовых сооружений предусматривает наличие разрывов в основных несущих покрытиях по всей длине, что обусловлено температурным расширением материалов, используемых в конструкциях и вызывающих различного рода деформации и локальную концентрацию напряжений.

Деформационные швы в процессе эксплуатации подвергаются большому количеству воздействующих факторов, в соответствии с которыми для этих конструкций будет определяться комплекс требований, гарантирующих их эксплуатационную пригодность. Основные воздействующие факторы представлены на рис. 1.

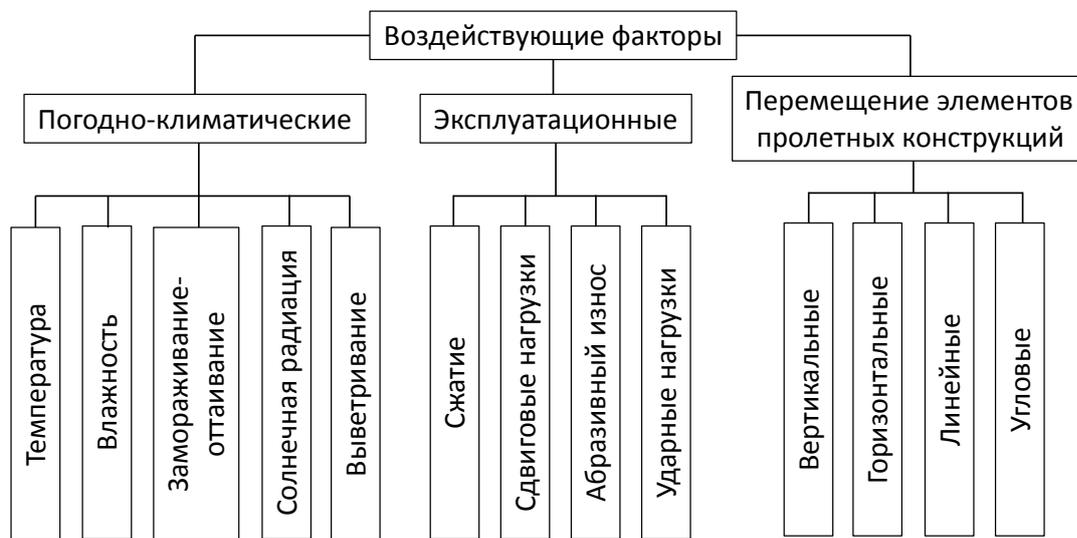


Рис. 1. Классификация факторов, воздействующих на конструкции деформационных швов

В большей степени фактор перемещения концов пролетных строений необходимо учитывать при проектировании всей конструкции деформационного шва, в то время как природно-климатические и эксплуатационные факторы оказывают существенное влияние на материал, используемый в узлах сопряжения дорожной одежды с деформационными швами.

Для устранения указанного негативного эффекта в конструкции предусмотрены разрывы несущих элементов (деформационные швы) как между концами пролетных строений и береговыми участками, так и между самими пролетными строениями. В настоящее время для мостовых конструкций разработаны и эксплуатируются деформационные швы, отличающиеся друг от друга конструкцией и используемыми материалами. Деформационные швы с упругим компенсатором являются наиболее перспективными для восприятия всесторонних средних и больших перемещений пролетных строений мостов. В конструкции деформационных швов с упругим компенсатором основным элементом является полый многосекционный профиль, который фиксируется с помощью клея между специально выполненными зонами сопряжения, из бетона или полимербетона (приливов или окаймления деформационных швов).

Основным причинами образования дефектов в зонах сопряжения покрытия и элементов деформационных швов является воздействие автомобильного транспорта, которое обуславливается повышением интенсивности транспортного потока, возрастанием осевых нагрузок [1]. В результате происходит возрастание динамических воздействий на деформационные швы и узлы сопряжения с дорожным покрытием, имеющее циклический характер [2]. В таких условиях вне зависимости от конструкции деформационных швов в процессе эксплуатации неизбежно образование колеи на асфальтобетонном покрытии, что приводит к нарушению зоны сопряжения, и к сдвиговым нагрузкам добавляется ударное воздействие автомобильного колеса.

Таким образом, исходя из условий эксплуатации, деформационные швы должны быть устойчивыми как к механическим воздействиям (динамическим, ударным, усталостным, истиранию), так и стойкими к воздействиям внешних факторов (противогололедным реагентам, перепадам температуры и т.п.) [3...7].

Основная часть

Единственным нормативным документом, регламентирующим требования к материалам, используемым в узлах сопряжения дорожной одежды с деформационными швами, является Отраслевой дорожный методический документ ОДМ 218.2.002-2009 «Методические рекомендации по применению современных материалов в сопряжении дорожной одежды с деформационными швами мостовых сооружений», в котором представлены рекомендованные материалы и их основные характеристики. В качестве рекомендуемых для применения в узлах сопряжения дорожной одежды дорожного полотна с конструкциями деформационных швов допускается использование различных типов материалов: асфальтобетоны, цементобетоны, герметизирующие мастики, пропиточные составы и пластобетоны.

В связи с отсутствием общего стандарта, устанавливающего единые требования по физико-механическим и эксплуатационным свойствам материалов, используемых в узлах сопряжения дорожной одежды с конструкциями деформационных швов, в ОДМ 218.2.002-2009 приведены характеристики материалов, регламентированные отдельными стандартами на материалы (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Требования по показателям свойств материалов, применяемых в сопряжении дорожной одежды с деформационными швами

| Наименование показателя | Рекомендованные материалы | | | | | | | | | | |
|--|---------------------------|-----|-------|-----|-----------------------|---------------|-------------|-----|--------------|--------------|-------------|
| | Асфальтобетон | ЩМА | Литой | МЩА | Полимер-асфальтобетон | Тяжелый бетон | Специальный | ВМБ | Безусадочный | Ударостойкий | Пластобетон |
| Предел прочности: при сжатии при 10 °С при сжатии при 20 °С при сжатии при 50 °С при сжатии при 0 °С при расколе при 0 °С при изгибе | | | | | | | + | | | | |
| Водостойкость | + | | + | + | + | | | | | | |
| Сдвигоустойчивость: коэфф. внутреннего трения сцепление при сдвиге | + | | | + | + | | | | | | |
| Водонасыщение / водопоглощение | + | | + | + | + | | | + | | | + |
| Пористость минеральной части | + | | + | + | + | | | | | | |
| Остаточная пористость | + | | | + | + | | | | | | |
| Глубина вдавливания штампа | | | + | | | | | | | | |
| Морозостойкость | | | | | | + | + | + | + | | |
| Средняя плотность | | | + | | | + | | | | | |
| Водонепроницаемость | | | | | | + | + | + | + | | |
| Истираемость | | | | | | + | | + | | | + |
| Динамическая выносливость | | | | | | | | | + | | |
| Деформации при усадке | | | | | | | | | | | + |

П р и м е ч а н и е : ЩМА – щебеночно-мастичный асфальтобетон; МЩА – специальный мастично-щебеночный асфальтобетон; ВМБ – высокопрочный мелкозернистый полимербетон.

Анализ данных таблицы показывает, что требования к материалам предъявляются исходя из особенностей рассматриваемых материалов и компонентов, используемых для их производства, и не учитывают их назначение и специфику работы в конструкции. Однако целесообразно выделить схожую для каждого материала классификацию показателей, которая отражает общие свойства материала. Так, физико-механические свойства характеризуются различными показателями прочности, определяемыми при различных температурных условиях и схемах нагружения. Общим показателем, который характеризует капиллярно-поровое строение материалов, является водонасыщение (водопоглощение) и сопряженное с ним свойство – водонепроницаемость. Стойкость к эксплуатационным факторам отражают показатели изменения прочности при циклическом воздействии климатических факторов, особенно связанных с объемными внутренними деформациями материала (замораживание-оттаивание, увлажнение-высыхание, нагревание-охлаждение). Также целесообразно выделить показатели, характеризующие поведение материала в моделируемых условиях нагружения, аналогичные эксплуатационным: сдвигустойчивость, динамическая выносливость и истирание.

Учитывая эксплуатационные факторы, воздействующие на конструкцию деформационных швов, среди представленных разновидностей применяемых материалов можно выделить их положительные и отрицательные показатели качества, которые будут определять долговечность (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Качественная характеристика материалов, применяемых в сопряжении дорожной одежды с деформационными швами

| Наименование показателя | Рекомендованные материалы | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------|-----|-------|-----|-----------------------|---------------|-------------|-----|--------------|--------------|-------------|
| | Асфальтобетон | ЩМА | Литой | МЦА | Полимер-асфальтобетон | Тяжелый бетон | Специальный | ВМБ | Безусадочный | Ударостойкий | Пластобетон |
| Прочность при низких температурах | С | С | С | С | С | В | В | В | В | В | С |
| Прочность при повышенных температурах | Н | Н | Н | Н | Н | В | В | В | В | В | С |
| Водостойкость | Н | Н | Н | Н | Н | С | С | С | С | С | В |
| Водонепроницаемость | Н | Н | Н | Н | Н | С | С | С | С | С | В |
| Морозостойкость | Н | Н | Н | Н | Н | С | С | С | С | С | В |
| Сдвигустойчивость | С | С | С | С | С | В | В | В | В | В | В |
| Стойкость к истиранию | С | С | С | С | С | В | В | В | В | В | В |
| Динамическая выносливость | С | С | С | С | С | Н | Н | Н | Н | Н | В |
| Эластичность | С | С | С | С | С | Н | Н | Н | Н | Н | В |

П р и м е ч а н и е : в таблице указана сравнительная оценка материалов по уровню качества: Н – низкий; С – средний; В – высокий.

С учетом сравнительной оценки качественных особенностей материалов наиболее предпочтительным вариантом, обеспечивающим высокую способность сопротивляться всем воздействующим факторам, является пластобетон. Наиболее распространенным материалом на основе полимерных смол, применяемым в сопряжении дорожной одежды с деформационными швами, является эластомерный бетон. Для получения эластомерного бетона используется двухкомпонентное полимерное вяжущее на основе

как эпоксидной смолы, так и полиуретана, а в качестве заполнителей могут использоваться кварцевый песок, отсева дробления гранита или их смесь.

В условиях отсутствия четко сформулированных требований к материалам, используемым в зонах сопряжения покрытия и элементов деформационных швов, на российском рынке в настоящее время представлены материалы, критерии качества которых производители определяют самостоятельно. Анализ представленных на отечественном рынке эластомерных бетонов [8...11] показал, что все материалы по показателям свойств отличаются незначительно, а требования к ним регламентируются в основном зарубежными стандартами, что свидетельствует об отсутствии базы нормативных документов, обеспечивающих единство методик и технических условий в строительной отрасли России.

В многочисленных исследованиях американских ученых [12...18], направленных на выявление причин преждевременного выхода из строя деформационных швов на магистралях различного назначения, отмечается, что в большинстве случаев причиной образования дефектов является неспособность материалов, используемых в конструкции, воспринимать воздействующие на них эксплуатационные нагрузки. Для решения этой задачи был разработан эластомерный бетон, который впервые был использован в 1979 году в Канаде в узлах деформационных швов. Практика применения такого бетона показала, что он обладает необходимой стойкостью к климатическим факторам и обеспечивает требуемый срок службы мостовых конструкций.

В 1990 году Рональдом Уотсоном [12] проведены первые исследования, в рамках которых он сформулировал минимальные требования к эластомерному бетону по показателям: упругости при 5 % и 7,5 % деформации (не менее 80 % и 75 %, соответственно), пределу прочности при сжатии (не менее 3,1 МПа) и адгезионной прочности к бетону (не менее 1,72 МПа).

В 1994 году Мичиганским департаментом транспорта [13] в ходе исследований эластомерных бетонов десяти производителей было установлено, что обязательными нормируемыми показателями качества являются предел прочности при сжатии, предел прочности при растяжении, удлинение.

В 2007 году компания Jeff Zell Consultants, Inc. [14] провела анализ применяемых в штате Пенсильвания (США) эластомерных бетонов и требований, которые предъявлялись к ним различными производителями и дорожными департаментами, в результате чего были установлены дополнительные 5 показателей: предел прочности при растяжении, удлинение, предел прочности при расколе, твердость и ударная прочность.

В 2001 году Куо и Ортега [15, 16] провели испытания на долговечность деформационных швов с применением различных материалов на круговом стенде, на котором материал шва подвергался циклическому воздействию колесной нагрузкой со скоростью 17 км/ч. В результате ускоренного метода испытаний установлено, что срок службы некоторых систем с применением эластомерного бетона составит не менее 20 лет.

В 2005 году Департаментом транспорта штата Канзас (США) [17] проведены натурные сравнительные испытания деформационных швов с применением цементного бетона и эластомерного бетона. В результате установлено, что при эксплуатации на деформационных швах не обнаружено признаков отслоения эластомерного бетона в узлах сопряжения с дорожной одеждой.

В работе [17] отмечается, что в нормативных документах США также отсутствуют требования и комплексные методы исследования эластомерных бетонов. Разрабатываемый Американской ассоциацией испытания материалов American Society for Testing and Materials (ASTM) нормативный документ D04.34.12 из-за отсутствия единого мнения в экспертной группе не был одобрен, поэтому при контроле качества в лабораториях и на объектах применяются нормативные документы, разработанные для цементобетонов, резин и пластмасс. Кроме того, в большинстве контролируемых органов в различных штатах США для оценки качества эластомерных бетонов используются не специализированные нормативные документы, а документы, разработанные для регулирования качества других строительных материалов. В большинстве же

случаев испытательные методики применяются стандартные, но встречаются и локальные методы, разработанные конкретной лабораторией или дорожным департаментом.

Перечень основных показателей свойств, которые контролируются в дорожных департаментах различных штатов, представлен в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Контролируемые показатели свойств эластомерного бетона в различных штатах

| Наименование показателя | Методика ASTM | Частота использования | Контролируемые показатели свойств в различных штатах (США) | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|---------------|-----------------------|--|---------|----------|----------|--------|-------------|---------|--------|-------------|----------|-------------------|----------|-------|--------------------|---|
| | | | Алабама | Флорида | Джорджия | Иллинойс | Канзас | Массачусетс | Мичиган | Невада | Нью-Мексико | Нью-Йорк | Северная Каролина | Оклахома | Техас | Западная Вирджиния | |
| Сопротивление удару | D 2444 (e) | 2 | | | | + | | + | | | | | | | | | |
| Прочность при растяжении | D 638 (b,e) | 11 | + | + | + | | + | | | | + | + | + | + | + | + | + |
| Сопротивление разрыву | D 624 (b) | 6 | | | | | + | | | | + | | + | + | | + | + |
| Прочность при сжатии | C 579 (e) | 8 | | + | | + | | + | + | + | + | + | + | | | | |
| Твердость | D 2240 (b,e) | 5 | | + | + | | | | | | | + | | | + | | + |
| Когезионная прочность | C 882 (e) | 4 | | + | | + | | | + | | | | | + | | | |
| Растяжимость | D 638 (b) | 3 | | | + | | + | | | | | | | + | | | |
| Стойкость к деформациям | C 672 (e) | 1 | | | | + | | | | | | | | | | | |
| Упругость | C 579 (e) | 2 | | | | | | + | | | | + | | | | | |
| Хрупкость | D 746 (b) | 1 | | | | | | | | | | + | | | | | |
| Стойкость к старению | D 1149 (b) | 1 | | | | | | | | | | + | | | | | |
| Стойкость к маслу и солям | D 471 (b) | 1 | | | | | | | | | | + | | | | | |
| Вязкость | D 2393 (b) | 1 | | | | | | | | | | | | + | | | |
| Напряжение при растягивании | – | 1 | + | | | | | | | | | | | | | | |
| Ударопрочность | – | 1 | + | | | | | | | | | | | | | | |

Анализ данных табл. 3 показывает, что среди транспортных департаментов различных штатов также отсутствует системный подход в оценке качества эластомерных бетонов, применяемых в зонах сопряжения деформационных швов с дорожным полотном.

Наиболее распространенными показателями в США являются прочность при растяжении (ASTM D 638), прочность при сжатии (ASTM C 579), сопротивление разрыву (ASTM D 624), твердость (ASTM D 2240) и когезионная прочность (ASTM C 882).

Отсутствие общих требований и руководств для производителей относительно качества эластомерных бетонов привело к тому, что каждый производитель с учетом собственной номенклатуры самостоятельно определяет критерий качества как эластомерного бетона, так и вяжущего, используемого для его производства. Так, отмечается [14], что разновидность параметров, характеризующих качество материалов, которые

выделяют производители, насчитывает 45 показателей. Помимо различий по количеству показателей, среди производителей также нет единства относительно количественной оценки качества по тем показателям, которые совпадают.

Таким образом, проведение работ по разработке общих требований к эластомерным бетонам является актуальной задачей, в том числе и в США, где производство и применение таких материалов с каждым годом возрастает.

Заключение

Анализ отечественного и зарубежного опыта применения эластомерных бетонов (пластобетонов) в зонах сопряжения деформационных швов и дорожного покрытия показывает, что, несмотря на их возрастающую популярность, организации – производители бетонов, подрядные организации, применяющие материал в конструкциях, и контролирующие органы не имеют общей системы оценки качества. В таких условиях развитие технологических решений и последующая оценка пригодности современных строительных материалов в этом направлении могут быть неэффективным в виду отсутствия критериев, по которым можно произвести контроль и выявить преимущества или недостатки.

В связи с отсутствием общих технических условий к материалам, применяемым в сопряжении дорожной одежды с деформационными швами, для оценки пригодности новых материалов необходимо выделить показатели, отражающие его эксплуатационную надежность и позволяющие рекомендовать их к применению.

Критерии качества должны учитывать как особенности структуры исходных материалов и эластомерного бетона, так и эксплуатационные условия, в которых материал будет подвергаться как механическим, так и эксплуатационным [20] воздействиям (рис. 2).



Рис. 2. Декомпозиция системы качества материалов, применяемых в сопряжении дорожной одежды с деформационными швами

Список литературы

1. Валиев, Ш.Н. Особенности работы покрытия проезжей части в зоне деформационных швов мостовых сооружений / Ш.Н. Валиев, В.С. Смоленкин // Интернет-журнал «Науковедение». – 2014. – №3. – С. 1–8. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN314.pdf> (дата обращения: 20.08.2017).

2. Овчинников, И.И. Анализ причин повреждения деформационных швов типа МММ Д-50 и МММ Д-100 на мостовых сооружениях автомобильной дороги М-4

«ДОН» / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Ш.Н. Валиев // Интернет-журнал «Науковедение». – 2013. – № 5. – С. 1–8. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/70tvn513.pdf> (дата обращения: 20.08.2017).

3. Ефанов, А.В. Проблемы обеспечения безопасности, комфортности и низкой шумовой эмиссии при движении транспорта по мостовому полотну с деформационными швами / А.В. Ефанов, В.Н. Макаров, И.Г. Овчинников // Сб. материалов междунар. семинара «Конструкции покрытий проезжей части мостовых сооружений с интенсивностью движения более 7-8 тысяч авт/сут. с учетом климатических условий г. Москвы», 24-25 января 2006 г. – М.: ГУП «Гормост», 2006. – С 26–31.

4. Овчинников, И.Г. Особенности и проблемы эксплуатации деформационных швов мостовых сооружений / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, С.В. Козлачков // Красная линия. Дороги. – 2012. – № 58. – С 52–53.

5. Отечественные деформационные швы мостовых сооружений / С.В. Козлачков, И.И. Овчинников, Ш.Н. Валиев, И.Г. Овчинников // Интернет-журнал «Науковедение». – 2012. – № 3. – С. 32.

6. Рекомендуемые конструкции деформационных швов мостовых сооружений и рациональная область их применения / С.В. Козлачков, И.И. Овчинников, Ш.Н. Валиев, И.Г. Овчинников // Интернет-журнал «Науковедение». – 2012. – № 3. – С. 33.

7. Рациональные области применения деформационных швов мостовых сооружений / С.В. Козлачков, И.И. Овчинников, Ш.Н. Валиев, И.Г. Овчинников // Мир дорог. – 2013. – Март. № 66. – С.43–45.

8. Переходная зона деформационных швов ПУГМК (BJ BAUM) (прочно-упругая гранитно-мастичная композиция). – URL: <http://www.dshoch.ru> (дата обращения: 20.08.2017).

9. Устройство деформационных швов закрытого типа Thorma®Joint. – URL: <http://www.defshov.ru> (дата обращения: 20.08.2017).

10. Деформационные швы mageba TENSA®CRETE. – URL: <http://www.mageba-russia.ru> (дата обращения: 20.08.2017).

11. Полимерное покрытие для мостов Матакрил (Matacrl). – URL: <http://www.tempstroy.ru> (дата обращения: 20.08.2017).

12. Watson, R. J. Elastomeric Concrete: Observations and Recommendations Based on a Decade of Installation History in the United States. (B.B.G.W. Maupin, Ed.) Extending the Life of Bridges, ASTM STP 1100. – 1990. – P. 81–94.

13. Michigan DOT, Evaluation pavement patching materials – Polymers and Elastomeric Concrete, "Materials and Technology, Research Record, Issue number 81, December 1996. P. 19.

14. Jeff Zell Consultants, Inc. Elastomeric Concrete For Deck Expansion Dam Headers. Pennsylvania Department of Transportation Bureau of Planning and Research, Coraopolis. 2007. P. 31–37.

15. Kuo, S.S. and Ortega, J. A Report on Accelerated Wear Testing of Bridge Expansion Joints, University of Central Florida, Report submitted to R.J. Watson, Inc., April 2001. 32 p.

16. Kuo, S.S. and Ortega, J. A Report on Accelerated Wear Testing of Bridge Expansion Joints, University of Central Florida, Report submitted to Capital Services May 2001. 24 p.

17. Distlehorst, J., & Wojakowski, J. Evaluation of Elastomeric Concrete in Bridge Expansion Joint Header Repair Applications. Topeka: Kansas Department of Transportation // Division of Operations Bureau of Materials and Research. 2005. 17 p.

18. J. Gergely, V. Ogunro, M. Manus Material Property and Quality Control Specifications for Elastomeric Concrete Used at Bridge Deck Joints / North Carolina Department of Transportation Research Project No. HWY-2007-10, April. 2009. 121 p.

19. Королев, Е.В. Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы / Е.В. Королев, Ю.М. Баженов, А.И. Альбакасов. – Пенза-Оренбург: ИПК ОГУ, 2010. – 364 с.

20. Иноземцев, С.С. Эксплуатационные свойства наномодифицированных щебеночно-мастичных асфальтобетонов / С.С. Иноземцев, Е.В. Королев // Вестник МГСУ. – 2015. – № 3. – С. 29–39.

References

1. Valiyev, Sh.N. Features of the work of the roadway coverage in the zone of expansion joints of bridge structures / Sh.N. Valiyev, V.S. Smolenkin // Online journal «Naukovedeniye». – 2014. – Vol. 3. – P. 1–8. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN314.pdf> (reference date: 20.08.2017).
2. Ovchinnikov, I.I. Analysis of the causes of damage to expansion joints of the type MMM D-50 and MMM D-100 at the bridges of the M-4 “DON” highway / I.I. Ovchinnikov, I.G. Ovchinnikov, Sh.N. Valiyev // Online journal «Naukovedeniye». – 2013. – Vol. 5. – P. 1–8. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/70tvn513.pdf> (reference date: 20.08.2017).
3. Yefanov, A.V. Problems of security, comfort and low noise emissions when driving on a bridge bed with expansion joints / A.V. Yefanov, V.N. Makarov, I.G. Ovchinnikov // Col. of abstracts of the Intern. seminar "Construction of roadway pavement structures with traffic intensity of more than 7-8 thousand auth / day. taking into account the climatic conditions of Moscow", January 24-25, 2006. – M.: Gormost, 2006. – P. 26–31.
4. Ovchinnikov, I.G. Features and problems of operation of expansion joints of bridge structures / I.G. Ovchinnikov, I.I. Ovchinnikov, S.V. Kozlachkov // Krasnaya liniya. Dorogi. – 2012. – Vol. 58. – P. 52–53.
5. Domestic expansion joints of bridge structures / S.V. Kozlachkov, I.I. Ovchinnikov, Sh.N. Valiyev, I.G. Ovchinnikov // Online journal «Naukovedeniye». – 2012. – Vol. 3. – P. 32.
6. Recommended designs of expansion joints of bridge structures and the rational area of their application / S.V. Kozlachkov, I.I. Ovchinnikov, Sh.N. Valiyev, I.G. Ovchinnikov // Online journal «Naukovedeniye». – 2012. – Vol. 3. – P. 33.
7. Rational scopes of expansion joints of bridge structures / S.V. Kozlachkov, I.I. Ovchinnikov, Sh.N. Valiyev, I.G. Ovchinnikov // Mir dorog. – 2013. – March. Vol. 66. – P. 43–45.
8. Transition zone of expansion joints PUGMK (BJ BAUM) (strong-elastic granite-mastic composition. – URL: <http://www.dshoch.ru> (reference date: 20.08.2017).
9. The device of expansion joints of the closed type Thorma®Joint. – URL: <http://www.defshov.ru> (reference date: 20.08.2017).
10. Expansion joints mageba TENSA®CRETE. – URL: <http://www.mageba-russia.ru> (reference date: 20.08.2017).
11. Polymer coating for Matacryl bridges (Matacryl). – URL: <http://www.tempstroy.ru> (reference date: 20.08.2017).
12. Watson, R. J. Elastomeric Concrete: Observations and Recommendations Based on a Decade of Installation History in the United States. (B.B.G.W. Maupin, Ed.) Extending the Life of Bridges, ASTM STP 1100. – 1990. – P. 81–94.
13. Michigan DOT, Evaluation pavement patching materials – Polymers and Elastomeric Concrete,” Materials and Technology, Research Record, Issue number 81, December 1996. P. 19.
14. Jeff Zell Consultants, Inc. Elastomeric Concrete For Deck Expansion Dam Headers. Pennsylvania Department of Transportation Bureau of Planning and Research, Coraopolis. 2007. Pp. 31–37.
15. Kuo, S.S. and Ortega, J. A Report on Accelerated Wear Testing of Bridge Expansion Joints, University of Central Florida, Report submitted to R.J. Watson, Inc., April 2001. 32 p.
16. Kuo, S.S. and Ortega, J. A Report on Accelerated Wear Testing of Bridge Expansion Joints, University of Central Florida, Report submitted to Capital Services May 2001. 24 p.
17. Distlehorst, J., & Wojakowski, J. Evaluation of Elastomeric Concrete in Bridge Expansion Joint Header Repair Applications. Topeka: Kansas Department of Transportation // Division of Operations Bureau of Materials and Research. 2005. 17 p.
18. J. Gergely, V. Ogunro, M. Manus Material Property and Quality Control Specifications for Elastomeric Concrete Used at Bridge Deck Joints / North Carolina Department of Transportation Research Project No. HWY-2007-10, April. 2009. 121 p.
19. Korolev, E.V. Radiation-protective and chemically resistant sulfur building materials / E.V. Korolev, Yu.M. Bazhenov, A.I. Al'bakasov. – Penza-Orenburg: IPK OGU, 2010. – 364 p.
20. Inozemtsev, S.S. Operational properties of nano-modified crushed stone-mastic asphalt concrete / S.S. Inozemtsev, E.V. Korolev // Vestnik MGSU. – 2015. – Vol. 3. – P. 29–39.

УДК 519.7: 691

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

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

ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.М. Данилов, И.А. Гарькина

Рассматривается итеративный синтез композиционных материалов, в том числе модульной структуры. Исходная задача многокритериального синтеза нелинейного программирования сводится к минимизации линейной функции при линейных ограничениях или к решению классической задачи о диете. Указаны конкретные примеры реализации.

Ключевые слова: композиционные материалы, свойства, модульная структура, итеративный синтез, приближенные методы

APPROXIMATE METHODS OF ANALYTICAL CONSTRUCTION OF COMPOSITE MATERIALS

A.M. Danilov, I.A. Garkina

The iterative synthesis of composite materials, including modular structure, is considered. The initial problem of multi-criteria synthesis of non-linear programming is reduced to minimizing a linear function with linear constraints or solving a classical problem of a diet. Specific examples of implementation are indicated.

Keywords: composite materials, properties, modular structure, iterative synthesis, approximate methods

В большинстве практических случаев композиционные материалы можно рассматривать как сложные многосвязные многокритериальные системы (как правило, с противоречивыми критериями) [1...4]. Методы их синтеза предполагают итеративное формализованное описание структуры и свойств на основе когнитивного моделирования [5, 6]. Точность результатов векторной оптимизации, естественно, определяется принятыми гипотезами о формировании физико-механических характеристик на разных этапах итеративного когнитивного моделирования (с уточнением иерархических структур критериев качества и собственно материала). Ниже приводятся приближенные способы описания, которые нами эффективно использовались при синтезе материалов специального назначения.

В ряде случаев синтез сводился к решению задачи о диете (определение оптимального состава смеси, удовлетворяющего определенным требованиям); смесь образуется

из компонентов, входящих в ее состав в различных пропорциях. Свойства каждого компонента и всей смеси в целом определяется m признаками. Пусть a_{ik} – содержание k -го показателя ($k = \overline{1, m}$) в единице i -го компонента ($i = \overline{1, n}$); a_k – содержание того же показателя в единице смеси. Тогда заданием матрицы $A = \|a_{ik}\|$ определяются свойства всех компонентов по указанным признакам. Часто можно полагать, что свойства смеси зависят линейно от свойств компонентов, входящих в нее:

$$a_k = a_{1k}x_1 + a_{2k}x_2 + \dots + a_{ik}x_i + \dots + a_{nk}x_n,$$

x_i ($i = \overline{1, n}$) – количество единиц i -го компонента, входящего в состав данной смеси.

Введем в рассмотрение n величин c_i ($i = \overline{1, n}$), оценивающих единицу соответствующего i -го компонента (например, цена, себестоимость и др.). Тогда оценка смеси будет определяться следующей линейной функцией:

$$z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n.$$

Задача заключается в том, чтобы определить такой состав смеси (определить x_1, x_2, \dots, x_n), для которой оценка z принимает наивыгоднейшее наибольшее (наименьшее) значение. На переменные x_i накладываются указанные ниже условия.

1. Ограничения, вытекающие из требуемых свойств смеси по каждому из m показателей. Для каждого показателя a_k задаются в одном из следующих видов: $a_k \leq D_k, a_k \geq d_k, a_k = d_k$ или, наконец, $d_k \leq a_k \leq D_k$. Подставив в каждое из таких условий развернутое выражение для a_k , получим окончательно систему линейных неравенств и уравнений, которым должны удовлетворять искомые величины x_i .

2. Ограничения, налагаемые на количество единиц i -го компонента, входящего в состав смеси. Они могут диктоваться либо ограниченными ресурсами данного компонента, либо другими соображениями. Как правило, выражаются в виде неравенств $x_i \leq b_i$.

3. Условия неотрицательности $x_i \geq 0$.

Таким образом, приходим к следующей задаче линейного программирования: определить максимум (минимум) линейной функции z в области решения системы неравенств вида

$$\sum_i a_{ik}x_i \leq D_k$$

или

$$\sum_i a_{ik}x_i \geq d_k; (x_i \leq b_i), x_i \geq 0.$$

В описанную общую схему укладывается целый ряд задач по определению оптимального состава композиционного строительного материала, обладающего необходимыми физико-механическими характеристиками [7...9].

Рассмотрим далее случай, когда на начальных этапах итеративного синтеза определялся минимум *сепарабельной функции*

$$q(x_1, x_2, \dots, x_n) = q(\bar{x}) = \sum_{j=1}^n q_j(x_j)$$

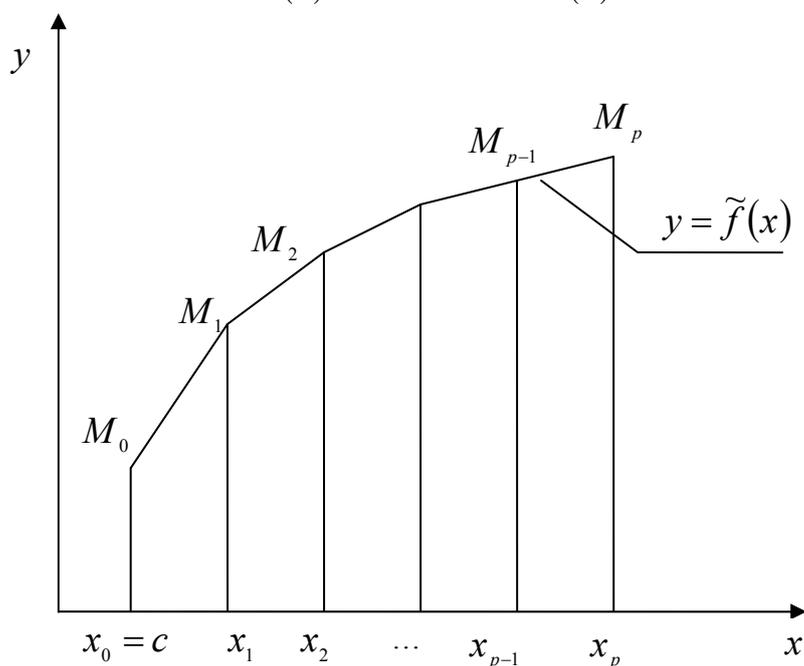
при ограничениях вида

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n f_{ij}(x_j) \{ \leq, =, \geq \} b_i, i = \overline{1, m}.$$

Такой подход наиболее эффективен для синтеза сложных систем *модульной* структуры [10]. Приближенное решение задачи может быть определено на основе кусочно-линейных аппроксимаций функций $q_j(x_j), f_{ij}(x_j)$ и заменой задачи нелинейного программирования приближенной линейной (решение – например, симплекс-методом). Найденный при этом локальный экстремум линейной задачи будет локальным экстремумом нелинейной. Если же нелинейная задача будет задачей выпуклого программирования, то найденный приближенный локальный экстремум будет также и глобальным.

Прежде всего займемся кусочно-линейной аппроксимацией функции $f(x)$, непрерывной на отрезке $[c, d]$.

Разделим отрезок $[c, d]$ на p частей точками $x_0 = c, x_1, x_2, \dots, x_p = d$. Соединим точки $M_k(x_k, f(x_k))$ ($k = \overline{0, p}$) отрезками прямых. Получим (см. рисунок) кусочно-линейную аппроксимацию $f(x)$ в виде ломаной $\tilde{f}(x)$.



Имеем:

$$\tilde{f}(x) = f(x_k) + \frac{f(x_{k+1}) - f(x_k)}{x_{k+1} - x_k} (x - x_k).$$

При $x \in [x_k, x_{k+1}]$ справедливо:

$$x - x_k = \lambda_k (x_{k+1} - x_k), \quad 0 \leq \lambda_k \leq 1$$

или

$$x = (1 - \lambda_k)x_k + \lambda_k x_{k+1}.$$

Отсюда при $x \in [x_k, x_{k+1}]$ имеем

$$\tilde{f}(x) = (1 - \lambda_k)f(x_k) + \lambda_k f(x_{k+1}).$$

Введем

$$\mu_k = 1 - \lambda_k, \quad \mu_{k+1} = \lambda_k,$$

где $\mu_k \geq 0, \mu_{k+1} \geq 0, \mu_k + \mu_{k+1} = 1$.

Тогда при $x \in [x_k, x_{k+1}]$:

$$x = \mu_k x_k + \mu_{k+1} x_{k+1},$$

$$\tilde{f}(x) = \mu_k f(x_k) + \mu_{k+1} f(x_{k+1}).$$

Пусть далее x – произвольная точка, принадлежащая $[c, d]$, а $\tilde{f}(x)$ – соответствующее значение аппроксимирующей ломаной. Тогда

$$x = \sum_{k=0}^p \mu_k x_k, \quad \tilde{f}(x) = \sum_{k=0}^p \mu_k f(x_k),$$

где $\mu_k \geq 0$, $\sum_{k=0}^p \mu_k = 1$ и не более двух значений μ_k и μ_{k+1} могут быть отличны от

нуля (только тогда точки будут $(\sum_{k=0}^p \mu_k x_k, \sum_{k=0}^p \mu_k f(x_k))$ лежать на ломаной $\tilde{f}(x)$).

Как видно, при выбранных значениях x_k функция $\tilde{f}(x)$ является линейной функцией переменных $\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_p$:

$$\tilde{f}(x) = \sum_{k=0}^p \mu_k f(x_k), \quad x = \sum_{k=0}^p \mu_k x_k.$$

Далее. Пусть $x_j \in [c_j, d_j]$ и x_{jk_j} – значения x_j , разбивающие интервал $[c_j, d_j]$ на частичные интервалы.

Здесь $j = \overline{1, n}, k_j = \overline{0, p_j}$. Точки x_{jk_j} выбираются из условий обеспечения необходимой точности аппроксимации всех функций $q_j(x_j), f_{ij}(x_j)$.

Таким образом, исходная задачи нелинейного программирования свелась к задаче линейного программирования. А именно: определить значения μ_{jk_j} , минимизирующие линейную функцию

$$\tilde{f} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^{p_j} f(x_{jk_j}) \cdot \mu_{jk_j}$$

при линейных ограничениях

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^{p_j} f(x_{jk_j}) \cdot \mu_{jk_j} \{ \leq, =, \geq \} b_i, \quad i = \overline{1, m};$$

$$\sum_{k_j=0}^{p_j} \mu_{jk_j} = 1, \quad j = \overline{1, n}, k_j = \overline{0, p_j};$$

$$\mu_{jk_j} \geq 0.$$

При решении задачи симплекс-методом следует помнить, что при каждом значении j не более двух соседних по индексу переменных μ_{jk_j} могут входить в базис.

Пусть $\mu_{jk_j}^*$ минимизируют \tilde{f} . Тогда приближенным решением исходной задачи будет точка с координатами

$$x_j^* = \sum_{k_j=0}^{p_j} \mu_{jk_j}^* \cdot x_{jk_j}.$$

Рассмотренные подходы эффективно использовались при синтезе композиционных материалов специального назначения [11...15].

Список литературы

1. Гарькина, И.А. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2018. – № 1–2. – С. 60–62.
2. Данилов, А.М. Разработка строительных материалов как сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 2 (27). – С. 50–54.
3. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.
4. Garkina, I. Principles of optimal control in the synthesis of composite materials / I. Garkina, A. Danilov, V. Selyaev // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 723. – P. 32–36.
5. 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.
6. Гарькина, И.А. Когнитивное моделирование сложных слабоструктурированных систем: пример реализации / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2008. – № 2. – С. 16–21.
7. Гарькина, И.А. Опыт разработки композиционных материалов: некоторые аспекты математического моделирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 8 (656). – С. 28–33.
8. Данилов, А.М. Композиты: графоаналитический метод параметрической идентификации кинетических процессов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 2 (31). – С. 45–52.
9. Данилов, А.М. Метод пробных воздействий при идентификации композиционных материалов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4 (33). – С. 47–53.
10. Гарькина, И.А. Сложные системы модульной структуры: композиты, автономные исследования сепаратных подсистем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.И. Ермолаева, А.М. Зарецкий // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – № 1 (15). – С. 152–156.
11. Данилов, А.М. Гомеостатическая концепция моделирования систем в строительном материаловедении / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, Д.С. Сорокин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 4. – С. 24–30.
12. Данилов, А.М. Системные модели в материаловедении: некоторые итоги и перспективы использования / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, И.С. Пышкина // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 2 (23). – С. 15–20.
13. Garkina, I. Approximation of the Rheological Properties of Composite Materials / I. Garkina, A. Danilov // Key Engineering Materials. – 2018. – Vol. 777. – P.32–36.
14. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: МГСУ: Библиотека научных исследований и проектов, 2012. – 432 с.
15. Garkina, I. Modeling of building materials as complex systems / I. Garkina, A. Danilov, Y. Skachkov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol.730. – P. 412–417.

References

1. Garkina, I.A. The evolution of ideas about composite materials from the standpoint of changing paradigms / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Construction materials. – 2018. – № 1 – 2. – P. 60–62.
2. Danilov, A.M. Development of building materials as complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2016. – № 2 (27). – P. 50–54.

3. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.
4. Garkina, I. Principles of optimal control in the synthesis of composite materials / I. Garkina, A. Danilov, V. Selyaev // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 723. – P. 32–36.
5. Garkina, I.A. Cognitive modeling in the synthesis of composite materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Proceedings of higher educational institutions. Building. – 2009. – № 3–4 (603–604). – P. 30–37.
6. Garkina, I.A. Cognitive modeling of complex semi – structured systems: an example of implementation / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering. – 2008. – № 2. – P. 16–21.
7. Garkina, I.A. Experience in the development of composite materials: some aspects of mathematical modeling / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Proceedings of higher educational institutions. Building. – 2013. – № 8 (656). – P. 28–33.
8. Danilov, A.M. Composites: grapho-analytical method of parametric identification of kinetic processes / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2017. – № 2 (31). – P. 45–52.
9. Danilov, A.M. The method of trial effects in the identification of composite materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2017. – № 4 (33). – P. 47 – 53.
10. Garkina, I.A. Complex systems of modular structure: composites, autonomous studies of separate subsystems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.I. Ermolaeva, A.M. Zaretsky // News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2011. – № 1 (15). – P. 152–156.
11. Danilov, A.M. Homeostatic concept of modeling systems in building materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina, D.S. Sorokin // Regional architecture and engineering. – 2014. – № 4. – P. 24–30.
12. Danilov, A.M. System models in materials science: some results and prospects of use / A.M. Danilov, I.A. Garkina, I.S. Pyshkina // Regional architecture and engineering. – 2015. – № 2 (23). – P. 15–20.
13. Garkina, I. Approximation of the Rheological Properties of Composite Materials / I. Garkina, A. Danilov // Key Engineering Materials. – 2018. – Vol. 777. – P.32–36.
14. Systems analysis in construction materials: a monograph / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – M.: MGSU: Library of scientific research and projects, 2012. – 432 p.
15. Garkina, I. Modeling of building materials as complex systems / I. Garkina, A. Danilov, Y. Skachkov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417.

УДК 691.554

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

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

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

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

ВЛИЯНИЕ ВИДА НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ГАЗОБЕТОНА

В.И. Логанина, М.В. Фролов

Описано влияние вида высокопористого наполнителя на трещиностойкость теплоизоляционных покрытий для отделки газобетона. Выявлено, что при использовании в качестве наполнителя зольных микросфер алюмосиликатных повышается трещиностойкость отделочных покрытий за счет увеличения предельной растяжимости, снижения усадочных деформаций, более равномерного распределения влагосодержания в процессе увлажнения.

Ключевые слова: сухие строительные смеси, трещиностойкость, усадочные деформации, газобетон, зольные микросферы алюмосиликатные, вспученный вермикулитовый песок, распределение влагосодержания по сечению

THE INFLUENCE OF FILLERS TYPE ON CRACKING RESISTANCE OF THERMAL INSULATION COATINGS FOR AERATED CONCRETE

V.I. Loganina, M.V. Frolov

The influence of the type of highly porous filler on crack resistance of thermal insulation coatings for the finishing of aerated concrete is described. It was revealed that using ash microspheres of aluminosilicate as a filler, crack resistance of the finishing coatings increases due to an increase of limiting tensile properties, a decrease of shrinkage deformations, a more uniform distribution of moisture content in the course of moistening.

Keywords: dry construction mixtures, crack resistance, shrinking deformations, aerated concrete, aluminosilicate ash microspheres, expanded vermiculite sand, moisture content distribution over the section

Трещиностойкость является основной характеристикой долговечности отделочных покрытий для газобетона. Главными причинами возникновения трещин являются значительные усадочные деформации, возникающие в процессе твердения отделочных покрытий, а также в результате конденсации влаги в толще наружных ограждений в процессе эксплуатации.

При разработке рецептур современных теплоизоляционных сухих строительных смесей (ССС) для повышения паропроницаемости и снижения теплопроводности отделочных покрытий в их составе используют вспученный перлитовый и

вермикулитовый песок [1–3]. Из-за высокой микропористости данных материалов полученные с их использованием составы часто характеризуются значительной водопотребностью, что может вызывать избыточные усадочные деформации в процессе твердения. В отделочных покрытиях, полученных с использованием вспученного перлитового и вермикулитового песка, часто образуется значительное количество открытых пор, негативно влияющих на процессы теплопереноса в наружных ограждениях и вызывающих неравномерное распределение влаги по сечению слоя отделки. Поэтому перспективным является использование в рецептуре теплоизоляционных ССС микросфер [4, 5].

Проведенные нами ранее исследования позволяют рекомендовать использовать для отделки газобетона теплоизоляционную ССС следующего состава: известь-пушонка, модифицирующая добавка на основе смеси гидросиликатов и гидроалюмосиликатов кальция, белый цемент, молотые отходы производства газобетона, редуцируемый порошок VINNAPAS 8031 Н, пластифицирующая добавка Melflux 2651 F, гидрофобизатор олеат натрия, зольные микросферы алюмосиликатные [6–8]. Нами была оценена трещиностойкость покрытий, для чего определены предельная растяжимость, усадочные деформации и исследован процесс теплопереноса в отделочном покрытии. Для сравнения также оценена трещиностойкость отделочных покрытий на основе ССС, полученной с использованием вспученного вермикулитового песка.

Для оценки трещиностойкости покрытий использовали коэффициент трещиностойкости $K_{тр}$, определяемый по формуле

$$K_{тр} = \frac{\varepsilon_{пр}}{\varepsilon_{ус}}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{пр}$ – предельные относительные деформации при растяжении, мм/м; $\varepsilon_{ус}$ – усадочные деформации в процессе твердения, мм/м.

Для определения предельных относительных деформаций при растяжении $\varepsilon_{пр}$ и когезионной прочности покрытий $R_{ког}$ образцы размером 0,01×0,01×0,05 м испытывали на разрывной машине ИР 5057-50. Результаты проведенных исследований представлены на рис. 1.

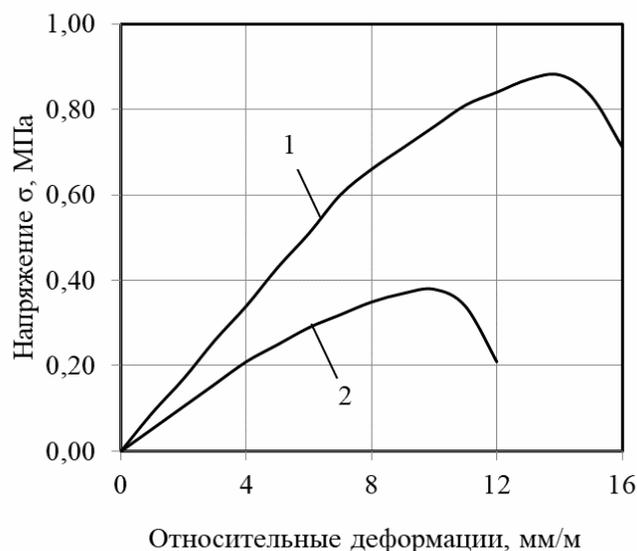


Рис. 1. Изменение относительных деформаций при растяжении образцов разрабатываемого состава с применением:

1 – зольных микросфер алюмосиликатных; 2 – вспученного вермикулитового песка

Выявлено, что предельные относительные деформации при растяжении $\varepsilon_{пр}$ для образцов покрытий, полученных с использованием зольных микросфер алюмосиликатных, равны 16 мм/м (рис. 1, кривая 1), для образцов покрытий, полученных с использованием вспученного вермикулитового песка, – 12 мм/м (рис. 1, кривая 2). Установлено, что прочность при растяжении композитов, полученных с использованием зольных микросфер алюмосиликатных, в 2,32 раза выше прочности при растяжении композитов, полученных с использованием вспученного вермикулитового песка. Это можно объяснить тем, что вокруг частиц микросфер отсутствует неравномерное распределение концентраций напряжений, и тем, что зольные микросферы алюмосиликатные характеризуются большей пуццоланической активностью по сравнению с вспученным вермикулитовым песком. Методом поглощения извести из известкового раствора установлено, что пуццоланическая активность зольных микросфер алюмосиликатных после 30 суток испытаний составила 68,2 мг/г, пуццоланическая активность вспученного вермикулитового песка – 35,6 мг/г.

Для определения усадочных деформаций $\varepsilon_{ус}$ в процессе отверждения производили измерения с помощью оптического компаратора ИЗА-2. Результаты исследований представлены на рис. 2.

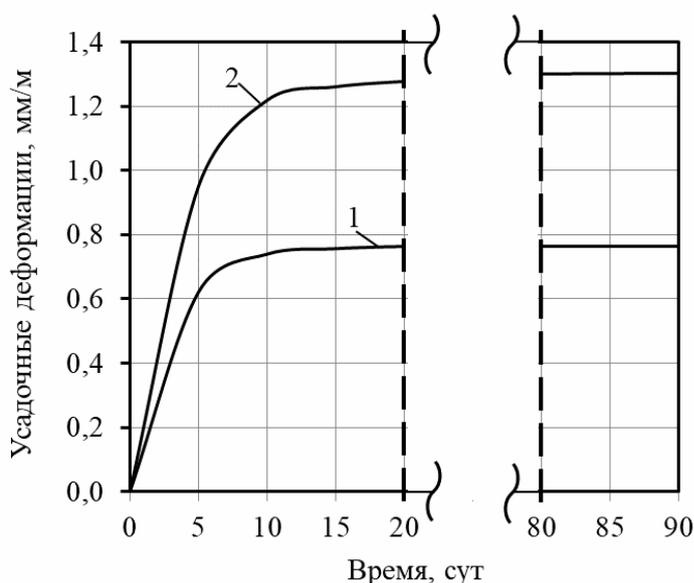


Рис. 2. Изменения усадочных деформаций покрытий:

1 – зольные микросферы алюмосиликатные; 2 – вспученный вермикулитовый песок

Установлено, что у покрытий, полученных с использованием зольных микросфер алюмосиликатных, усадочные деформации спустя 90 суток составляют $\varepsilon_{ус} = 0,764$ мм/м (рис. 2, кривая 1), у покрытий, полученных с использованием вспученного вермикулитового песка, – $\varepsilon_{ус} = 1,302$ мм/м (рис. 2, кривая 2). Значительные усадочные деформации у покрытий, полученных с использованием вспученного вермикулитового песка, вызваны высокой водопотребностью данных составов.

В результате расчетов выявлено, что коэффициент трещиностойкости у покрытий, полученных с использованием зольных микросфер алюмосиликатных, составил $K_{тр} = 20,9$, у покрытий, полученных с использованием вспученного вермикулитового песка, составил $K_{тр} = 9,2$.

Для оценки равномерности распределения влагосодержания по толщине отделочного покрытия исследован процесс тепломассопереноса в отделочном покрытии. Были изготовлены образцы отделочных покрытий в виде дисков диаметром 0,1 м и толщиной 5 мм. После 28 суток твердения в воздушно-сухих условиях образцы высу-

шивали до постоянной массы при температуре 100–105 °С. В ходе проведения исследований четыре диска, изготовленных из одного состава, размещали между двумя тепловыми камерами, в которых поддерживались следующие температурно-влажностные условия:

- камера 1, температура $t_1=60$ °С, относительная влажность $\phi=100$ %;
- камера 2, температура $t_2=20$ °С, относительная влажность $\phi=50$ %.

Диски нумеровались последовательно от тепловой камеры 1 к тепловой камере 2 в порядке их расположения в экспериментальной установке. Для предотвращения неконтролируемых потерь тепла экспериментальная установка теплоизолировалась. В ходе проведения эксперимента раз в час определяли массу каждого из дисков.

Выявлено, что образцы покрытий, полученные с использованием вспученного вермикулитового песка, активно поглощали влагу в течение 20 часов с начала эксперимента, образцы покрытий, полученные с использованием зольных микросфер алюмосиликатных, активно поглощали влагу в течение 18 часов с начала эксперимента. Испытания заканчивали в момент, когда результаты двух последовательно проведенных взвешиваний отличались друг от друга не более чем на 0,1 %.

Данные, характеризующие распределение влагосодержания по толщине отделочных покрытий после окончания испытаний, представлены на рис. 3.

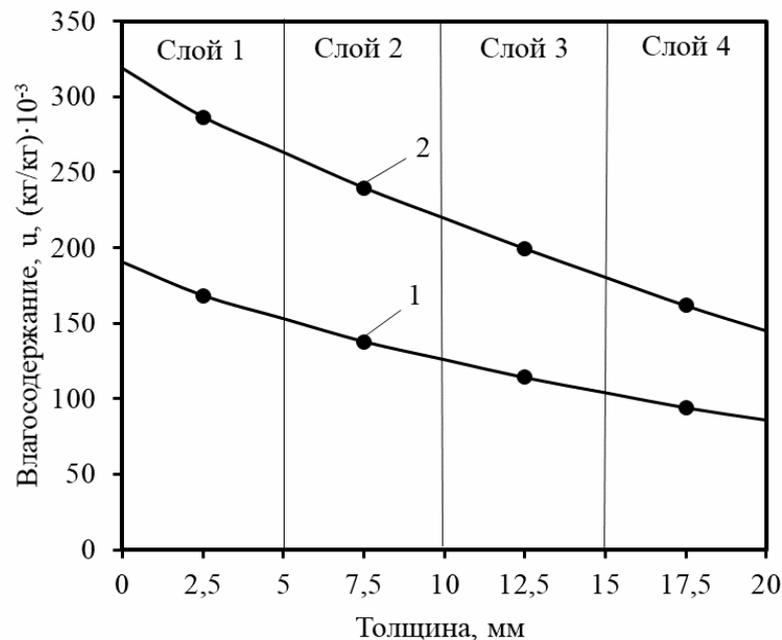


Рис. 3. Распределение влагосодержания в отделочных покрытиях:

1 – зольные микросферы алюмосиликатные; 2 – вспученный вермикулитовый песок

Установлено, что влагосодержание по сечению отделочных покрытий распределено неравномерно. Перепад влагосодержания между первым и четвертым слоем у покрытий, полученных с использованием зольных микросфер алюмосиликатных, после окончания испытаний составил $74,0 \cdot 10^{-3}$ кг/кг (рис. 3, кривая 1), у покрытий, полученных с использованием вспученного вермикулитового песка, – $124,7 \cdot 10^{-3}$ кг/кг (рис. 3, кривая 2). При этом величина перепада влагосодержания между первым и четвертым слоем в исследуемых покрытиях в ходе эксперимента значительно варьировалась. Зависимости изменения перепада влагосодержания от времени увлажнения для исследуемых отделочных покрытий представлены на рис. 4.

Наибольший перепад влагосодержания между первым и четвертым слоем наблюдался спустя 10 часов от начала эксперимента. У покрытий, полученных с использованием зольных микросфер алюмосиликатных, перепад влагосодержания составил $108,9 \cdot 10^{-3}$ кг/кг (рис. 4, кривая 1), у покрытий, полученных с использованием вспученного вермикулитового песка, – $201,0 \cdot 10^{-3}$ кг/кг (рис. 4, кривая 2).

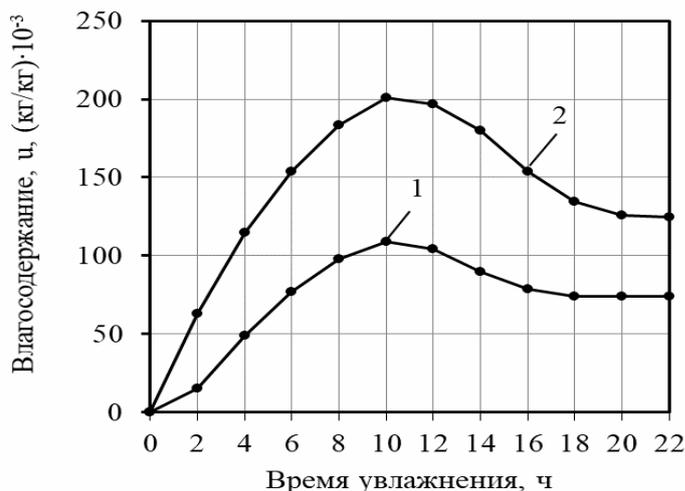


Рис. 4. Зависимости изменения перепада влагосодержания между первым и четвертым слоем от времени увлажнения:

1 – зольные микросферы алюмосиликатные; 2 – вспученный вермикулитовый песок

Приведенные экспериментальные данные показывают, что покрытие на основе ССС, полученной с использованием зольных микросфер алюмосиликатных, обладает большей стойкостью к трещинообразованию в процессе увлажнения в слое отделки по сравнению с покрытием на основе ССС, полученной с использованием вспученного вермикулитового песка.

Представленные результаты исследования показывают, что использование в качестве высокопористого наполнителя зольных микросфер алюмосиликатных позволяет повысить трещиностойкость получаемых отделочных покрытий.

Список литературы

1. Ахтямов, Р.Я. Легкие строительные штукатурные растворы с вермикулитовым наполнителем / Р.Я. Ахтямов, Р.М. Ахмедьянов, Б.Я. Трофимов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2002. – №11. – С. 16–17.
2. Нациевский, С.Ю. Производство сухих строительных смесей с применением вспученного перлита / С.Ю. Нациевский, Л.В. Алексеева // Сухие строительные смеси. – 2012. – №6. – С. 26–27.
3. Трофимов, Б.Я. Теплоизоляционные штукатурные растворы с вермикулитовым наполнителем / Б.Я. Трофимов, Р.Я. Ахтямов, Р.М. Ахмедьянов // Цемент и его применение. – 2002. – №6. – С. 16–19.
4. Семенов, В.С. Повышение энергоэффективности ограждающих конструкций с применением облегченных кладочных растворов / В.С. Семенов, Т.А. Розовская // Строительные материалы. – 2015. – №6. – С. 16–19.
5. Кретова, У.Е. Инновационный наполнитель для цементных систем – керамические микросферы / У.Е. Кретова // Вестник МГСУ. – 2010. – №4. – С. 37–39.
6. Логанина, В.И. Гидрофизические свойства покрытий для отделки стен из газобетона / В.И. Логанина, М.В. Фролов // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №3. – С.33–37.
7. Логанина, В.И. Использование зольных алюмосиликатных микросфер в известковых сухих строительных смесях для отделки / В.И. Логанина, М.В. Фролов // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. – 2017. – №3. – С.6–9.
8. Логанина, В.И. Разработка добавки на основе смеси синтезированных гидросиликатов кальция и алюмосиликатов для сухих строительных смесей / В.И. Логанина, С.Н. Кислицина, М.В. Фролов, М.А. Рябов // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2015. – №2. – С.93–95.

References

1. Akhtyamov, R.Ya. Light building plasters with vermiculite filler / R.Ya. Akhtyamov, R.M. Ahmedyanov, B.Ya. Trofimov // Building materials, equipment, technologies of the XXI century. – 2002. – №11. – P. 16–17.
2. Natsievsky, S.Yu. Production of dry building mixtures using expanded perlite / S.Yu. Natsievsky, L.V. Alekseeva // Dry building mixtures. – 2012. – №6. – P. 26.
3. Trofimov, B.Ja. Thermal insulating plasters with vermiculite filler / B.Ja. Trofimov, R.Ja. Ahtjamov, R.M. Ahmed'janov // Cement and its applications. – 2002. – №6. – P. 16–19.
4. Semenov, V.S. Increase in energy efficiency of enclosing structures using lightweight mortar solutions / V.S. Semenov, T.A. Rozovskaya // Building Materials. – 2015. – №6. – P. 16–19.
5. Kretova, U.E. Innovative filler for cement systems – ceramic microspheres / U.E. Kretova // Vestnik MGSU. – 2010. – №4. – P. 37–39.
6. Loganina, V.I. Hydro-physical properties of coatings for the finishing of walls from aerated concrete / V.I. Loganina, M.V. Frolov // Regional architecture and engineering. – 2016. – №3. – P. 33–37.
7. Loganina, V.I. Use of ash aluminosilicate microspheres in calcareous dry construction mixtures for finishing / V.I. Loganina, M.V. Frolov // Herald of BSTU named after. V.G. Shukhov. – 2017. – №3. – P. 6–9.
8. Loganina, V.I. Development of additives on the basis of a mixture of synthetic calcium silicate and aluminum silicates for dry construction mixtures / V.I. Loganina, S.V. Kislitsina, M.V. Frolov, M.A. Ryabov // Academic Gazette UralNIIproekt RAASN. – 2015. – №2. – P. 93–95.

УДК 691.327:539.32

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

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

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

Полубарова Юлия Владимировна,
аспирант

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

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

Polubarova Yulia Vladimirovna,
Postgraduate student

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ПРОЧНОСТЬ ДИСПЕРСНО-КРИСТАЛЛИТНОЙ СТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Ю.В. Полубарова

Приведены обобщенные результаты экспериментальных исследований, в том числе и собственных, позволяющие констатировать, что наиболее рациональным способом регулирования фазового состава, структуры и свойств цементных систем конструкционного назначения является модифицирование цементных смесей химическими добавками пластифицирующего действия. Показано, что роль химических добавок в качестве неотъемлемого компонента современного бетона и средства технологического регулирования увеличивается адекватно росту их влияния на гидратацию и структурообразование цементных систем. Постулируя положение о том, что любое химическое взаимодействие твердого тела начинается с его поверхности, можно полагать, что основным вопросом в проблеме модифицирования цементных систем современными химическими добавками является установление взаимосвязи параметров конструкционной прочности цементного камня с технологической процедурой дозирования и оптимальной дозировкой добавки. Структурно-системный анализ механического поведения модифицированных структур цементного камня под нагрузкой позволяет использовать полученную информацию для улучшения понимания самого процесса разрушения и выявления параметров материала, определяющих вязкость его разрушения, и на этой основе осуществлять рациональную технологическую оптимизацию структуры и технологию получения цементных систем повышенной трещиностойкости.

Ключевые слова: цементный камень, дисперсно-кристаллитная структура, блоки мозаики, дислокации, фазовый состав, гидросиликаты кальция, химические добавки, супер- и гиперпластификаторы, параметры конструкционной прочности

PHASE COMPOSITION AND STRENGTH OF DISPERSED- CRYSTALLINE STRUCTURE OF CEMENT STONE

N.I. Makridin, I.N. Maksimova, Y.V. Polubarova

The results of experimental studies, are summarized, it allows to state that the most rational way to control the phase composition, structure and properties of cement systems for structural purposes is to modify cement mixtures with chemical additives of plasticizing action. It is shown that the role of chemical additive as integral components of modern concrete and means of technological regulation adequately increases the growth of their influence on the hydration and structure formation of cement systems. Postulating the proposition that any chemical interaction of a solid begins with its surface,

we can assume that the main issue in the problem of modifying cement systems with modern chemical additives is to establish the relationship between the parameters of the structural strength of cement stone and the technological procedure of dosing and the optimal dosage of the additive. Structural system analysis of the mechanical behavior of modified cement stone structures under load allows to use the obtained information to improve the understanding of the fracture process and identify material parameters that determine its fracture toughness and, on this basis, implement a rational technological structure optimization and technology for producing cement systems with increased crack resistance.

Keywords: cement stone, dispersed-crystalline structure, mosaic blocks, dislocations, phase composition, calcium hydrosilicates, chemical additives, super- and hyperplasticizers, structural strength parameters

Ценность портландцемента как вяжущего вещества заключается в том, что он является метаустойчивым продуктом, полученным, как известно, из устойчивых природных горных пород. В метаустойчивости цемента уже заложено превращение при взаимодействии с водой в более устойчивое состояние, то есть его подчиненность законам физико-химического равновесия, так как любое превращение легче всего протекает в системах, наиболее далеких от состояния равновесия. При гидратации цемента происходят тесно переплетенные процессы возникновения, изменения и разрушения его минералов, направленные на установление химического равновесия в цементном камне [1].

Взаимодействие портландцемента с водой приводит к образованию новых гидратных веществ. Фазовый состав этих новообразований зависит от многих факторов: химического и минералогического состава цементов, температуры твердения, соотношения между твердой и жидкой фазами, а также от ряда других факторов.

Технические свойства получающегося цементного камня сильно зависят от его фазового состава. Изменяя последний с помощью тех или иных технологических факторов, можно регулировать свойства цементного камня, а также композиционных материалов на его основе.

Рассматривая гидратацию цемента как химический процесс, следует отметить, что в первую очередь возникает алюминатная фаза из C_3A – «алюминатная структура», предопределяющая схватывание цементного теста. Затем начинают возникать продукты гидратации из минералов C_3S и C_2S , которые образуют гомогенный чрезвычайно тонкопористый ворс из очень малых кристаллов, то есть возникают гидросиликаты кальция (ГСК), формирующие так называемую силикатную структуру [2].

Многочисленными исследованиями показано, что главными носителями механической прочности цементного камня являются продукты гидратации C_3S и C_2S , то есть гидросиликаты кальция. По современным данным, изменение условий протекания реакций приводит к образованию ГСК переменного состава. В результате состав полностью гидратированного цементного порошка может быть в основном представлен как совокупность следующих новообразований: 1) гидрат окиси кальция; 2) гидросиликат C_2SH_2 с возможной примесью тоберморитоподобных гидросиликатов кальция серии CSH (B); 3) гидросульфоалюминат кальция и его твердый раствор с гидросульфферритом; 4) гидроалюминат кальция с основностью не менее $3CaO \cdot Al_2O_3$; 5) гидроалюмоферрит кальция [3].

В процессе изучения ГСК разные исследователи неодинаково обозначали полученные ими продукты. Полукристаллические и аморфные фазы ГСК имеют общее обозначение CSH с черточками между символами, которые показывают, что никакого определенного состава не подразумевается. Хорошо образованные кристаллические фазы имеют более точное обозначение CSH (I), если $C/S=0,8-1,5$, или CSH (B) при $C/S=0,8-1,33$, или CSH (II), если $C/S>1,5$.

В работе [4] отмечено, что в настоящее время в системе $CaO-SiO_2-H_2O$ получено и изучено не менее 24 индивидуальных ГСК, из которых около 15 встречаются в виде природных минералов. Почти каждой индивидуальной фазе соответствует несколько разновидностей. Все они отличаются друг от друга химическим составом, структурой

и в связи с этим физико-химическими и другими свойствами. Нестехиометричность и переменный состав ГСК позволяют считать, что все ГСК являются членами непрерывного ряда твердого раствора внедрения с переменным числом атомов в элементарной ячейке: $(0,5-3,0)\text{CaO}\cdot(0,5-2,0)\text{SiO}_2\cdot(0,15-2,0)\text{H}_2\text{O}$. При изменении условий ГСК переходят из одного вида в другой. Это значит, что ГСК являются метастабильными соединениями переменного состава, бертоллидами, по Н. С. Курнакову [5].

В многочисленных работах как зарубежных, так и отечественных исследователей достаточно подробно изучена кристаллохимическая структура ГСК с позиций различия кремнекислородного мотива, при этом химическая специфика ГСК не отражается.

По мнению В.Н. Вернигоровой [4], такой подход к проблеме не отвечает на вопросы: 1) почему в системе $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ возможно образование разнообразных кристаллических структур; 2) почему так велико влияние на процессы образования ГСК условий кристаллизации: температуры, отношения Ca/Si , V/T , природы кремнеземистой составляющей и др., хотя понимание этих вопросов очень важно. Установление химической природы ГСК имеет существенное значение для выяснения механизма их образования и их вяжущих свойств.

Высокую реакционную способность нестехиометрических соединений ГСК можно объяснить с позиций химической теории фаз переменного состава, согласно которой нестехиометрические соединения – это фазы, содержащие элементы с непрерывно изменяющейся под влиянием факторов равновесия валентностью. В качестве исходных активных веществ ГСК выступают нестехиометрические соединения: оксид SiO_2 , оксид Ca , минералы $\beta\text{-C}_2\text{S}$, C_3S и вода, которые являются бертоллидными фазами. В основе реакционной способности бертоллидных фаз лежит изменение валентности элементов, образующих фазы. Именно поэтому бертоллидные фазы являются более реакционноспособными, чем соединения постоянного состава, в отношении образования более сложных фаз на своей основе. Участвуя в сложных химических превращениях, они являются своеобразными «передатчиками» свойств тех не существующих в чистом виде соединений, которые являются их основой. Сочетание различных форм валентности элементов делает фазу не только более реакционноспособной, но и более устойчивой в отношении изменения значений факторов равновесия в значительном диапазоне.

Возникающие при твердении цементного теста гидратированные ГСК, как правило, имеют сложную кристаллическую структуру. Наиболее полное представление о фазовом составе ГСК дает прецизионный рентгеновский анализ, показывающий большое число дифракционных отражений, сопровождаемых заметным фоном создаваемых аморфными (плохо закристаллизованными) составляющими новообразований, что осложняет расшифровку ионизационных рентгенограмм. Оценка фазового состава с помощью рентгеноструктурного анализа позволяет использовать этот метод для прямого изучения скоростей гидратации, что впервые было использовано Х.Ф.У. Тейлором [6].

Чтобы подчеркнуть наличие в цементном камне кристаллической фазы в виде кристаллитов коллоидных размеров $50-500 \text{ \AA}$ и пор размером того же порядка, используют термин «дисперсно-кристаллитная структура».

В феноменологических (экспериментальных) зависимостях, рассматривающих связь структуры с прочностью цементного камня, одним из основных факторов, определяющих прочность, является общая пористость искусственного камня. Связи же дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня с прочностью не уделяется должного внимания. Вместе с тем субмолекулярная гетерогенность структуры цементного камня, то есть наличие в ней блоков мозаики L_d (кристаллитов), различающихся атомным строением, степенью упорядоченности, ориентацией, размерами, плотностью дислокаций, является причиной локальных перенапряжений в структуре цементного камня.

По современным представлениям, механическую прочность твердых тел, особенно в начальный момент нагружения, в значительной степени определяют дислокации [7].

По качественным моделям кристаллического твердого тела (рис. 1) дислокации представляют собой непрерывную цепь радикалов, обладающих неспаренными электронами оборванных химических связей [8]. Дислокации являются причиной возникновения блочной структуры реальных кристаллов (рис. 1).

На рис. 1 показана схема строения реального твердого тела.

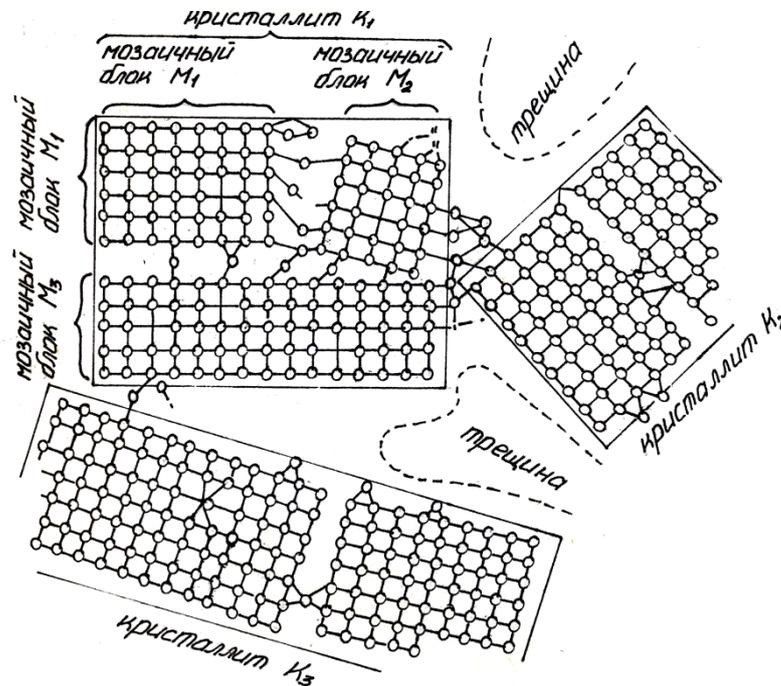


Рис. 1. Схема строения реального твердого тела [9]

Дефекты-дислокации – образования метастабильные, неравновесные, возникающие при росте кристаллов ГСК и механическом воздействии. Изменение температурно-влажностных условий, В/Ц, состава и вида модифицирующих добавок различной химической природы позволяет в определенной мере влиять на плотность дислокаций гидратационной структуры цементного камня, влияя тем самым на прочность этой структуры.

Важной особенностью дислокаций является то, что они под действием внешнего напряжения приходят в движение, вызывая пластическую деформацию, при этом плотность дислокаций возрастает, что может приводить к образованию зародышевых трещин в кристалле. Таким образом, процесс разрушения цементного камня сопровождается движением дислокаций в нем, а физическая природа упрочнения цементного камня связана с наличием препятствий на пути движения дислокаций, в качестве которых выступают границы зерен и двойников, границы блоков мозаики, на которых дислокация прерывается.

Для получения максимальной прочности структуры цементного камня необходимо увеличить количество препятствий движению в нем дислокаций, то есть удлинить путь пластических деформаций [1].

Блоки мозаики – это области однородности структуры внутри кристаллов фаз. Определение величины блоков мозаики L_d и плотности дислокаций позволяет судить о гранулометрической однородности, степени упорядоченности кристаллов и дефектности кристаллитной структуры образующихся фаз [10].

Поскольку отвердевание новообразований совершается на агрегативном, надмолекулярном уровне, синтез механических свойств вяжущих систем во многом предопределен дисперсно-кристаллитной структурой цементного камня. Поэтому при анализе механизма разрушения цементного камня или бетона в рамках механики разрушения необходимо принимать во внимание субмикроскопический уровень структуры, что

учитывалось нами путем расчета плотности дислокаций ρ на образцах сравниваемых серий цементного камня, модифицированная гидратационная структура которых получена при разных концентрационных и процедурных факторах воздействия суперпластификатора (СП) С-3 при приготовлении цементного теста [10]. К сожалению, публикаций по этому вопросу очень мало. Выяснение связи надмолекулярной структуры с механической прочностью и параметрами разрушения представляет задачу дальнейших исследований.

Применение добавок различного рода при изготовлении бетонов и других силикатных строительных материалов имеет достаточно большую историю.

Согласно представлениям Й. Бренстеда, Т.М. Лаури и Г.Н. Льюиса по теории кислот и оснований [11] и современным представлениям о химии твердого тела, в соответствии с которыми оно рассматривается как состоящее из остова и функциональных групп поверхности, лежащих в основе создания донорно-акцепторной модели строения поверхности твердого тела, все компоненты, входящие в состав цементного теста или бетонной смеси, можно рассматривать как смесь веществ, способных как отдавать (донировать) протон, так и присоединять (акцептировать) его, по Бренстеду-Лаури, или акцептировать (кислота) или донировать (основание) неподеленную пару электронов, по Льюису.

Таким образом, любое химическое взаимодействие твердого тела с реагентом начинается с его поверхности. Поэтому при замешивании дисперсного портландцемента с водой и добавками любой природы первым процессом является адсорбционный, сопровождающийся изменением химических свойств поверхности частиц минерального вяжущего вещества с образованием хемосорбционных поверхностных комплексов различной химической природы, а возникающие при этом хемосорбционные связи очень многообразны.

Вернигорова В.Н. [4], анализируя экспериментальные данные по влиянию добавок поверхностно-активных веществ (ПАВ), апротонных кислот (АК) и суперпластификаторов на кинетику сорбции катионов кальция гелем SiO_2 , кинетику растворения SiO_2 , фазовый состав ГСК, pH жидкой фазы, констатирует, что влияние добавок в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ сводится к модифицированию поверхности частиц геля SiO_2 и к повышению дефектности его структуры. SiO_2 является бифункциональным адсорбентом. В зависимости от природы добавки поверхность оксида кремния становится или геометрически, электрически и химически неоднородной, или более специфичной, с преобладанием основных свойств, более геометрически сглаженной. Энергетически и химически неоднородная поверхность способна адсорбировать частицы любой природы.

Адсорбционные молекулы и ионы АК, ПАВ и СП играют роль заместителей на поверхности гигантской разупорядоченной макромолекулы SiO_2 и оказывают индукционное влияние на связь Si-O . Ионы и молекулы добавок, внедряясь в структуру SiO_2 , повышают концентрацию дефектов и расслабляют химические связи. Это облегчает диффузию ионов Ca^{2+} , Si^{4+} , O^{2-} , H^{1+} , OH^{1-} и H_2O при образовании новых фаз. Все процессы, протекающие в системе, имеют колебательный характер, который вызван химической и энергетической неоднородностью поверхности частиц SiO_2 и периодической генерацией основных и кислотных центров в результате диспергирования структуры SiO_2 под действием молекул воды, активных частиц H^* , OH^* , H^{1+} , OH^{1-} , катионов Ca^{2+} , ионов и молекул добавок. При этом образование поверхностных химических соединений может происходить без существенной деформации поверхности адсорбента и абсорбирующихся молекул, с частичной деформацией молекулы и поверхности и с разрушением адсорбирующихся молекул [12].

Появление СП в конце 60-х – начале 70-х годов прошлого столетия увенчало многолетнюю тенденцию «химизации» бетона – применение в технологии различных добавок-модификаторов, улучшающих те или иные свойства бетонных смесей и бетонов. Воздействуя на процессы формирования структуры, особенно на начальной, коагуляционной, стадии, СП изменяют реологические свойства цементной системы,

способствуют сокращению ее водопотребности, что в дальнейшем отражается на параметрах кристаллизационной структуры [13].

Важнейшим достижением в области бетоноведения и технологии цементных бетонов за последние два десятилетия является освоение и применение в отечественной строительной практике супер- и гиперпластификаторов в сочетании с высокоэффективными минеральными добавками и комплексных модификаторов типа МБ.

Современный высококачественный бетон, основанный на модели высокой плотности, представляет собой сложную систему, включающую химические и минеральные добавки в качестве одного из самых основных компонентов, позволяющих регулировать свойства бетонной смеси и бетона в широком диапазоне, и прежде всего технологичность, прочность, плотность и долговечность. В этом плане весьма показательна ретроспективная тенденция развития бетонов нового поколения (БНП) с использованием химических и минеральных добавок новых поколений (рис. 2) [14, 15].

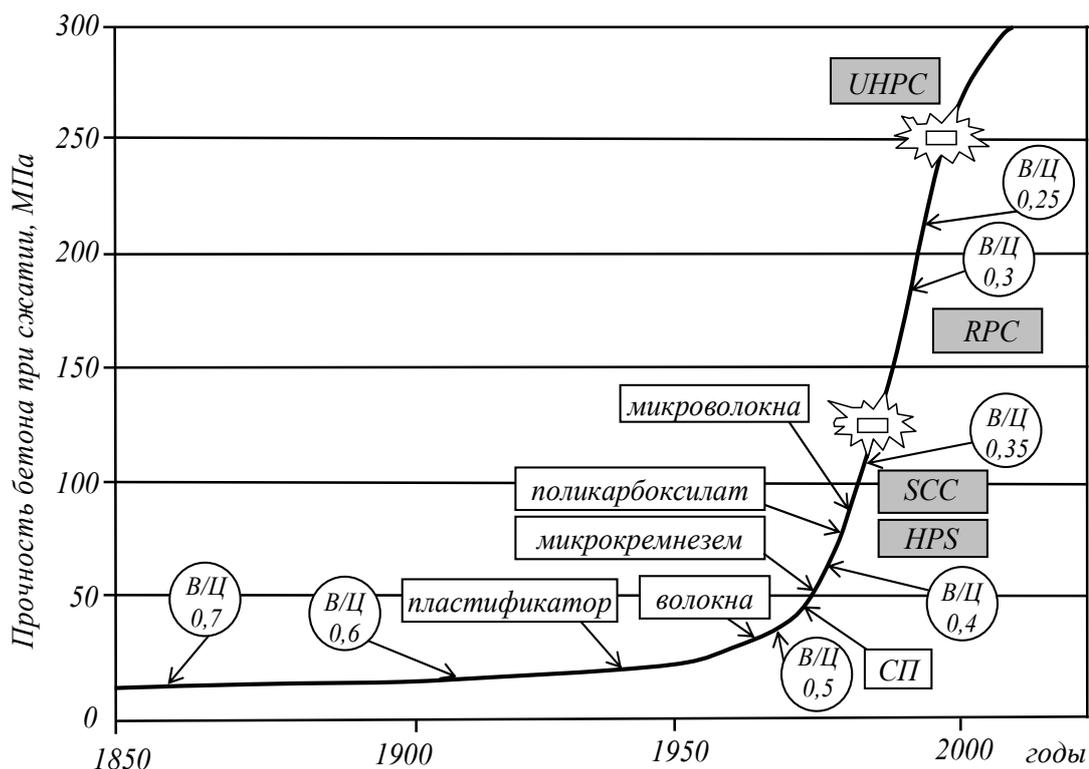


Рис. 2. Развитие технологии бетона [14, 15]

Зарубежный и отечественный опыт придания БНП новых уникальных технико-экономических свойств предопределил отнесение этих материалов к бетонам высоких и сверхвысоких технологий: high performance concrete (HPC) – высокофункциональный бетон (ВФБ); self-compacting concrete (SCC) – самоуплотняющийся бетон (СУБ); reactive powder concrete (RPC) – реакционно-порошковый бетон (РПБ); ultra-high performance concrete (UHPC) – бетон со сверхвысокими эксплуатационными свойствами (УВФБ) и др.

Литературные источники, в которых рассматриваются вопросы влияния СП на структуру и свойства цементных систем, чрезвычайно многочисленны.

Адсорбцию ПАВ в цементных системах на поверхности раздела «твердое тело – раствор» можно рассматривать, основываясь на двух различных физических моделях [16]. В первой предполагается, что адсорбция, по существу, ограничена монослоем, непосредственно прилегающим к поверхности, а последующие слои фактически представляют собой истинный раствор. При этом силы взаимодействия между твердым телом и молекулами растворенного вещества быстро ослабевают по мере увеличения расстояния. Вторая модель предполагает, что адсорбция связана с довольно толстым

(до $100 \cdot 10^{-10}$ м) полимолекулярным межфазным слоем, находящимся в медленно спадающем потенциальном поле поверхности твердого вещества. С этой точки зрения адсорбция из раствора представляет собой перераспределение вещества между объемной и поверхностной фазами.

Образование адсорбционных слоев ПАВ на поверхности зерен цемента является важнейшим фактором модификации структуры и свойств цементного теста и камня. Однако существует и другое мнение [17]: адсорбция ПАВ на минеральных вяжущих материалах затруднена, так как они, растворяясь в воде, генерируют поток вещества, направленный от межфазовой границы в сторону жидкости затворения. Этот поток, оттесняя ПАВ, понижает тем самым вероятность их адсорбции на подвижной поверхности метастабильной фазы.

В свете этой концепции замедляющее твердение действие, обычно свойственное подавляющему большинству ПАВ, обусловлено их адсорбцией на возникающих, а затем на растущих гидратных образованиях. В результате адсорбции происходят модифицирование и повышение дисперсности новых фаз; они-то постепенно экраннируют зерна цемента, снижая скорость их гидратации.

Вместе с тем если полностью исключить адсорбцию ПАВ на поверхности зерен цемента, то нелегко объяснить пластифицирующее действие этих добавок, проявляющееся немедленно после затворения цемента.

Действие ПАВ на процессы гидратации вяжущих не исчерпывается только образованием адсорбционных оболочек на поверхности гидратирующихся зерен цемента. Считается, что в присутствии этих соединений при гидратации цементов изменяются скорость выделения гидратных новообразований и условия контактных взаимодействий между частицами дисперсной фазы.

Бутт Ю.М. и Колбасов В.М. отмечали, что введение органических веществ избирательно меняет также степень гидратации клинкерных минералов [18].

В работе [19] отмечается, что ПАВ оказывают влияние на процесс и степень гидратации цемента, на морфологию гидросиликатов и способствуют формированию более дисперсных структур из гидратных фаз. Причем влияние ПАВ зависит от их дозировки, водотвердого отношения, температуры, молекулярной массы добавки и соотношения C_3A : гипс.

Из анализа литературных источников следует, что введение ПАВ в цементные системы приводит к замедлению первоначальной гидратации, в результате чего в основной структуре цементного теста образуется больше длиноволокнистых гидросиликатов кальция. Это приводит к пространственному сцеплению с гидратными новообразованиями высокой дисперсности, которое, в свою очередь, вызывает увеличение прочности цементной системы. При той же степени гидратации цемента и пористости системы эта структура обладает большей прочностью, чем структура, полученная при быстрой гидратации цемента и состоящая из коротковолокнистых гидросиликатов кальция.

В современном бетоноведении в области изучения влияния химических добавок к бетонам преобладают технологическое и строительно-техническое направления. Сведений же, касающихся химических свойств и механизма действия добавок, то есть физико-химического подхода, основанного на знаниях механизмов действия добавок на элементарные стадии гидратации – смачивание, адсорбцию, химические реакции, растворение, зародышеобразование, кристаллизацию, схватывание и твердение, – гораздо меньше, и они пока не могут служить научной основой прогнозирования и управления свойствами цементных бетонов с помощью этих добавок. Но вместе с тем роль добавок в качестве неотъемлемого компонента современного бетона и средств технологического регулирования увеличивается адекватно росту их влияния на гидратацию и структурообразование цемента, свойства бетонных смесей и бетона [16], что вызывает необходимость более глубокого понимания физических и химических аспектов регулирования и синтеза дисперсно-кристаллитной структуры и конструкционной прочности цементного камня.

Основываясь на современных представлениях физикохимии поверхностных явлений и теории контактных взаимодействий, можно полагать, что введение ПАВ в цементные системы позволит направленно регулировать свойства цементного теста, бетонной смеси и бетона.

В теоретическом и практическом плане основным вопросом в проблеме модифицирования цементных систем добавками СП, на наш взгляд, является установление взаимосвязи параметров разрушения цементного камня с процедурой введения СП и его дозировкой с целью направленного регулирования механических свойств цементных систем и прогнозирования возможности получения на этой основе бетонов повышенной надежности (трещиностойкости) и долговечности.

Данные по этому вопросу в отечественной и зарубежной литературе крайне ограничены.

Список литературы

1. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня / Л.Г. Шпынова, В.И. Чих, М.А. Саницкий [и др.]. – Львов : Вища шк., 1981. – 159 с.
2. Райхель, Б. Бетон: в 2 ч.: пер. с нем. / Б. Райхель, Д. Конрад. – М. : Стройиздат, 1979. – Ч. 1. – 112 с.
3. Технология вяжущих веществ / Ю.М. Бутт, С.Д. Огороков, М.М. Сычев, В.В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1965. – 620 с.
4. Вернигорова В.Н. Физико-химические основы образования модифицированных гидросиликатов кальция в композиционных материалах на основе системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ / В.Н. Вернигорова. – Пенза: ПГУАС, 2001. – 394 с.
5. Советский энциклопедический словарь. – М. : Совет. энцикл., 1980. – 1600 с.
6. Taylor, H.F.W. Studies on the hydration of Portland cement / H.F.W. Taylor // 27th Congress of Industrial Chemistry. – Brussels, 1954. – P. 363.
7. Екобори, Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел / Т. Екобори. – М. : Металлургия, 1971. – 264 с.
8. Никитенко, В.И. Исследования характеристик индивидуальных дислокаций и их влияние на физические свойства полупроводников / В.И. Никитенко // Материалы Всесоюзного совещания по дефектам структуры в полупроводниках. – Новосибирск, 1969. – Ч. 1, кн. 2. – С. 195–199.
9. Мчедлов-Петросян, О.П. Химия неорганических строительных материалов / О.П. Мчедлов-Петросян. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1988. – 304 с.
10. Структура и конструкционная прочность цементных композитов: монография / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.П. Скачков. – М.: АСВ, 2017. – 400 с.
11. Браун, Т. Химия – в центре наук : в 2 ч.: пер. с англ. / Т. Браун, Г.Ю. Лемей. – М.: Мир, 1983. – Ч. 2. – 520 с.
12. Добролюбов, Г.В. Прогнозирование долговечности бетона с добавками / Г.В. Добролюбов, В.Г. Ватинов, Т.И. Розенберг. – М. : Стройиздат, 1983. – 213 с.
13. Каприелов, С.С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива / С.С. Каприелов, В.Г. Батраков, А.В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. – 1999. – №6 – С. 6-10.
14. Czarnecki, L. Domieszkido betony. Mozliwosci i ograniczenia / L. Czarnecki // Budownictwo, technologia, architektura. – 2003. – № 3. – P. 4–6.
15. Kusharska, L. Tradycyjne i wspolczesne domieszkki do betony zwnijszajate ilose wody zarobowej / L. Kusharska // Cement . Wapno. Beton. – 2000. – № 2. – P. 46–61.
16. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1998. – 768 с.
17. Глеккель, Ф.А. Физико-химические основы применения добавок к минеральным вяжущим / Ф.А. Глеккель. – Ташкент: Фан, 1975. – 158 с.

18. Бутт, Ю.М. Влияние состава цемента и условий твердения на формирование структуры цементного камня / Ю.М. Бутт, В.М. Колбасов // VI Международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – Т. 2, кн. 1. – С. 281–283.

19. Рамачандран, В. Наука о бетоне: физико-химическое бетоноведение / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн; пер. с англ. под ред. В.Б. Ратинова. – М.: Стройиздат, 1986. – 278 с.

References

1. Physical and chemical bases of formation of the structure of cement stone / L.G. Shpynova, V.I. Chikh, M.A. Sanitsky [etc.]. – Lviv: Vishcha shkola, 1981. – 159 p.

2. Reichel, B. Concrete: in 2 parts: translation from German / B. Reichel, D. Conrad. – М.: Stroyizdat, 1979. – Part 1. – 112 p.

3. Technology of binders / Yu.M. Butt, S.D. Hams, M.M. Sychev, V.V. Timashev. – М.: Vysshaya shkola, 1965. – 620 p.

4. Vernigorova, V.N. Physical and chemical bases of formation of modified calcium hydrosilicates in composite materials based on the system $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ / V.N. Vernigorova. – Penza: PGUAS, 2001. – 394 p.

5. Soviet encyclopedic dictionary. – М.: Council. Encyclical, 1980. – 1600 p.

6. Taylor, H.F.W. Studies on the hydration of Portland cement / H.F.W. Taylor // 27th Congress of Industrial Chemistry. – Brussels, 1954. – P. 363.

7. Ekobori, T. Physics and mechanics of destruction and strength of solids / T. Ekobori. – М.: Metallurgy, 1971. – 264 p.

8. Nikitenko, V.I. Studies of the characteristics of individual dislocations and their effect on the physical properties of semiconductors / V.I. Nikitenko // Proceedings of the All-Union Conference on Structure Defects in Semiconductors. – Novosibirsk, 1969. – Part 1, Book. 2. – P. 195–199.

9. Mchedlov-Petrosyan, O.P. Chemistry of inorganic building materials / O.P. Mchedlov-Petrosyan. – 2nd ed., revised and enlarged. – М.: Stroiizdat, 1988. – 304 p.

10. Structure and structural strength of cement composites: monograph / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Yu.P. Skachkov. – М.: Izdatel'stvo ASV, 2017. – 400 p.

11. Brown, T. Chemistry – in the center of science: in 2 part: translation from English / T. Brown, G.Yu. Lemay. – М.: Mir, 1983. – Part 2. – 520 p.

12. Dobrolyubov, G.V. Prediction of the durability of concrete with additives / G.V. Dobrolyubov, V.G. Vatinov, T.I. Rosenberg. – М.: Stroiizdat, 1983. – 213 p.

13. Kaprielov, S.S. Modified concretes of a new generation: reality and perspective / S.S. Kaprielov, V.G. Batrakov, A.V. Sheinfeld // Concrete and reinforced concrete. – 1999. – №6. – P. 6–10.

14. Czarnezki, L. Domieszkido betony. Mozliwosoi i ograniczenia / L. Czarnezki // Budownictwo, technologia, architektura. – 2003. – № 3. – P. 4–6.

15. Kusharska, L. Tradycyine iwspolczone domieczki do betony zwnijszajate ilose wody zarobowej / L. Kusharska // Cement. Wapno. Beton. – 2000. – № 2. – P. 46–61.

16. Batrakov, V.G. Modified concretes. Theory and practice / V.G. Batrakov. – 2nd ed. – М.: Stroyizdat, 1998. – 768 p.

17. Gleckel, F.A. Physico-chemical bases of application of additives to mineral binders / F.A. Gleckel. – Tashkent: Fan, 1975. – 158 p.

18. Butt, Yu.M. Influence of cement composition and hardening conditions on the formation of the structure of cement stone / Yu.M. Butt, V.M. Kolbasov // VI International Congress on Cement Chemistry. – М.: Stroyizdat, 1976. – Т. 2, Vol. 1. – P. 281–283.

19. Ramachandran, V. Science of Concrete: Physico-chemical Concrete Science / V. Ramachandran, R. Feldman, J. Baudouin; translation from english ed. V.B. Ratinova. – М.: Stroyizdat, 1986. – 278 p.

УДК 691.5

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

Мажитов Еркибулан Бисенгалиевич,
аспирант
E-mail: mazhitov201090@gmail.com

Penza State University of Architecture
and Construction

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

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

Mazhitov Erkibulan Bisengalievich,
Postgraduate
E-mail: mazhitov201090@gmail.com

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗОЛЬ-СИЛИКАТНЫХ КРАСОК

В.И.Логанина, Е.Б. Мажитов

Приведены сведения о цвете лакокрасочных покрытий на растворной подложке в зависимости от вида пигмента в соответствии с картотекой цветов RAL. Показано, что наличие глицерина в составе золь-силикатной краски способствует повышению когезионной прочности покрытий, улучшению розлива краски, повышению качества внешнего вида покрытий. Приведены сведения о реологических свойствах золь-силикатной краски с добавкой глицерина в зависимости от содержания пигмента. Установлено, что введение глицерина в рецептуру краски приводит к увеличению значений критической объемной концентрации пигмента (наполнителя). Предложена модель изменения вязкости краски в зависимости от объемной концентрации пигмента (наполнителя).

Ключевые слова: золь силикатная краска, покрытия, реология, степень наполнения

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF ASH-SILICATE PAINTS

V.I. Loganina, Y.B. Mazhitov

Information on the color of paint coatings on the mortar substrate, depending on the type of pigment in accordance with the RAL color file is given. It is shown that the presence of glycerin in the composition of sol silicate paint promotes an cohesive strength increase of coatings, an improvement of paint filling, and an improvement of the quality of coatings appearance. Information is given on the rheological properties of a sol silicate paint with addition of glycerin depending on the pigment content. It has been established, that the introduction of glycerin into the paint formulation leads to an increase of the critical volume concentration values of the pigment (filler). A model for changing the viscosity of a paint depending on a pigment volume concentration (filler) is proposed.

Keywords: sol, silicate paint, coatings, rheology, degree of filling

Анализ научно-технической литературы убедительно свидетельствует о перспективности нанотехнологии для повышения качества строительных материалов [1–3]. На основе использования золь-гель-процессов получило интенсивное развитие направление в технологии керамики и неорганических композитов [4–10]. В настоящее время на рынке лакокрасочных материалов имеется золь-силикатная краска производства Германии. Учитывая актуальность проблемы импортозамещения, нами разработан состав золь-силикатной краски, включающий полисиликатное связующее, пигменты, наполнитель, добавки [11–13].

Полисиликатные растворы получены путем взаимодействия стабилизированных растворов коллоидного кремнезема (золей) с водными растворами щелочных силикатов (жидкими стеклами). В работе применяли золи кремниевой кислоты Nanosil 20 и Nanosil 30, выпускаемые ПК «Промстеклоцентр», калиевое жидкое стекло с модулем

M=3,29. В качестве наполнителя применяли микрокальцит марки МК-2(ТУ 5743-001-91892010-2011), маршалит и тальк марки МТ-ГШМ (ГОСТ 19284-79), в качестве пигмента – диоксид титана 230 рутильной формы (ТУ 2321-001-1754-7702-2014), охра (ГОСТ 8019–71), железный сурик марки Э (ГОСТ 8135-74), ультрамарин УМ-1 (ОСТ 6 – 10 – 404 – 77), оксид хрома ОХП-1 (ГОСТ 2912-79). Для регулирования свойств краски в рецептуру вводили добавку глицерина. Наличие глицерина в составе золь-силикатной краски способствует повышению когезионной прочности покрытий, улучшает розлив краски, повышает качество внешнего вида покрытий. Для определения содержания пигмента (наполнителя) измеряли вязкость краски с помощью вискозиметра ВЗ-4. Для получения различных оттенков диоксид титана перемешивали с соответствующим пигментом.

В табл.1 приведены цвета лакокрасочных покрытий на растворной подложке в зависимости от вида пигмента в соответствии с картотекой цветов RAL [14].

Т а б л и ц а 1

Цвета лакокрасочных покрытий

| Наименование пигмента | Цвет |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Диоксид титана | Белый RAL 9001 |
| Железный сурик | Карминно-красный RAL 3002 |
| Охра | Желто-золотой RAL 1004 |
| Оксид хрома | Лиственный зеленый RAL 6002 |
| Ультрамарин | Ультрамариновый синий RAL 5002 |
| Диоксид титана+ железный сурик | Розовый антик RAL 3014 |
| Диоксид титана+охра | Рапсово-желтый RAL 1021 |
| Диоксид титана+оксид хрома | Травяной-зеленый RAL 6010 |
| Диоксид титана+ультрамарин | Небесный синий RAL 5015 |

На рис.1 приведена зависимость вязкости краски от содержания пигмента и наполнителя. Как видно из полученных данных, при наполнении в интервале примерно $0 < \varphi < 0,12$ увеличение вязкости незначительно, полимерная матрица лишь частично переходит в пленочное состояние. При малой концентрации пигмента (наполнителя) граничные слои удаленных друг от друга частиц не представляют собой выделенной в объеме материала самостоятельной фазы, способной оказывать влияние на его свойства. При дальнейшем наполнении ($\varphi > 0,12$) происходит значительное изменение соотношения объемной и пленочной фаз матрицы, наблюдается резкое повышение вязкости состава.

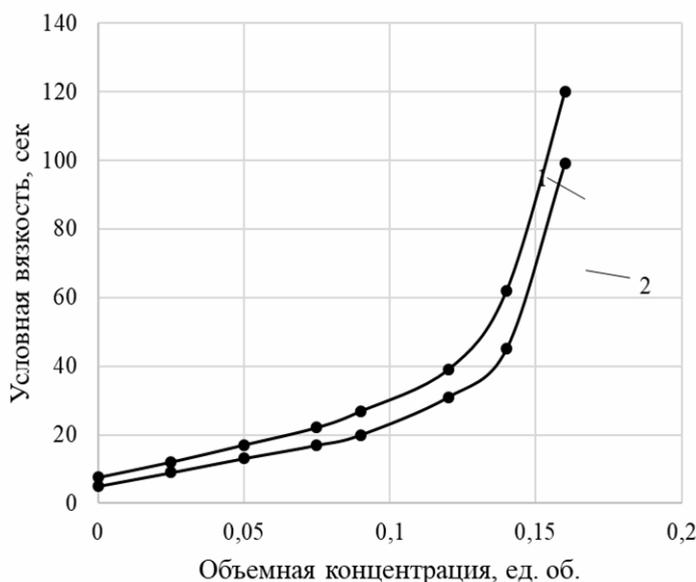


Рис. 1. Зависимость вязкости золь-силикатной краски от содержания пигмента и наполнителя:
1 – золь-силикатная краска; 2 – золь-силикатная краска с глицерином

На рис. 2–3 представлены зависимости вязкости от объемной доли пигмента в координатах $\lg \eta - C$ (где C – концентрация пигмента и наполнителя в системе). Эти зависимости выражены двумя пересекающимися прямыми. Точка пересечения, спроецированная на ось абсцисс, будет обозначать критическую объемную концентрацию пигмента (КОКП). Анализ данных, приведенных на рис. 1–2, свидетельствует, что введение глицерина в рецептуру краски приводит к увеличению значений критической объемной концентрации пигмента (наполнителя). Значение КОКП для золь-силикатной краски (пигмент – диоксид титана) составляет 0,1056, а для краски с глицерином – 0,11525.

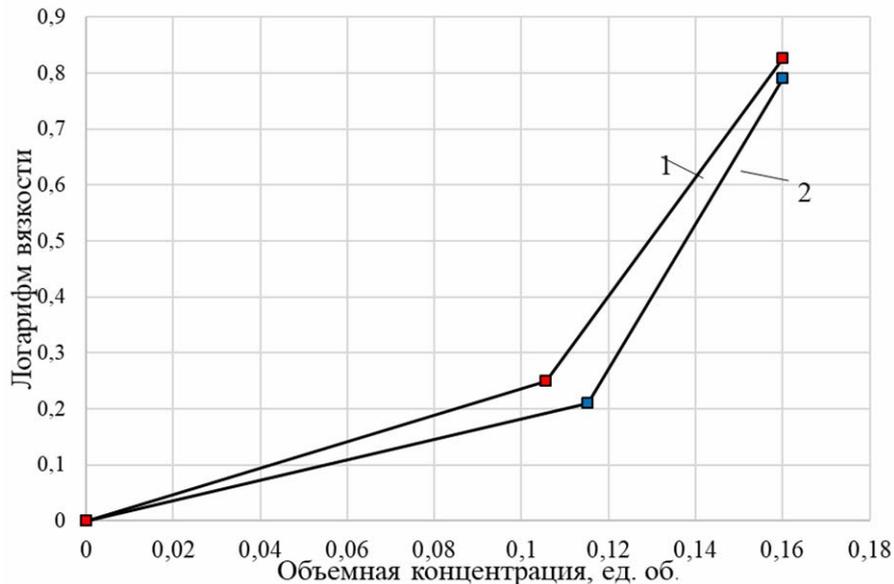


Рис. 2. Зависимость вязкости от объемной доли пигмента (диоксид титана) в координатах $\lg \eta - C$:
1 – золь-силикатная краска; 2 – золь-силикатная краска с глицерином

Были определены значения КОКП при применении других пигментов (рис. 3).

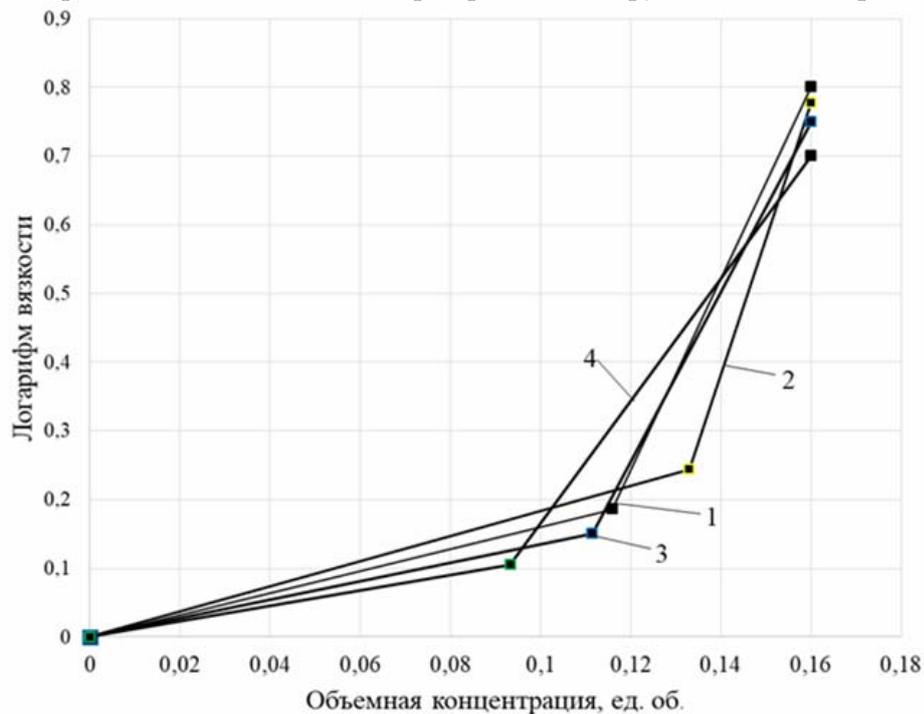


Рис. 3. Зависимость вязкости от объемной доли пигмента в координатах $\lg \eta - C$:
1 – железный сурик; 2 – охра; 3 – ультрамарин; 4 – оксид хрома

В табл. 2 приведены значения КОКП в зависимости от вида пигмента.

Т а б л и ц а 2

Значения критической объемной концентрации пигмента КОКП
в зависимости от вида пигмента

| Цвет | КОКП |
|--------------------------------|----------|
| Белый RAL 9001 | 0,115249 |
| Карминно-красный RAL 3002 | 0,1159 |
| Желто-золотой RAL 1004 | 0,133373 |
| Лиственный зеленый RAL 6002 | 0,0933 |
| Ультрамариновый синий RAL 5002 | 0,111446 |
| Розовый антик RAL 3014 | 0,118946 |
| Рапсово-желтый RAL 1021 | 0,123 |
| Травяной-зеленый RAL 6010 | 0,10328 |
| Небесный синий RAL 5015 | 0,120503 |

Как видно из рис.1–3, вязкость краски увеличивается при наполнении, при этом ее изменение при низких степенях наполнения может быть описано уравнением Эйнштейна

$$\varphi = \varphi_0 (1 + 2,5\varphi), \quad (1)$$

где η_0 – вязкость ненаполненной системы; φ – объемная доля пигмента (наполнителя).

С увеличением концентрации дисперсной фазы (φ более 0,08) возрастает взаимодействие между частицами и обнаруживаются отклонения от уравнения Эйнштейна. Эти отклонения, по-видимому, обусловлены взаимодействием частиц и образованием структуры, в которой частицы дисперсной фазы определенным образом ориентированы относительно друг друга (структурирование систем). Результаты проведенных расчетов показывают, что модель изменения вязкости краски от объемной концентрации пигмента (наполнителя) может быть описана полиномом вида

$$\eta = \eta_0 (a + b\varphi + c\varphi^2 + d\varphi^3), \quad (2)$$

где η_0 – вязкость ненаполненной системы; φ – объемная доля пигмента (наполнителя).

Получены уравнения вида:

$$\eta = \eta_0 (0,334 + 119\varphi - 2110,47\varphi^2 + 12217,83\varphi^3) \text{ – для золь-силикатной краски;}$$

$$\eta = \eta_0 (0,249 + 159,44\varphi - 2903,22\varphi^2 + 16442,22\varphi^3) \text{ – для золь-силикатной краски с добавкой глицерина.}$$

Проверка адекватности модели показала, что уравнение (2) справедливо в области наполнения до $\varphi=0,16$.

В результате проведенных исследований и расчетов определена оптимальная концентрация пигмента (наполнителя) для различных цветов краски. Разработанная золь-силикатная краска характеризуется хорошей удобонаносимостью, ускоренными сроками отверждения, высокой адгезией к бетонной и штукатурной подложкам, характеризующейся 1 баллом по ГОСТ 15140-78. Марка по морозостойкости покрытий на основе золь-силикатной краски составляет F35.

Список литературы

1. Королев, Е.В. Проблемы и перспективы нанотехнологии в строительстве / Е.В. Королев // Известия КазГАСУ. – 2011. – № 2 (16). – С. 200–208.
2. Бальмаков, М.Д. Наноконпозиционное материаловедение / М.Д. Бальмаков, Ю.В. Пухаренко // Вестник гражданских инженеров. – 2005. – №3(4). – С. 53–57.

3. Пухаренко, Ю.В. О влиянии углеродных фуллероидных наночастиц на тепловыделение цементного теста / Ю.В. Пухаренко, Д.И. Рыжов // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 4 (39). – С. 156–161.
4. Sanxi, Li Effect of organic montmorillonite on the performance of modified waterborne potassium silicate zinc-rich anti-corrosion coating / Li Sanxi, Ding Junyong, Shawgi Nazar, Qi Shan. // Research on chemical intermediates. – 2016. – Vol. 42, Issue 4. – P.3507–3521 DOI: 10.1007/s11164-015-2228-6
5. Goodarzi, Iman Mirzaie Eco-Friendly, Acrylic Resin-Modified Potassium Silicate as Water-Based Vehicle for Anticorrosive Zinc-Rich Primers / Goodarzi Iman Mirzaie, Farzam Mansour; Shishesaz, Mohammad Reza [etc.] //Journal of applied polymer science. – 2014. – Vol. 13, Issue 12.
6. Логанина, В.И. Известковые отделочные составы на основе золь-гель технологии / Логанина В.И., Давыдова О.А. //Строительные материалы. – 2009. – № 3. – С. 50–51.
7. Greenwood, P. Modified silica sols: titania dispersants and co-binders for silicate paints / P. Greenwood // PIGMENT&RESINTECHNOLOGY. – 2010. – Vol. 39, Issue 6. – P. 315–321 DOI: 10.1108/03699421011085803
8. Айлер, Р. Химия кремнезема: в 2 т. / Р. Айлер. – М.: Мир, 1982.
9. Получение и применение гидрозоль кремнезема / под ред. Ю. Г. Фролова. – М.: Труды МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1979.
10. Tryba, V. Improvement of photocatalytic activity of silicate paints by removal of K_2SO_4 / V. Tryba, R.J. Wrobel, P. Homa //Atmospheric environment. – 2015. – Vol. 115. – P. 47–52
11. Логанина, В.И. Разработка рецептуры золь-силикатной краски / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Е.Б. Мажитов // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3. – С.51–53.
12. Логанина, В.И. Длительная прочность покрытий на основе золь-силикатной краски / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Е.Б. Мажитов // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, вып. 7. – С.877–884.
13. Логанина, В.И. Свойства жидкого стекла с добавкой золя кремниевой кислоты / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Е.Б. Мажитов // Известия вузов. Строительство. – 2017. – №8. – С.74–79.
14. 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. – 2004. – №8. – С.10–14.

References

1. Korolev, E.V. Problems and prospects of nanotechnology in construction / E.V. Korolev // News of KazGASU. – 2011. – № 2 (16). – P. 200–208.
2. Balmakov, M.D. Nanocomposite materials science / M.D. Balmakov, Yu.V. Puharenko // Bulletin of civil engineers. – 2005. – No3 (4). – P. 53–57.
3. Puharenko, Yu.V. On the effect of carbon fulleroid nanoparticles on heat dissipation of cement paste / Yu.V. Puharenko, D.I. Ryzhov // Bulletin of civil engineers. – 2013. – No 4 (39). – P. 156–161.
4. Sanxi, Li Effect of organic montmorillonite on the performance of modified waterborne potassium silicate zinc-rich anti-corrosion coating / Li Sanxi, Ding Junyong, Shawgi Nazar, Qi Shan. // Research on chemical intermediates. – 2016. – Vol. 42, Issue 4. – P.3507–3521 DOI: 10.1007/s11164-015-2228-6
5. Goodarzi, Iman Mirzaie Eco-Friendly, Acrylic Resin-Modified Potassium Silicate as Water-Based Vehicle for Anticorrosive Zinc-Rich Primers / Goodarzi Iman Mirzaie, Farzam Mansour; Shishesaz, Mohammad Reza [etc.] //Journal of applied polymer science. – 2014. – Vol. 13, Issue 12.
6. Loganina, V.I. Alvestic finishing compositions based on sol-gel technology / V.I. Loganina, O.A. Davydova // Construction materials. – 2009. – № 3. – P. 50–51.

7. Greenwood, P. Modified silica sols: titania dispersants and co-binders for silicate paints / P. Greenwood // PIGMENT&RESINTECHNOLOGY. – 2010. – Vol. 39, Issue 6. – P. 315–321 DOI: 10.1108/03699421011085803
8. Ayler, P. Chemistry of silica: in 2 vol. / P. Ayler. – М.: Mir, 1982.
9. Preparation and use of silica hydrosols / ed. Yu. G. Frolova. – М.: Trudy MKhTI them. DI Mendeleev, 1979.
10. Tryba, B. Improvement of photocatalytic activity of silicate paints by removal of K_2SO_4 / B. Tryba, R.J. Wrobel, P. Homa // Atmospheric environment. – 2015. – Vol. 115. – P. 47–52
11. Loganina, V.I. Development of the formulation of the sol-silicate paint / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, E.B. Mazhitov // Regional architecture and construction. – 2017. – №3. – P.51–53.
12. Loganina, V.I. The durability of coatings based on sol-silicate paint / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, E.B. Mazhitov // Vestnik MGS. – 2018. – Vol. 13, Is. 7. – P.877–884.
13. Loganina, V.I. Properties of liquid glass with the addition of silica sol / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, E.B. Mazhitov // Proceedings of the universities. Construction. – 2017. – №8. – P. 74–79.
14. Loganina, V.I. Evaluation of the decorative properties of coatings / V.I. Loganina, V.A. Smirnov, S.N. Kislitsyna, O.A. Zakharov, V.G. Khristolyubov // Paints and varnishes. – 2004. – №8. – P.10–14.

УДК 691.58

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Жегера Кристина Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: jegera@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

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

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМОСИЛИКАТОВ В КАЧЕСТВЕ МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ В ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМАХ

К.В. Жегера

Изучена возможность применения синтезированных алюмосиликатов в качестве модифицирующей добавки в цементных сухих строительных смесях. Приведены сведения о микроструктуре, химическом составе разработанной добавки. Выявлены закономерности кинетики предела прочности при сжатии цементных композитов с применением добавки на основе алюмосиликатов (в сравнении с бездобавочными образцами), твердеющих во влажных и воздушно-сухих условиях. Представлены физико-механические показатели плиточного клея, изготовленного на основе разработанной рецептуры сухой клеевой смеси.

Ключевые слова: сухие строительные смеси, синтезированные алюмосиликаты, плиточный клей, прочность

APPLICATION OF ALUMOSILICATES AS A MODIFYING ADDITIVE IN CEMENT SYSTEMS

K.V. Zhegera

The possibility of using synthesized aluminosilicates as a modifying additive in dry cement mortars has been studied. Information on the microstructure, chemical composition of the developed additive is given. The regularities of the kinetics of compressive strength of cement composites with the use of an additive based on aluminosilicates (in comparison with the additive-free samples) hardening in humid and air-dry conditions are revealed. The physicomachanical indicators of tile adhesive made on the basis of the developed dry adhesive compounding are presented.

Keywords: dry construction mixtures, synthesized aluminosilicates, tile adhesive, strength

В современном мире все больше внимания уделяют разработке эффективных строительных материалов, обладающих высокими физическими и техническими свойствами. Для достижения поставленной цели исследуют структуру материала и целенаправленно формируют ее в виде гетерогенной, многофазной системы со сложной иерархией. Одним из видов управления свойствами такой системы является модифицирование их структуры наноразмерными частицами [1, 2]. Так, например, для формирования повышенных эксплуатационных характеристик сухих строительных смесей (ССС) в их рецептуру вводят различные модифицирующие добавки [3, 4].

На сегодняшний момент модифицирующее добавки для ССС производят, в основном, зарубежом, что оказывает существенное влияние на себестоимость готового продукта.

Решение этой проблемы позволит снять зависимость отечественных производителей ССС от импортных поставок добавок. В связи с этим для расширения номен-

клатуры модифицирующих добавок для ССС, снижения себестоимости готового продукта и контроля структурообразования цементных ССС предложено вводить в их рецептуру синтезированные алюмосиликаты [5].

Синтез добавки заключается в осаждении алюмосиликатов из 15 %-го раствора технического сульфата алюминия $Al_2(SO_4)_3$ с добавлением силиката натрия и последующим промыванием дистиллированной водой полученного осадка. Полученный осадок высушивается при температуре $t = (105 \pm 5)^\circ C$ в течение 24 ч и измельчается до удельной поверхности $S_{уд} = 0,69-1,03 \text{ м}^2/\text{г}$.

Микроструктура модифицирующей добавки на основе синтезируемых алюмосиликатов изучена с помощью аналитической сканирующей электронной микроскопии (рис. 1).

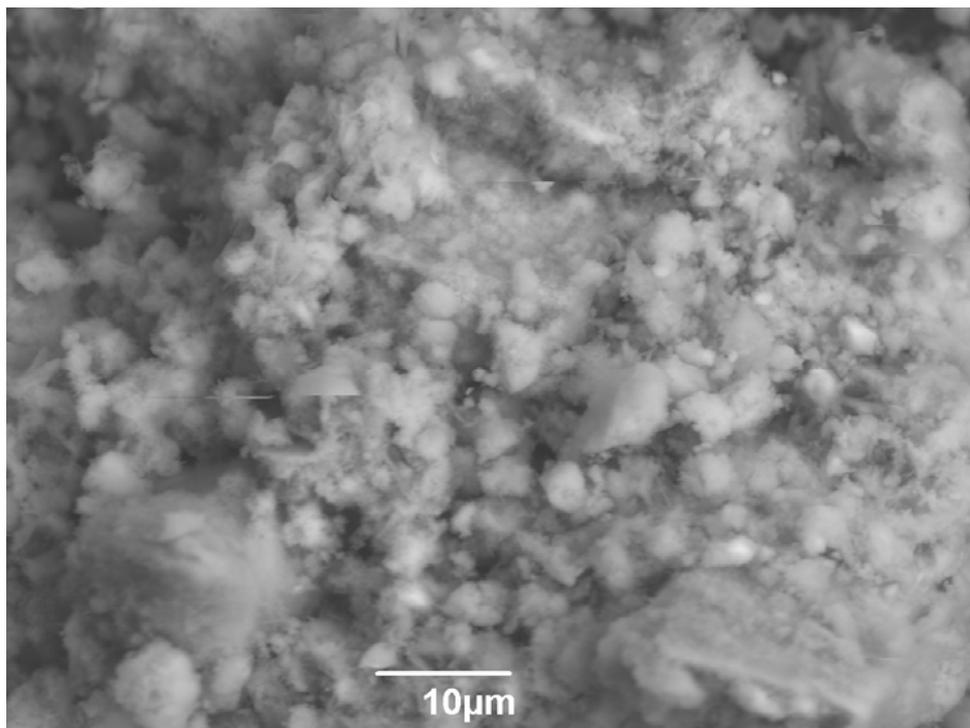


Рис. 1. Микроструктура синтезированных алюмосиликатов

Установлено, что микроструктура разработанной добавки представлена частицами округлой формы с размерами 5,208–5,704 нм; также присутствуют частицы лещадной формы с размерами 7,13–8,56 нм. Удельная поверхность частиц добавки составляет $S_{уд} = 86,5 \pm 3,5 \text{ м}^2/\text{г}$ [6].

С помощью химического анализа выявлено, что в составе синтезируемой добавки преобладают такие химические элементы, как O, Si и Na, с содержанием 60,91 %, 31,26 % и 24,23 % соответственно, что оказывает положительное влияние на формирование структуры цементного камня [7].

Физико-химические показатели минеральной добавки на основе аморфных алюмосиликатов представлены в таблице.

Физико-химические показатели минеральной добавки

| № п/п | Наименование показателя | Значение показателя |
|-------|---|----------------------|
| 1 | Внешний вид | Порошок белого цвета |
| 2 | Активность, мг/г | 350 |
| 3 | Удельная поверхность, $S_{уд}$, $\text{м}^2/\text{кг}$ | 688,6 |
| 4 | Плотность насыпная, $\text{кг}/\text{м}^3$ | 568,2 |
| 5 | Плотность истинная, $\text{кг}/\text{м}^3$ | 2140 |

Ранее проведенные исследования [7, 8] показали, что композиционное цементное вяжущее, содержащее синтезированные алюмосиликаты, имеет более высокое значение нормальной плотности цементного теста, составляющее 34–43 % в зависимости от процентного содержания добавки, соответственно равного 10–30 %.

На рис. 2 представлены результаты испытаний образцов цементного камня на определение предела прочности при сжатии, набирающих прочность во влажных (рис. 2, а) и воздушно-сухих (рис. 2, б) условиях. Для изготовления образцов выбрано оптимальное соотношение воды и цемента: В/Ц=43 %.

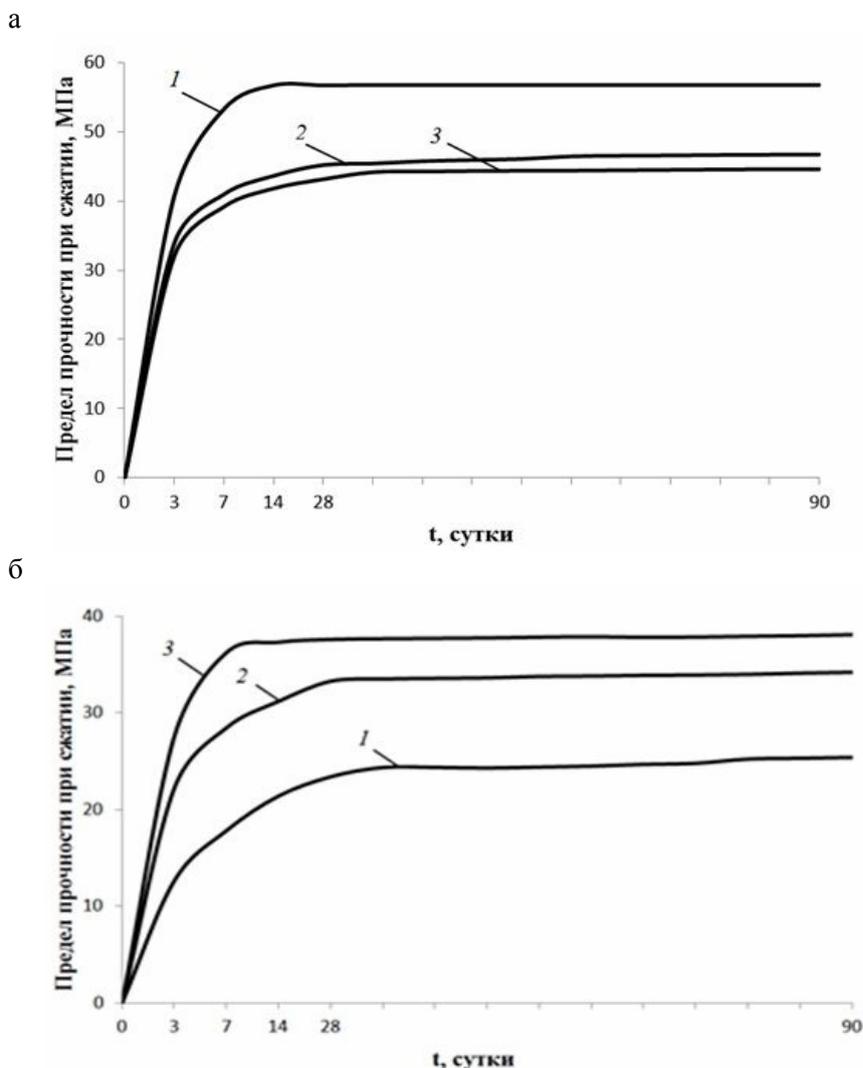


Рис. 2. Кинетика набора прочности образцов:

а – во влажных условиях; б – в воздушно-сухих условиях;

1 – контрольный образец (без содержания добавки);

2 – композит (содержание синтезируемой добавки – 10 % от массы цемента);

3 – композит (содержание синтезируемой добавки – 20 % от массы цемента)

Анализ данных, представленных на рис. 2,а, показал, что при твердении образцов во влажных условиях (температура $18\pm 2^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха 100 %) добавка на основе алюмосиликатов способствует снижению прочности при сжатии цементного камня. Так, в возрасте 90 суток прочность композита снижается на 17,7–21,4 % в зависимости от содержания добавки.

Установлено, что при твердении композита в воздушно-сухих условиях (температура $18\pm 2^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха 60–70 %) добавка на основе алюмосиликатов способствует повышению прочности при сжатии цементного камня и скорости набора прочности на ранних стадиях твердения. В возрасте 90 суток предел

прочности при сжатии повышается на 27,9–50,1 % в зависимости от процентного содержания добавки (рис. 2, б).

Очевидно, что твердение цементного камня на основе композиционного вяжущего в воздушно-сухих условиях происходит в более благоприятных условиях, т.е. добавка на основе алюмосиликатов обладает влагоудерживающей способностью.

Разработан состав клеевой ССС на цементной основе с применением в рецептуре в качестве модифицирующей добавки синтезируемых алюмосиликатов с соотношением компонентов: портландцемент – 31,05 %; песок фракций 0,63–0,16 – 62,10 %; модифицирующая добавка – 6,21 %; кратасол ПФМ – 0,32 % и Neolith P 4400 – 0,32 %.

Разработанная сухая клеевая смесь обладает насыпной плотностью $\rho_{нас} = 1110 \text{ кг/м}^3$. Плиточный клей, изготовленный на ее основе, характеризуется высокой прочностью при сжатии, составляющей более 35 МПа, высокой адгезионной и когезионной прочностью – $R_{адг}=1,2 \text{ МПа}$ и $R_{ког}=2,23 \text{ МПа}$ соответственно.

Установлено, что применение добавки на основе аморфных алюмосиликатов в цементных системах приводит к значительному росту прочности при сжатии цементного камня при твердении в воздушно-сухих условиях как в ранние, так и в поздние сроки твердения. Установлена эффективность применения синтезированных алюмосиликатов в качестве модифицирующей добавки, регулирующей структурообразование и улучшающей физико-механические параметры цементных ССС, на основе которых производится плиточный клей.

Список литературы

1. Баталин, Б.С. Исследования эффективности добавок, применяемых для производства сухих строительных смесей / Б.С. Баталин // Успехи современного естествознания. – 2007. – № 7. – С. 71–73.
2. Валеева, Ю. Сухие строительные смеси: производство и основные виды / Ю. Валеева // Equipnet.ru – «Оборудование для бизнеса». – URL: https://www.equipnet.ru/articles/power-industry/power-industry_553.html
3. Ильина, Л.В. Влияние модифицирующих добавок на свойство сухих строительных смесей / Л.В. Ильина, Ю.В. Сидоркович // Актуальные вопросы науки и техники: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. – № 2. – Самара. – 2015. – 199 с.
4. Логанина, В.И. Перспективы изготовления органо-минеральной добавки на основе отечественного сырья / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, В.Н. Горбунов, Т.Н. Дмитриева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 9. – С. 36–39.
5. Жегера, К.В. Свойства цементных сухих строительных смесей при введении в их рецептуру синтезированных алюмосиликатов / К.В. Жегера // Молодой ученый. – 2014. – №3 (62). – С.278–280.
6. Логанина, В.И. Добавка на основе алюмосиликатов для цементных систем / В.И. Логанина, В.И. Жерновский, М.А. Садовникова, К.В. Жегера // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 5, №6. – С. 8–11.
7. Loganina, V.I. Contech sintetizzato utilizzando alluminosilicato / V.I. Loganina, L.V. Makarova, R.V. Tarasov, Ch.V. Zhegera // Italian Science Review. – 2014. – № 2(11). – P. 97–100.
8. Логанина, В.И. Оценка эффективности использования синтезированных алюмосиликатов в цементных системах / В.И. Логанина, К.В. Жегера // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2014. – №3. – С. 84–87.

References

1. Batalin, B.S. Study of the effectiveness of additives used for the production of dry construction mixtures / B.S. Batalin // Successes of modern natural science. – 2007. – № 7. – P. 71–73.

2. Valeeva, Yu.A. Dry mixes: production and principal // Equipnet.ru — «Equipment for business» / Yu.A. Valeeva. – URL: https://www.equipnet.ru/articles/power-industry/power-industry_553.html
3. Ilyina, L.V. Influence of modifying additives on the properties of dry construction mixtures / L.V. Ilyina, Yu. Sidorkevich // Actual problems of science and technology: collection of scientific papers on the results of the international scientific-practical conference. – № 2. – Samara. – 2015. – 199 p.
4. Loganina, V.I. Prospects for the manufacture of organo-mineral supplements based on domestic raw materials / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, V.N. Gorbunov, T.N. Dmitriev // Proceedings of higher educational institutions. Building. – 2009. – № 9. – P. 36–39.
5. Zhegera, K.V. Properties of dry cement mortars with the introduction of synthesized aluminosilicates into their formulation / K.V. Zhegera // Young Scientist. – 2014. – № 3 (62). – P. 278–280.
6. Loganina, V.I. Additive based on aluminosilicates for cement systems / V.I. Loganina, V.I. Zhernovsky, M.A. Sadovnikov, K.V. Zheger // East European Journal of Advanced Technologies. – 2013. – V. 5, №6. – P. 8–11.
7. Loganina, V.I. Contech sintetizzato utilizzando alluminosilicato / V.I. Loganina, L.V. Makarova, R.V. Tarasov, Ch.V. Zhegera // Italian Science Review. – 2014. – № 2 (11). – P. 97–100.
8. Loganina, V.I. Evaluation of the effectiveness of the use of synthesized aluminosilicates in cement systems / V.I. Loganina, K.V. Zhegera // Academic Bulletin UralNIIproekt RAACS. – 2014. – №3. – P. 84–87.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624.012

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

Скачков Юрий Петрович,
доктор технических наук, ректор, профессор
кафедры «Строительные конструкции»

Снежкина Ольга Викторовна,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Начертательная геометрия
и графика»
E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

Ладин Роман Акбарович,
аспирант
E-mail: ladinroman@gmail.com

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Skachkov Yurij Petrovich,
Doctor of Sciences, Rector, Professor of the
department «Building structures»

Snezhkina Olga Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the Department «Descriptive
Geometry and Graphics»
E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

Ladin Roman Akbarovich,
Postgraduate
E-mail: ladinroman@gmail.com

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ОТ ИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ

Ю.П. Скачков, О.В. Снежкина, Р.А. Ладин

Рассматривается математическая модель оценки влияния геометрических характеристик железобетонных балок на их прочность в зоне действия поперечных сил при изменении относительного пролета среза a/h_0 от 1 до 3 на основе экспериментальных данных.

Ключевые слова: железобетонные балки, прочность, относительный пролет среза от 1 до 3, моделирование, геометрические характеристики

STRENGTH DEPENDENCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS ON GEOMETRICAL CHARACTERISTICS IN THE AREA OF TRANSVERSE FORCES

Yu.P. Skachkov, O.V. Snezhkina, R.A. Ladin

The authors consider a mathematical model for assessing the effect of geometric characteristics of reinforced concrete beams on strength in the zone of transverse forces action when the relative span of a/h_0 is changed from 1 to 3 on the basis of experimental data.

Keywords: reinforced concrete beams, strength, relative span of a slice from 1 to 3, modeling, geometric characteristics

Существующая расчетная модель определения прочности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов, принятая в нормативных документах, из-за сложного напряженно-деформированного состояния имеет существенные расхождения с фактическим характером работы конструкций и требует дальнейшего развития [1–3]. Наибольшие расхождения между экспериментальными и расчетными значениями прослеживаются в железобетонных балках с относительным пролетом среза (a/h_0) менее 3.

Согласно действующему своду правил (СП 63.13330.2012) поперечная сила (Q_b) в наклонном сечении изгибаемого железобетонного элемента без распределенного армирования, воспринимаемая бетоном, определяется в зависимости от расчетного сопротивления бетона растяжению (R_{bt}), рабочей высоты (h_0), ширины (b) и длины проекции наклонного сечения на ось балки (c) по эмпирической формуле

$$Q_b = \frac{1,5R_{bt}bh_0^2}{c}, \quad (1)$$

на которую накладывается ряд ограничений: $0,5R_{bt}bh_0 \leq Q_b \leq 2,5R_{bt}bh_0$; $h_0 \leq c \leq 2h_0$. В результате расчетные значения не отражают закономерности изменения опытных величин и требуют уточнения.

Ниже приводится и обосновывается связь прочности наклонного сечения изгибаемого железобетонного элемента с такими факторами, как высота балки (h_0), расстояние от опоры до линии действия сосредоточенной нагрузки (a) при изменении относительного пролета среза (a/h_0) от 1 до 3, на основе экспериментальных данных, полученных в Американском институте бетона (ACI).

Рассматриваются четыре серии испытаний железобетонных балок, проведенных профессором G.N.J. Kanj (ACI). Геометрические характеристики рассматриваемых образцов приведены в таблице. Все опытные образцы имеют ряд постоянных параметров, таких, как прочность бетона (280 кг/см^2), прочность и процент продольного армирования ($\mu_s=2,8 \%$), ширина балок ($b=15,25 \text{ см}$). Изменяемыми факторами являются: высота балок ($h_0=13,5 \text{ см}$ в I серии, $h_0=27 \text{ см}$ во II серии, $h_0=54 \text{ см}$ в III серии, $h_0=108 \text{ см}$ в IV серии,) и расстояние от опоры до линии действия сосредоточенной нагрузки (анализировались балки со значением a от $1h_0$ до $3h_0$). Схема опытных образцов показана на рис. 1.

Геометрические характеристики опытных образцов железобетонных балок

| N серии | N образца | b , см | h_0 , см | a , см | l , см | a/h_0 | $2F_u$ (кг 10^3) |
|---------|-----------|----------|------------|----------|----------|---------|------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| I | 1 | 15,24 | 14,12 | 33,98 | 113,66 | 2,41 | 10,49 |
| | 2 | 15,11 | 13,28 | 27,17 | 100,07 | 2,04 | 13,17 |
| | 3 | 15,11 | 13,33 | 27,17 | 100,07 | 2 | 14,07 |
| | 4 | 15,11 | 13,20 | 13,56 | 72,84 | 1,03 | 31,66 |
| | 5 | 15,11 | 13,58 | 13,30 | 72,84 | 1 | 32,15 |
| | 6 | 15,03 | 13,46 | 40,64 | 127 | 3,02 | 6,64 |
| | 7 | 15,44 | 13,97 | 37,28 | 120,29 | 2,67 | 10,22 |
| | 8 | 15,49 | 13,86 | 40,69 | 127,10 | 2,94 | 8,01 |
| II | 9 | 15,59 | 27,12 | 81,38 | 254,20 | 3 | 13,24 |
| | 10 | 15,26 | 26,59 | 27,12 | 145,69 | 1,02 | 73,34 |
| | 11 | 15,31 | 27,33 | 54,25 | 199,94 | 1,99 | 22,54 |
| | 12 | 15,34 | 27,50 | 67,81 | 227,07 | 2,46 | 14,83 |
| | 13 | 15,24 | 27,63 | 81,53 | 254,50 | 2,95 | 12,74 |
| | 14 | 15,31 | 27,45 | 67,94 | 227,33 | 2,47 | 15,55 |
| | 15 | 15,24 | 27,17 | 67,94 | 227,33 | 2,5 | 15,73 |
| | 16 | 15,31 | 26,97 | 54,35 | 200,15 | 2,02 | 22,81 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|----|-------|--------|--------|--------|------|--------|
| III | 17 | 15,64 | 54,15 | 108,50 | 318,61 | 2 | 33,29 |
| | 18 | 15,64 | 52,83 | 54,25 | 210,10 | 1,03 | 111,71 |
| | 19 | 15,51 | 54,22 | 54,25 | 210,10 | 1 | 119,38 |
| | 20 | 15,49 | 54,40 | 162,76 | 427,12 | 2,99 | 20,81 |
| | 21 | 15,24 | 54,91 | 108,71 | 319,02 | 1,96 | 40,14 |
| | 22 | 52,32 | 163,06 | 163,06 | 427,73 | 3,12 | 21,95 |
| | 23 | 52,40 | 163,06 | 163,06 | 427,73 | 3,11 | 21,99 |
| | 24 | 15,24 | 51,76 | 135,89 | 373,38 | 2,62 | 23,40 |
| IV | 25 | 15,24 | 109,72 | 219,45 | 642,11 | 2 | 66,49 |
| | 26 | 15,39 | 109,47 | 273,68 | 750,57 | 2,5 | 48,30 |
| | 27 | 15,36 | 109,22 | 327,66 | 858,52 | 3 | 33,65 |

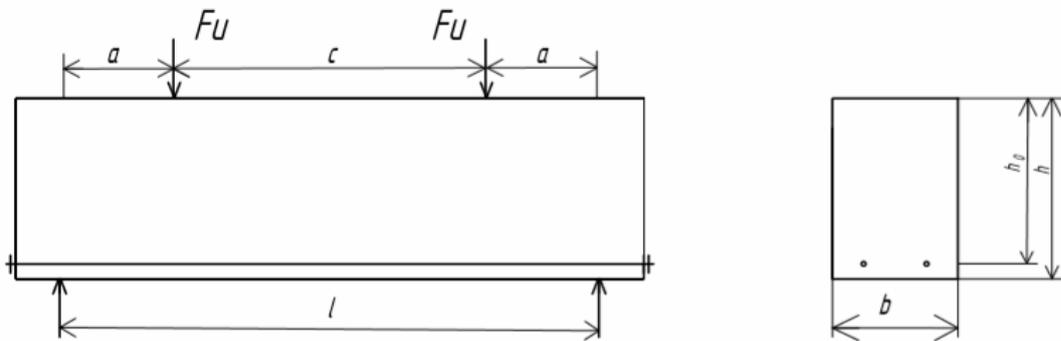


Рис. 1. Схема опытных образцов железобетонных балок

Для установления функциональной зависимости прочности от геометрических характеристик рассматривалась выборка из 27 образцов (при изменении относительного пролета среза a/h_0 от 1 до 3), разрушившихся в зоне действия поперечных сил.

По исходным данным (см. таблицу) с помощью программной надстройки «Пакет анализа», «Регрессия» (Microsoft Excel) получили линейную регрессию между $y = \ln 2F_u$ и $x_1 = \ln h_0$, $x_2 = \ln a$. Результаты регрессионной статистики представлены на рис. 2.

| | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y |
|----|----------|----------|----------|---|--------------------------|--------------|--------------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| 1 | | | | | | | | | | | |
| 2 | LN(h0) | LN(a) | LN(Fu) | | ВЫВОД ИТОГОВ | | | | | | |
| 3 | 2,647762 | 3,525925 | 2,350591 | | | | | | | | |
| 4 | 2,586575 | 3,302408 | 2,578135 | | Регрессионная статистика | | | | | | |
| 5 | 2,609261 | 3,302408 | 2,644737 | | Множественный R | 0,99293742 | LN(Fu) | 1 | LN(h0) | LN(a) | |
| 6 | 2,580823 | 2,60739 | 3,455094 | | R-квадрат | 0,985924719 | LN(h0) | 0,626004894 | 1 | | |
| 7 | 2,609261 | 2,60739 | 3,470731 | | Нормированный R-к | 0,984751779 | LN(a) | 0,200701854 | 0,887635563 | 1 | |
| 8 | 2,599871 | 3,704753 | 1,893901 | | Стандартная ошибка | 0,092714584 | | | | | |
| 9 | 2,636912 | 3,61865 | 2,325196 | | Наблюдения | 27 | | | | | |
| 10 | 2,629613 | 3,706002 | 2,081329 | | Дисперсионный анализ | | | | | | |
| 11 | 3,300537 | 4,399149 | 2,583629 | | | | | | | | |
| 12 | 3,280678 | 3,300537 | 4,295203 | | | df | SS | MS | F | Значимость F | |
| 13 | 3,308 | 3,993684 | 3,115465 | | Регрессия | 2 | 14,45087148 | 7,225435739 | 840,5584876 | 6,04623E-23 | |
| 14 | 3,314484 | 4,216828 | 2,696836 | | Остаток | 24 | 0,206303857 | 0,008595994 | | | |
| 15 | 3,31909 | 4,40102 | 2,54523 | | Итого | 26 | 14,65717533 | | | | |
| 16 | 3,312636 | 4,218699 | 2,744606 | | | | | | | | |
| 17 | 3,302408 | 4,218699 | 2,7562 | | | Коэффициенты | стандартная ошибка | t-статистика | P-Значение | Нижние 95% | Верхние 95% |
| 18 | 3,294903 | 3,995555 | 3,127466 | | Y-пересечение | 1,602768871 | 0,094827466 | 16,90194768 | 7,85385E-15 | 1,407054601 | 1,79848314 |
| 19 | 3,99181 | 4,686831 | 3,505384 | | Переменная X 1 | 2,271210044 | 0,056560924 | 40,15510844 | 1,60705E-23 | 2,154474035 | 2,387946054 |
| 20 | 3,967117 | 3,993684 | 4,716011 | | Переменная X 2 | -1,495695441 | 0,046995607 | -31,82628211 | 3,85153E-21 | -1,592689606 | -1,398701276 |
| 21 | 3,993216 | 3,993684 | 4,782375 | | | | | | | | |

Рис. 2. Результаты регрессионной статистики и корреляционного анализа

Рассчитанные коэффициенты регрессии позволяют получить уравнение, выражающее зависимость прочности железобетонных балок ($2F_u$) от высоты (h_0) и пролета среза (a):

$$y = 1,60 + 2,27x_1 - 1,50x_2. \quad (2)$$

Значение множественного коэффициента детерминации $R^2=0,993$ показывает, что около 99 % общей вариации результативного признака объясняется вариацией факторных признаков x_1, x_2 . Значит, выбранные факторы влияют на прочность балок по наклонному сечению, что подтверждает правильность их включения в построенную модель.

Расчитанный уровень значимости $\alpha_p < 0,05$ подтверждает значимость R^2 .

Проверка значимости коэффициентов регрессии показывает, что абсолютные значения коэффициентов a_0, a_1, a_2 больше, чем их стандартные ошибки. К тому же эти коэффициенты являются значимыми, о чем можно судить по значениям показателя «P-значение» (меньше заданного уровня значимости $\alpha=0,05$).

Таким образом, расчетная модель определения прочности железобетонных балок при разрушении по наклонному сечению отражает влияние исследуемых факторов x_1, x_2 на результативный признак.

Преобразуем уравнение (1) в степенную функцию (для уточнения совместного влияния факторов h_0, a при расчете изгибаемых элементов по наклонному сечению на действие поперечной силы):

$$\ln 2F_u = \ln e^{1,6} + \ln h_0^{2,27} + \ln a^{-1,5}, \quad (3)$$

$$2F_u = 4,95 \frac{h_0^{2,27}}{a^{1,5}}. \quad (4)$$

Полученное выражение позволяет количественно определить влияние каждого из рассматриваемых факторов ($h_0; a$) на прочность железобетонных балок ($2F_u$) в зоне действия поперечных сил.

Уравнение (4) можно привести к виду:

$$2F_u = 4,95 \frac{h_0^{0,77}}{\left(\frac{a}{h_0}\right)^{1,5}}, \quad (5)$$

что позволит оценить влияние высоты балки на прочность наклонного сечения при заданном относительном пролете среза. Экспериментальное подтверждение влияния совместного увеличения высоты балки и пролета среза (в 2, 4, 8 раз) на прочность балок-стенок при изменении a/h_0 от 1 до 3 приведено на рис. 3.

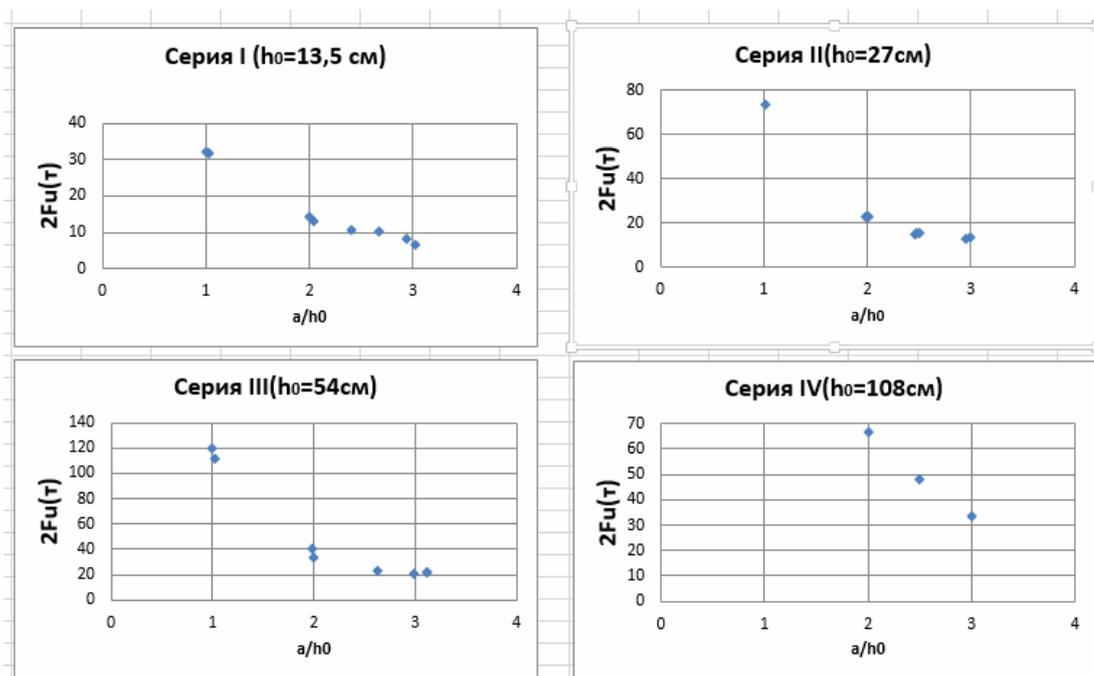


Рис. 3. Опытные значения прочности балок при изменении высоты и пролета среза

Увеличение высоты балки и пролета среза (см. рис. 1, 3) обеспечивает максимальное повышение прочности при относительном пролете среза $a/h_0=1$ (запас прочности более 35 % по сравнению с балками с $2 \leq a/h_0 \leq 3$), что указывает на особенности работы коротких железобетонных балок-стенок.

Выводы

1. Получено аналитическое выражение для определения прочности железобетонных балок при изменении высоты (от 13 до 108 см) и пролета среза (от 13 см до 328 см).
2. На основе корреляционного анализа установлена связь между результативным признаком (прочность) и исследуемыми факторами (высота балки, пролет среза). Уровень всех выявленных связей различен и состоит в следующем: связь прочность балки – высота является прямой и заметной; связь высота балки – пролет среза является прямой и высокой; связь прочность балки – пролет среза является прямой и слабой.
3. Определено:
 - при относительном пролете среза $a/h_0=1$ увеличение высоты балки в 2 раза (серия II) повышает прочность в 2,3 раза; увеличение высоты балки в 4 раза (серия III) повышает прочность в 3,7 раза;
 - при относительном пролете среза $a/h_0=2$ увеличение высоты балки в 2 раза (серия II) повышает прочность в 1,7 раза; увеличение высоты балки в 4 раза (серия III) повышает прочность в 2,7 раза; увеличение высоты балки в 8 раз (серия IV) повышает прочность в 4,9 раза;
 - при относительном пролете среза $a/h_0=3$ увеличение высоты балки в 2 раза (серия II) повышает прочность в 1,8 раза; увеличение высоты балки в 4 раза (серия III) повышает прочность в 2,8 раза; увеличение высоты балки в 8 раз (серия IV) повышает прочность в 4,6 раза;
4. Выявлено, что пропорциональное увеличение высоты балки и пролета среза обеспечивает максимальное повышение прочности при относительном пролете среза $a/h_0=1$ (запас прочности более 35 % по сравнению с балками с $2 \leq a/h_0 \leq 3$), что указывает на особенности работы коротких железобетонных балок-стенок.

Список литературы

1. Филатов, В.Б. Анализ расчетных моделей при расчете прочности наклонных сечений железобетонных балок на действие поперечных сил / В.Б.Филатов, А.С. Арцыбасов, М.А. Багаутдинов, Д.И.Гордеев, А.И. Картунов, Р.А. Никитин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, №4(3). – С.642–645.
2. Снежкина, О.В. Оценка прочности железобетонных балок по экспериментальным данным / О.В. Снежкина, А.А. Киселев // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 2(31). – С.127–132.
3. Баранова, Т.И. Моделирование работы коротких железобетонных балок / Т.И. Баранова, Ю.П. Скачков, О.В. Снежкина, Р.А. Ладин // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2014. – № 2 (36). – С. 54–60.
4. Скачков, Ю.П. Модификация метода ПАТТЕРН к решению архитектурно-строительных задач / Ю.П. Скачков, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – №1(10). – С.4–9.
5. Danilov, A.M. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, No. 5. – P.219–225. – URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.517>
6. Danilov, A.M. Coherence function in analysis and synthesis of complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, No. 9. – P.375–380. – URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.5236>

7. Shein, A.I. Numerical study of short reinforced concrete beams / A.I. Shein, O.V. Snezhkina, R.A. Ladin // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, No. 9. – P.361–365. – URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.5246>

References

1. Filatov, V.B. Analysis of computational models for calculating the strength of oblique sections of reinforced concrete beams on the action of transverse forces / V.B. Filatov, A.S. Artsybasov, M.A. Bagautdinov, D.I. Gordeev, A.I. Kortunov, R.A. Nikitin // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 16, No. 4 (3). – P. 642–645.
2. Snezhkina, O.V. Strength assessment of reinforced concrete beams using experimental data / O.V. Snezhkina, A.A. Kiselev // Regional architecture and engineering. – 2017. – № 2 (31). – C.127–132.
3. Baranova, T.I. Modeling work of short reinforced concrete beams / T.I. Baranova, Y.P. Skachkov, O.V. Snezhkina, R.A. Ladin // Journal of Siberian Russian state automobile and road Academy. – 2014. – No. 2 (36). – P. 54–60.
4. Skachkov, Y.P. Modification of the method of PATTERN to the solution of the architecture-and-construction issues / Y.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2011. – №1(10). – P.4–9.
5. Danilov, A.M. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, No. 5. – P.219–225. – URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.517>
6. Danilov, A.M. Coherence function in analysis and synthesis of complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, No. 9. – P.375–380. – URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.5236>
7. Shein, A.I. Numerical study of short reinforced concrete beams / A.I. Shein, O.V. Snezhkina, R.A. Ladin // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, No. 9. – P.361–365. – URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.5246>

УДК 69.059.4

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

БЕЗОПАСНОСТЬ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ С НЕСУЩИМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ РАМАМИ В ТЕХПОДПОЛЬЕ

А.И. Шеин

Рассмотрен класс железобетонных зданий с несущей системой в виде поперечных железобетонных рам. Экономная массовая застройка 1960-х годов, технологические несовершенства того времени и непродуманная многолетняя эксплуатация способствовали развитию коррозионных процессов в железобетонных конструкциях нулевого цикла. Указаны факторы и условия, при которых происходит разрушение железобетонных элементов в техподполье. Даны рекомендации по профилактике аварийности и по усилению железобетонных конструкций.

Ключевые слова: безопасность, железобетонные конструкции, коррозия арматуры, агрессивные воздействия, усиление

SAFETY OF PREFABRICATED CONCRETE PUBLIC BUILDINGS WITH LOAD-CARRING TRANSFER FRAME IN SUBSTRUCTURES

A.I. Shein

The class of reinforced concrete buildings with a carrying system in the form of transverse reinforced concrete frames is considered. Economical mass construction of the 1960s poor, technological level of that time and long-term operation promoted the development of corrosion processes in reinforced concrete substructures. The work indicates the factors and conditions under which the destruction of reinforced concrete elements in the technical substructures take place. Recommendations on accident prevention and reinforcement of reinforced concrete structures are given.

Keywords: safety, reinforced concrete structures, reinforcement corrosion, aggressive effects, reinforcement

Безопасность сборных железобетонных зданий является актуальной проблемой строительных конструкций. В шестидесятые годы прошлого столетия в Советском Союзе было построено множество сборных железобетонных школ по типовому проекту серии 2-467А с квадратными классами. Согласно проекту, это трехэтажное каркасно-панельное здание с подвалом и рамно-связевым каркасом. Основными несущими конструкциями нулевого цикла здания являются поперечные железобетонные рамы (рис. 1), установленные на ленточный ростверковый фундамент и длинные железобетонные пустотные плиты перекрытий пролетом 7,2 м. Шаг железобетонных рам в подвале также 7,2 метра.

В поперечном сечении техподполья несущая конструкция состоит из двух крайних трех-О-образных рам и одной средней О-образной рамы. Железобетонные рамы имеют сечение элементов 25х23 см (сечение трапециевидное), армированы стальной периодической арматурой с четырьмя рабочими арматурными стержнями.

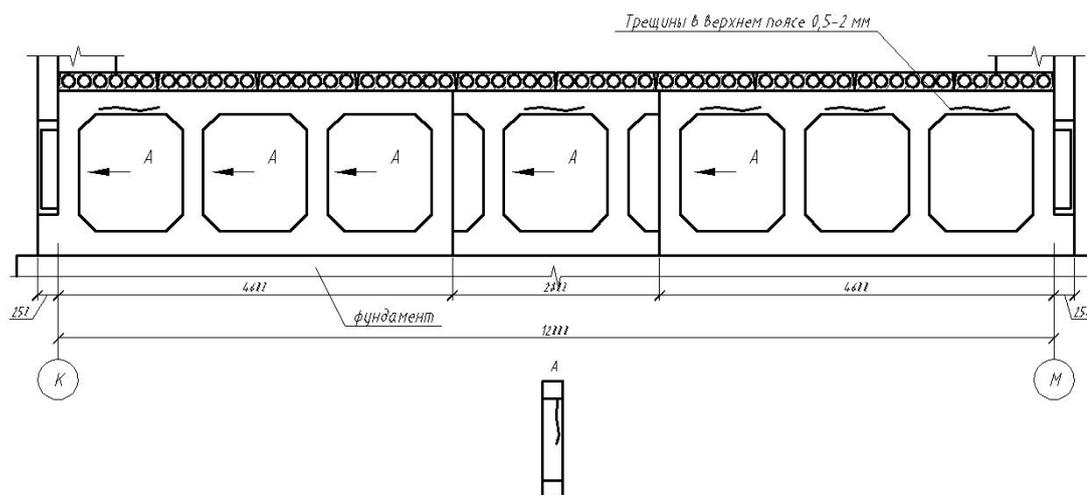


Рис. 1. Ферма техподполья на поперечном разрезе

Важной особенностью этого каркаса является то, что железобетонные рамы первого этажа опираются непосредственно на пустотные плиты перекрытий техподполья. При этом размеры стойки рамы первого этажа достаточно узкие: толщина 165 мм, ширина 580 мм.

В период эксплуатации таких зданий в техподполье периодически могут происходить утечки из систем водопровода, теплоснабжения и канализации. Кроме того, повышенная влажность в подвале может быть обусловлена уровнем грунтовых вод. В подвале имеются идеальные условия для скопления углекислого газа, так как углекислый газ в 1,5 раза тяжелее воздуха и скапливается в наиболее низких местах, а также во влажной грунтовой среде интенсивнее протекают процессы гниения. Подвальные помещения практически не вентилируются. Мало того, что здесь повсеместно отсутствует система принудительной вентиляции, но и имеющуюся систему естественной вентиляции через продухи зачастую заглушают, предотвращая попадание животных в техподполье. Уменьшение продухов может быть связано и с ремонтом отмостки вокруг здания. Строительные конструкции техподполья не бросаются в глаза, а часто и вообще труднодоступны. Поэтому дефекты здесь замечают, когда ситуация уже начинает приближаться к аварийной. Основные дефекты несущих железобетонных конструкций техподполья связаны с коррозией арматуры и бетона.

Коррозия арматуры железобетонных рам в техподполье может быть обусловлена тремя основными факторами:

- атмосферно-химическими воздействиями, включающими в себя агрессивные компоненты атмосферы, такие, как углекислый газ;
- химическим составом бетона (его структурой, видом вяжущего и режимом твердения бетона, различными добавками, вводимыми в бетон в качестве пластификаторов и ускорителей твердения, содержащих хлориды, сульфаты, карбонаты);
- «парниковым эффектом», возникающим в отопительный период в плохо проветриваемом теплом и влажном помещении.

Для массового строительства 1960-х годов характерны чрезмерно экономные решения и технологические недостатки, сказывающиеся на качестве бетонирования, на уплотнении бетонной смеси, составе добавок, процессе твердения и разбросе прочностных характеристик. Нарушение водоцементного отношения может приводить к избыточной пористости бетона конструкций.

Пористый бетон хорошо впитывает углекислый газ, кислород и влагу, присутствующие в атмосфере. Способность бетона впитывать кислотообразующие составы оказывает вредное воздействие на арматуру, которая при повреждении бетона попадает в кислотную среду. Углекислый газ и другие кислотообразующие продукты, проникая в бетон, реагируют с щелочными компонентами и снижают защитную роль окружающего арматуру бетонного слоя. При дальнейшем проникании кислотообра-

зующих продуктов и увлажнении будут происходить расслоение и частичное разрушение бетона, а также более интенсивное окисление (коррозия) арматуры. Ржавчина, образующаяся при коррозии стальной арматуры, увеличивает ее объем, создает недопустимые растягивающие напряжения, что приводит к разломам бетона и оголению арматуры. При коррозии незащищенной арматуры образуется рыхлый, не препятствующий проникновению агрессивных соединений слой ржавчины, и процесс коррозии интенсифицируется. При воздействии на бетон солей хлоридов может быть спровоцирован и процесс электрохимической коррозии.

В процессе эксплуатации в силу вышеуказанных факторов в железобетонных поперечных рамах техподполья возникают опасные дефекты и повреждения: глубокая коррозия арматуры, трещины, расслоение бетона поперечных рам, искривления и разрушения несущих элементов – стоек и ригелей. Три условные стадии развития процесса коррозии показаны на фото 1-3.



Фото 1. Разрушение стойки железобетонной рамы средней степени



Фото 2. Разрушение стойки железобетонной рамы высокой степени



Фото 3. Полное разрушение железобетонной стойки

Во избежание аварийных ситуаций требуется провести ряд профилактических мер и мер по усилению несущих конструкций.

Профилактические меры должны быть недорогими и эффективными. Их применение особенно актуально на начальных стадиях коррозии железобетона. Основной профилактической мерой является организация процесса вентиляции помещений. Кроме того, целесообразно провести обработку железобетонных конструкций с целью герметизации их поверхности. Антикоррозионная гидроизоляция должна защищать несущие конструкции сооружения от агрессивного влияния атмосферы и электрохимической коррозии. Здесь можно использовать битумно-полимерные и холодные эпоксидно-каучуковые покрытия, а также штукатурные гидроизоляции, состоящие из многослойных полимербетонных, полимерцементных покрытий или коллоидных цементных растворов.

При наличии аварийной ситуации, а также для конструкций, находящихся в ограниченно работоспособном состоянии, требуется проведение работ по усилению несущих конструкций. В свою очередь, здесь принципиально возможны два основных варианта усиления: стальной и железобетонный. Назовем недостатки и преимущества каждого из этих вариантов.

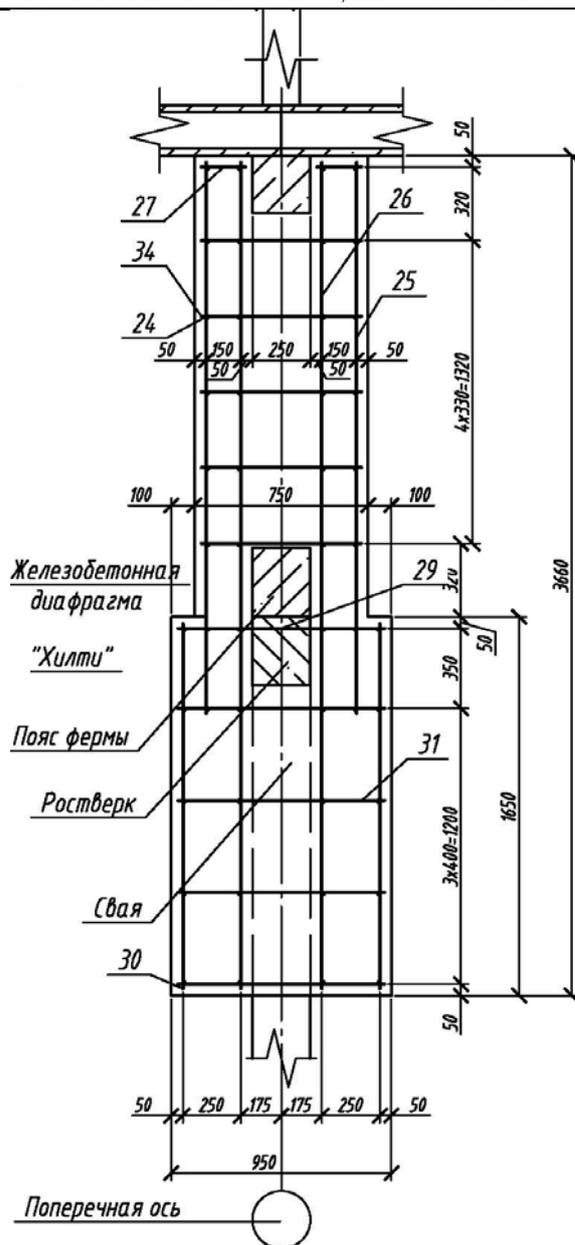


Рис. 3. Вариант усиления железобетонной облоймой

Выводы.

1. Предложены способы профилактики коррозии арматуры и усиления строительных конструкций нулевого цикла для обеспечения безопасности сборных железобетонных общественных зданий.

2. Основными профилактическими мерами защиты от коррозии являются организация процесса вентиляции подвальных помещений и антикоррозионная гидроизоляция железобетонных конструкций с целью герметизации их поверхности.

3. При наличии аварийной ситуации, а также для конструкций, находящихся в ограниченно работоспособном состоянии, требуется проведение работ по усилению несущих конструкций. Разработаны и предложены два основных варианта усиления: стальной и железобетонный. Выбор актуального варианта усиления зависит от конкретного расположения (доступности) аварийной конструкции, а также возможностей заказчика и ремонтной организации.

Список литературы

1. Алексеев, С.Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне / С.Н. Алексеев. – М., 1967.
2. Байков, В.Н. Железобетонные конструкции. Общий курс / В.Н. Байков, Э.Е. Сигалов. – М., 1984.
3. Ершов, И.М. Коррозия арматуры железобетонных опор и бетонных фундаментов опор контактной сети токами утечки с рельсов / И.М. Ершов, В.И. Иванова. – М.: ЦНИИ МПС, 1959.
4. Шеин, А.И. Некоторые причины отказа строительных конструкций / А.И. Шеин, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. – Т. 8, №6. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/88TVN616.pdf> (доступ свободный)
5. Шеин, А.И. Восстановление работоспособности железобетонных карнизных плит в совмещенных крышах / А.И. Шеин, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2016. – №4. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomerazhurnala/no4/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/4.16/at_download/file
6. Шеин, А.И. Влияние конструктивного и эксплуатационного отказов на долговечность строительных конструкций / А.И. Шеин, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №2 (31). – С.64–71.
7. Шеин, А.И. Нормативно-правовые документы и регламенты в обеспечении надёжности зданий и сооружений / А.И. Шеин, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, И.В. Зернов // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3 (32). – С.94–98.
8. Шеин, А.И. Опыт обследования зданий и сооружений / А.И. Шеин, С.В. Бакушев, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2017. – №5. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no5/stroitelnye-konstrukciizdaniya-i-sooruzheniya/5.16/at_download/file
9. Шеин, А.И. Опыт реновации жилого дома без расселения жильцов после отказа некоторых конструктивных элементов / А.И., Шеин В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 2 (35). – С. 76–83.
10. Шеин, А.И. Опыт реконструкции жилого дома после внезапного отказа / А.И. Шеин, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2018. – № 7. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no7/stroitelnyekonstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/7.21/at_download/file
11. Корифельд, Н.А. Защита железобетонных конструкций от коррозии, вызываемой блуждающими токами / Н.А. Корифельд, В.Л. Притула // Бетон и железобетон. – 1969.
12. МГСН 2.08-01. Защита от коррозии бетонных и железобетонных конструкций жилых и общественных зданий. – М., 2001.
13. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения (с 01.03.2004 взамен СНиП 2.03.01-84, СТ СЭВ 1406-78, СНиП II-21-75, СН 511-78). – М., 2003.
14. ГОСТ 31384–2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. – М., 2008.
15. СП 13–102–2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. – М., 2003.
16. СНиП 2.03.01–84*. Бетонные и железобетонные конструкции. – М., 1985.
17. Жуков, Е.М. Коррозия железобетонных конструкций и причины ее возникновения / Е.М. Жуков, Ю.И. Кропотов, И.А. Лугинин, С.И. Полошков, Л.А. Легаева // Молодой ученый. – 2016. – №7. – С. 78–80.

References

1. Alekseev, S.N. Corrosion and protection of armature in concrete / S.N. Alekseev. – M., 1967.
2. Baikov, V.N. Reinforced concrete structures. General course / V.N. Baikov, E.E. Sigalov. – M., 1984.

3. Ershov, I.M. Corrosion of reinforcement for reinforced concrete supports and concrete foundations of contact network supports with leakage currents from rails / I.M. Ershov, V.I. Ivanova. – M.: Central Research Institute of Ministry of Railways, 1959.
4. Shein, A.I. Some causes of failure of building structures / A.I. Shein, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Internet-journal “Science”. – 2016. – Vol. 8, No. 6. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/88TVN616.pdf> (free access)
5. Shein, A.I. Restoration of the performance of reinforced concrete eaves slabs in combined roofs / A.I. Shein, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2016. – №4. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomerazhurnala/no4/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/4.16/at_download/file
6. Shein, A.I. Impact of constructive and operational failures on the durability of building structures / A.I. Shein, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Regional architecture and engineering. – 2017. – №2 (31). – P. 64–71.
7. Shein, A.I. Regulatory documents and regulations in ensuring the reliability of buildings and structures / A.I. Shein, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev, I.V. Grains // Regional architecture and engineering. – 2017. – №3 (32). – P.94–98.
8. Shein, A.I. Experience in surveying buildings and structures / A.I. Shein, S.V. Bakushev, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2017. – №5. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no5/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/5.16/at_download/file
9. Shein, A.I. Experience of renovation of a dwelling house without resettlement of residents after the failure of some structural elements / A.I. Shein, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 2 (35). – P. 76–83.
10. Shein, A.I. Experience in the reconstruction of a residential house after a sudden failure / A.I. Shein, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2018. – № 7. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no7/stroitelnyekonstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/7.21/at_download/file
11. Korifeld, N.A. Protected by reinforced concrete structures against corrosion caused by stray currents / N.A. Korifeld, V.L. Pritula // Concrete and reinforced concrete. – 1969.
12. MGSN 2.08-01. Protection against corrosion of concrete and reinforced concrete structures of residential and public buildings. – M., 2001.
13. SNiP 52-01-2003. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions (from 01.03.2004 replacements of SNiP 2.03.01-84, ST SEV 1406-78, SNiP II-21-75, SN 511-78). – M., 2003.
14. GOST 31384–2008. Protection of concrete and reinforced concrete structures against corrosion. – M., 2008.
15. SP 13-102-2003. Rules for the inspection of supporting building structures of buildings and structures. – M., 2003.
16. SNiP 2.03.01–84*. Concrete and reinforced concrete structures. – M., 1984.
17. Zhukov, E.M. Corrosion of reinforced concrete structures and the reasons for its occurrence / E.M. Zhukov, Yu.I. Kropotov, I.A. Luginin, S.I. Poloshkov, L.A. Legaeva // Young Scientist. – 2016. – №7. – P. 78–80.

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

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

ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВНЕЦЕНТРЕННО НАГРУЖЕННОГО УПРУГОГО СТЕРЖНЯ

С.В. Бакушев

Рассматриваются вопросы определения перемещений в упругих стержнях, находящихся в условиях внецентренного нагружения. Получены расчётные формулы для определения перемещений во внецентренно нагруженных упругих стержнях, один конец которых имеет жёсткое защемление. При этом перемещения точек внецентренно нагруженного стержня в направлении главных осей, перпендикулярных его продольной оси, являются квадратичными функциями продольной координаты, причём для рассматриваемого сечения перемещения всех его точек одинаковы и равны перемещению оси стержня в направлении соответствующей координатной оси. Перемещения точек внецентренно нагруженного стержня в направлении его продольной оси являются линейными функциями декартовых координат рассматриваемой точки, то есть поперечные сечения стержня, плоские до приложения нагрузки, остаются плоскими и после деформации, но поворачиваются вокруг нейтральной оси. Рассмотрен числовой пример. Полученные результаты могут найти применение как при оценке жёсткости внецентренно нагруженных упругих стержней, так и при определении формы стержня и положения его поперечного сечения после деформации.

Ключевые слова: упругий стержень, внецентренное нагружение, перемещения и деформации

DISPLACEMENTS OF NONCENTRAL LOADED ELASTIC ROD

S.V. Bakushev

The work analyses the questions of determination displacements in elastic rods in noncentral load conditions. Calculation formulae are got to determine displacements in noncentral loaded elastic rods, one end of which has rigid fixing. Therein, the displacements of the points of noncentral loaded rod in the direction of main axis, perpendicular to its longitudinal axis, are quadratic functions of longitudinal coordinate, whereas for analyzed cross section the displacements of all its points are the same and equal to the displacements of rod central line in the direction of corresponding coordinate axis. The displacements of points of noncentral loaded rod in the direction of its longitudinal axis are linear functions of cartesian coordinates of the point, that is rod cross sections, flat before loaded, they remain flat after deformation but they turn around zero axis. Numerical illustration has been analyzed. The received results can be applied both at rigidity evaluation of noncentral loaded elastic rods and at determination of rod form and its cross section position after deformation.

Keywords: elastic rod, noncentral load, displacements and deformations

Введение. Классический расчёт внецентренно нагруженных упругих элементов строительных конструкций (стержней) ограничивается определением нормальных напряжений в поперечных сечениях стержня, оценкой его несущей способности и определением области приложения внешней силы, обеспечивающей постоянство знака нормальных напряжений во всех точках поперечного сечения [1]. Изменение формы

упругого внецентренно нагруженного стержня, его деформации и перемещения его точек остаются, вообще говоря, за границами расчёта. Хотя, если решение строится с использованием программно-вычислительных комплексов на базе методов конечных элементов (Лира, SCAD и так далее), то деформации и перемещения внецентренно нагруженного стержня всё же определяются [2]. Не обходятся без определения деформаций и перемещений и работы, связанные с экспериментальными исследованиями внецентренно сжатых стоек [3]. Вопросам теоретического определения поперечных перемещений гибких железобетонных колонн при внецентренном сжатии с учётом геометрической нелинейности посвящена работа [4].

В данной работе сделана попытка найти перемещения точек упругого внецентренно нагруженного стержня аналитически и, следовательно, определить форму стержня и положение его поперечного сечения после деформации.

Построение расчётных соотношений. Рассмотрим прямолинейный упругий стержень, находящийся в условиях внецентренного нагружения под действием силы F , с произвольным поперечным сечением площадью A и главными центральными осями инерции X и Y (осевые моменты инерции обозначим соответственно I_x и I_y) (рис. 1).

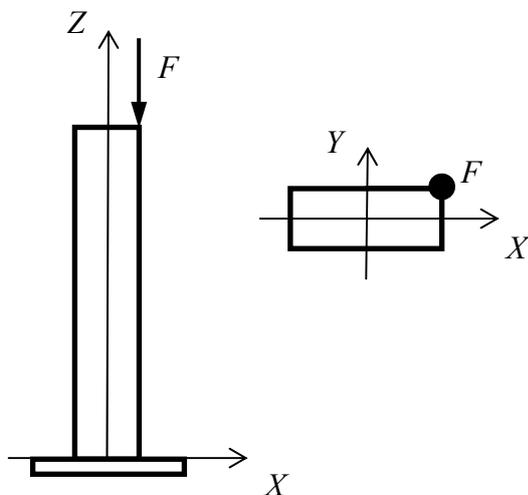


Рис. 1. Стержень, внецентренно нагруженный силой F

По граням выделенного внутри стержня элементарного параллелепипеда с рёбрами, параллельными осям декартовой системы координат X, Y, Z , будет действовать следующая система напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= 0; & \sigma_y &= 0; \\ \sigma_z(x, y) &= \frac{F}{A} + \frac{Fx_0}{I_y}x + \frac{Fy_0}{I_x}y; & (1) \\ \tau_{xy} &= 0; & \tau_{yz} &= 0; & \tau_{zx} &= 0. \end{aligned}$$

Здесь x_0, y_0 – координаты точки приложения силы F .

Линейные и угловые деформации, в соответствии с обобщённым законом Гука, будут определяться соотношениями:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] = -\frac{\mu}{E} \sigma_z; & \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy} = 0; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)] = -\frac{\mu}{E} \sigma_z; & \gamma_{yz} &= \frac{1}{G} \tau_{yz} = 0; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] = \frac{1}{E} \sigma_z; & \gamma_{zx} &= \frac{1}{G} \tau_{zx} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь x_0, y_0 – координаты точки приложения силы F .

Принимая во внимание геометрические соотношения Коши, запишем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= -\frac{\mu}{E} \sigma_z; & \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{\mu}{E} \sigma_z; & \frac{\partial w}{\partial z} &= \frac{1}{E} \sigma_z; \\ \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{\partial v}{\partial y} = 0; & \frac{\partial v}{\partial z} &= \frac{\partial w}{\partial y} = 0; & \frac{\partial w}{\partial x} &= \frac{\partial u}{\partial z} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Интегрируя первую строчку соотношений (3), получаем:

$$\begin{aligned} u &= -\frac{\mu}{E} \int \sigma_z dx + f_1(y, z); \\ v &= -\frac{\mu}{E} \int \sigma_z dy + f_2(z, x); \\ w &= \frac{1}{E} \int \sigma_z dz + f_3(x, y). \end{aligned} \quad (4)$$

С учётом соотношений (1), формулы (4) преобразуются к виду:

$$\begin{aligned} u &= -\frac{\mu}{E} \left[\frac{F}{A} x + \frac{Fx_0}{2I_y} x^2 + \frac{Fy_0}{I_x} xy \right] + f_1(y, z); \\ v &= -\frac{\mu}{E} \left[\frac{F}{A} y + \frac{Fx_0}{I_y} xy + \frac{Fy_0}{2I_x} y^2 \right] + f_2(z, x); \\ w &= \frac{1}{E} \left[\frac{F}{A} z + \frac{Fx_0}{I_y} xz + \frac{Fy_0}{I_x} yz \right] + f_3(x, y). \end{aligned} \quad (5)$$

Подставляя зависимости (5) в формулы второй строки соотношений (3), будем, после элементарных преобразований, иметь систему трёх дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка для определения произвольных функций $f_1(y, z)$; $f_2(z, x)$; $f_3(x, y)$ – «постоянных» интегрирования:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1(y, z)}{\partial y} + \frac{\partial f_2(z, x)}{\partial x} &= \frac{\mu F}{E} \left(\frac{y_0}{I_x} x + \frac{x_0}{I_y} y \right); \\ \frac{\partial f_2(z, x)}{\partial z} + \frac{\partial f_3(x, y)}{\partial y} &= -\frac{Fy_0}{EI_x} z; \\ \frac{\partial f_3(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial f_1(y, z)}{\partial z} &= -\frac{Fx_0}{EI_y} z. \end{aligned} \quad (6)$$

Для определения произвольных функций $f_1(y, z)$; $f_2(z, x)$; $f_3(x, y)$ применим метод исключения [5]. Для этого уравнение (6₁) продифференцируем по «y», а уравнение (6₃) – по «z». В итоге получим:

$$\frac{\partial^2 f_1(y, z)}{\partial y^2} = \frac{\mu Fx_0}{EI_y}; \quad \frac{\partial^2 f_1(y, z)}{\partial z^2} = -\frac{Fx_0}{EI_y}. \quad (7)$$

Далее уравнение (6₁) продифференцируем по «x», а уравнение (6₂) – по «z». В итоге получим:

$$\frac{\partial^2 f_2(z, x)}{\partial x^2} = \frac{\mu Fy_0}{EI_x}; \quad \frac{\partial^2 f_2(z, x)}{\partial z^2} = -\frac{Fy_0}{EI_x}. \quad (8)$$

Наконец, уравнение (6₂) продифференцируем по «y», а уравнение (6₃) – по «x». В итоге получим:

$$\frac{\partial^2 f_3(x, y)}{\partial y^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 f_3(x, y)}{\partial x^2} = 0. \quad (9)$$

Вполне понятно, что общие интегралы систем дифференциальных уравнений (7), (8) и (9) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} f_1(y, z) &= ay + bz + cyz + d + \frac{\mu Fx_0}{2EI_y} y^2 - \frac{Fx_0}{2EI_y} z^2; \\ f_2(z, x) &= ez + fx + kzx + l + \frac{\mu Fy_0}{2EI_x} x^2 - \frac{Fy_0}{2EI_x} z^2; \\ f_3(x, y) &= mx + ny + pxy + r. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь $a, b, c, d, e, f, k, l, m, n, p, r$ – постоянные интегрирования.

Таким образом, произвольные функции $f_1(y, z); f_2(z, x); f_3(x, y)$ выражены через 12 произвольных постоянных.

Запишем формулы (6), используя зависимости (10). После элементарных преобразований получим:

$$\begin{aligned} a + cz + f + kz &= 0; \\ e + kx + n + px &= 0; \\ m + py + b + cy &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Формулы (11) должны выполняться для любых x, y, z . Тогда из соотношений (11) следует: $a = -f, c = -k, e = -n, k = -p, m = -b, p = -c$, то есть $c = -k = -p = p$. Это означает, что $c = k = p = 0$. При этом формулы (10) преобразуются к виду:

$$\begin{aligned} f_1(y, z) &= ay + bz + d + \frac{\mu Fx_0}{2EI_y} y^2 - \frac{Fx_0}{2EI_y} z^2; \\ f_2(z, x) &= ez - ax + l + \frac{\mu Fy_0}{2EI_x} x^2 - \frac{Fy_0}{2EI_x} z^2; \\ f_3(x, y) &= -bx - ey + r. \end{aligned} \quad (12)$$

С учётом выражений (12), перемещения в стержне – формулы (5) – получают вид:

$$\begin{aligned} u &= -\frac{\mu}{E} \left[\frac{F}{A} x + \frac{Fx_0}{2I_y} x^2 + \frac{Fy_0}{I_x} xy \right] + ay + bz + d + \frac{\mu Fx_0}{2EI_y} y^2 - \frac{Fx_0}{2EI_y} z^2; \\ v &= -\frac{\mu}{E} \left[\frac{F}{A} y + \frac{Fx_0}{I_y} xy + \frac{Fy_0}{2I_x} y^2 \right] + ez - ax + l + \frac{\mu Fy_0}{2EI_x} x^2 - \frac{Fy_0}{2EI_x} z^2; \\ w &= \frac{1}{E} \left[\frac{F}{A} z + \frac{Fx_0}{I_y} xz + \frac{Fy_0}{I_x} yz \right] - bx - ey + r. \end{aligned} \quad (13)$$

Постоянные a, b, d, e, l, r найдём из условий жёсткого закрепления стержня на его нижнем конце, то есть при $z = 0$ имеем:

а) $w = 0, v = 0, u = 0$ – перемещения равны нулю;

б) $\frac{\partial u}{\partial z} = 0, \frac{\partial v}{\partial z} = 0$ – повороты поперечного сечения вокруг осей X и Y равны нулю;

в) $\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0$ – поворот вокруг оси Z равен нулю.

Условия закрепления стержня приводят, таким образом, к соотношениям:

$$w = -bx - ey + r = 0;$$

$$v = -\frac{\mu}{E} \left[\frac{F}{A} y + \frac{Fx_0}{I_y} xy + \frac{Fy_0}{2I_x} y^2 \right] - ax + l + \frac{\mu Fy_0}{2EI_x} x^2 = 0;$$

$$u = -\frac{\mu}{E} \left[\frac{F}{A} x + \frac{Fx_0}{2I_y} x^2 + \frac{Fy_0}{I_x} xy \right] + ay + d + \frac{\mu Fx_0}{2EI_y} y^2 = 0;$$

(14)

$$\frac{\partial u}{\partial z} = b = 0;$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = e = 0;$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\mu Fy_0}{EI_y} x + a + \frac{\mu Fx_0}{EI_y} y = \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{\mu Fx_0}{EI_y} y - a + \frac{\mu Fy_0}{EI_x} x = 0.$$

Решив систему алгебраических уравнений (14), найдём:

$$b = 0, \quad e = 0, \quad r = 0, \quad a = \frac{\mu Fy_0}{EI_x} x - \frac{\mu Fx_0}{EI_y} y;$$

$$l = \frac{\mu Fy_0}{EI_x} x^2 - \frac{\mu Fx_0}{EI_y} y - \frac{\mu Fy_0}{2EI_x} x^2 + \frac{\mu}{E} \left[\frac{F}{A} y + \frac{Fx_0}{I_y} xy + \frac{Fy_0}{2I_x} y^2 \right];$$

(15)

$$d = -\frac{\mu Fy_0}{EI_x} xy + \frac{\mu Fx_0}{EI_y} y^2 - \frac{\mu Fx_0}{2EI_y} y^2 + \frac{\mu}{E} \left[\frac{F}{A} x + \frac{Fx_0}{2I_y} x^2 + \frac{Fy_0}{I_y} xy \right].$$

Подставив (15) в уравнения (13), получим окончательные формулы для перемещения точек внецентренно нагруженного упругого стержня:

$$u = -\frac{Fx_0}{2EI_y} z^2; \quad v = -\frac{Fy_0}{2EI_x} z^2;$$

(16)

$$w = \frac{F}{E} z \left[\frac{1}{A} + \frac{x_0}{I_y} x + \frac{y_0}{I_x} y \right].$$

Таким образом, перемещения точек внецентренно нагруженного стержня в направлении осей X и Y являются квадратичными функциями координаты z , причём для сжимающей силы F перемещения в направлении осей X и Y положительны, для растягивающей силы F перемещения в направлении осей X и Y отрицательны. При этом перемещения в направлении осей X и Y не зависят от текущих координат x и y рассматриваемой точки, то есть все точки рассматриваемого поперечного сечения до деформации $z = z_0$ перемещаются в направлении осей X и Y на одни и те же расстояния соответственно. Перемещения точек внецентренно нагруженного стержня в направлении оси Z являются линейными функциями координат x, y, z . Это означает, что поперечные сечения стержня, плоские до приложения нагрузки, остаются плоскими и после деформации, но, возможно, поворачиваются.

Пример. В качестве примера найдём форму внецентренно сжатого стержня с прямоугольным поперечным сечением, а также положение его поперечного сечения после деформации (см. рис. 1). Пусть длина стержня $l = 3$ м, размеры поперечного сечения: $b = 51$ см, $h = 25$ см. Точка приложения сжимающей силы имеет координаты: $x_0 = 20$ см, $y_0 = 10$ см. Стержень выполнен из полнотелого глиняного кирпича

на цементно-песчаном растворе. Согласно СП 15.13330.2012, расчётное сопротивление кирпичной кладки на сжатие принимаем равным $R^{(-)} = 4$ МПа, на растяжение $R^{(+)} = 0,2$ МПа; начальный модуль упругости при сжатии $E^{(-)} = 4000$ МПа, при растяжении $E^{(+)} = 200$ МПа [6].

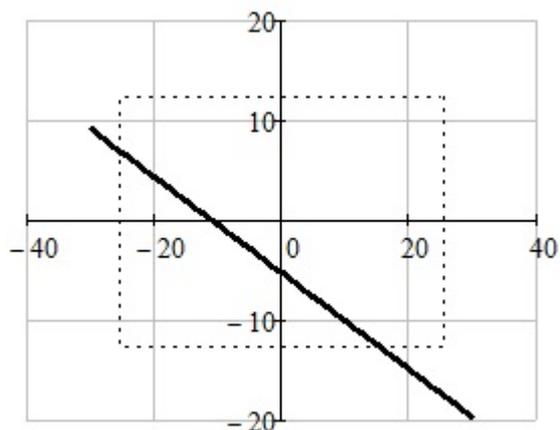


Рис. 2. Нейтральная линия

Нейтральная линия отсекает на осях координат отрезки $ax = -10,838$ см; $ay = -5,208$ см. Положение нейтральной линии по отношению к поперечному сечению стержня показано на рис. 2. Таким образом, треугольная часть поперечного сечения слева и вниз от нейтральной линии находится в условиях растяжения; область поперечного сечения выше нейтральной линии — в условиях сжатия. Несущая способность стержня по сжатой зоне $F^{(-)} = 82,434$ кН, по растянутой зоне $F^{(+)} = 6,091$ кН. Следовательно, в качестве расчётной принимаем несущую

способность стержня, вычисленную по растянутой зоне поперечного сечения: $F^p = F^{(+)} = 6,091$ кН.

В результате действия нагрузки стержень искривляется. На рис. 3 показаны перемещения точек продольной оси стержня в направлении осей X и Y (все размеры даны в сантиметрах), построенные по формулам (16).

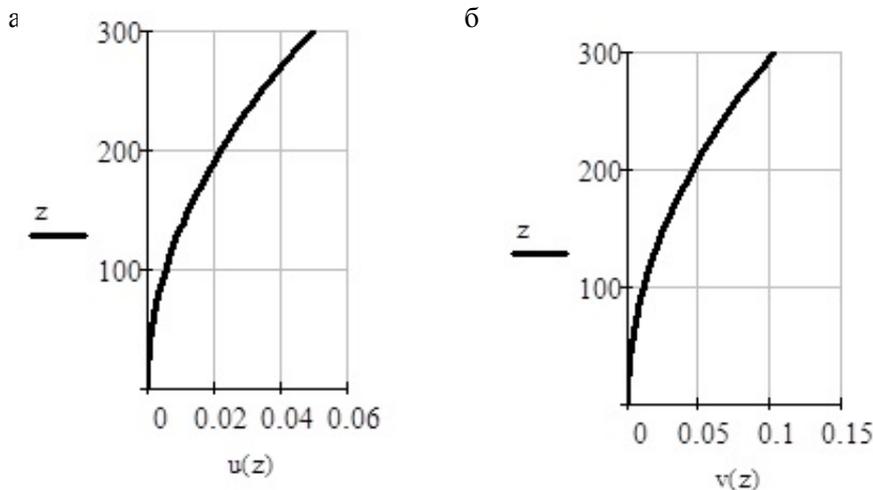


Рис. 3. Перемещения точек продольной оси стержня:
а — в направлении оси X ; б — в направлении оси Y

Для определения положения поперечного сечения стержня найдём перемещения угловых точек и центра верхнего поперечного сечения, а также точек пересечения нейтральной линии с осями координат X и Y при $z = l = 3$ м в направлении оси Z :

$$\begin{aligned} x = 25,5 \text{ см}; \quad y = 12,5 \text{ см}; \quad w(x, y, z) = -0,022 \text{ см}; \\ x = -25,5 \text{ см}; \quad y = 12,5 \text{ см}; \quad w(x, y, z) = -5,636 \cdot 10^{-3} \text{ см}; \\ x = -25,5 \text{ см}; \quad y = -12,5 \text{ см}; \quad w(x, y, z) = 0,015 \text{ см}; \end{aligned}$$

$$x = 25,5 \text{ см}; \quad y = -12,5 \text{ см}; \quad w(x, y, z) = -1,529 \cdot 10^{-3} \text{ см};$$

$$x = 0,0 \text{ см}; \quad y = 0,0 \text{ см}; \quad w(x, y, z) = -3,583 \cdot 10^{-3} \text{ см};$$

$$x = ax; \quad y = 0 \text{ см}; \quad w(x, y, z) = 0 \text{ см};$$

$$x = 0 \text{ см}; \quad y = ay; \quad w(x, y, z) = 0 \text{ см}.$$

Таким образом, поперечное сечение стержня, оставаясь плоским, поворачивается вокруг нейтральной оси.

Заключение и выводы. Полученные результаты могут найти применение при оценке жёсткости внецентренно нагруженных упругих стержней, в частности колонн и стоек промышленных цехов с крановым оборудованием, необходимой для обеспечения их долговечности и надёжной работы.

Список литературы

1. Александров, А.В. Соппротивление материалов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин. – 3-е изд. – М.: Высшая шк., 2003. – 560 с.
2. Маткурбанов, Н.И. Определение напряжений при внецентренном растяжении (сжатии) в несимметричных сечениях / Н.И. Маткурбанов, А.В. Швецов, Б.А. Тухфатуллин, Л.Е. Путеева // Избранные доклады 62-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых учёных: сб. – Томск: Томский ГАСУ, 2016. – С. 67–72.
3. Бузало, Н.А. Экспериментальное исследование напряжённо-деформированного состояния внецентренно сжатых стоек с повреждениями / Н.А. Бузало, И.В. Гонтаренко // Науковедение: интернет-журнал. – 2014. – № 1 (20). – С. 56.
4. Обозов, В.И. Нелинейный изгиб железобетонных гибких колонн при внецентренном сжатии / В.И. Обозов, Х.А. Эль-Тохари // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2007. – № 2. – С. 33–36.
5. Тимошенко, С.П. Теория упругости: пер. с англ. / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер; под ред. Г.С.Шапиро. – 2-е изд. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.
6. СП 15.13330.2012. Свод правил. Каменные и армокаменные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22-81*.

References

1. Aleksandrov, A.V. Strength of materials / A.V. Aleksandrov, V.D. Potapov, B.P. Derzhavin. – 3 edition. – M.: Vysshaya shk., 2003. – 560 p.
2. Makturbanov, N.I. Stress calculation at noncentral extension (compression) at anti-symmetric cross section / N.I. Makturbanov, A.V. Shvetzov, B.A. Tukhfatullin, L.E. Puteeva // Selected reports of 62nd university scientific technical conference of students and young scientists: collection. – Tomsk: Tomsk GASU, 2016. – P. 67–72.
3. Buzalo, N.A. Experimental research of stress strain state of noncentral compressed strut with damage / N.A. Buzalo, I.V. Gontarenko // Science studies: Internet magazine. – 2014. – N1(20). – P. 56.
4. Obozov, V.I. Nonlinear curving of reinforced-concrete slender column at noncentral compression / V.I. Obozov, Kh.A. El-Tokhari // Earthquake resistant construction. Structure safety. – 2007. – N 2. – P. 33–36.
5. Timoshenko, S.P. Elasticity theory: translation from English / S.P. Timoshenko, G. Gudier; edited by G.S. Shapiro. – 2nd editon. – M.: Nauka. Main offise of physics and mathematics literature, 1979. – 560 p.
6. SP 15.13330.2012. Code specification. Stone and reinforced brickworks. Revised edition SNiP II-22-81.

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

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

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

С.В. Бакушев

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

Ключевые слова: сплошная среда, плоская деформация, дифференциальные уравнения равновесия, билинейные замыкающие уравнения, геометрически линейная модель

DIFFERENTIAL EQUATIONS OF SOLID ENVIRONMENT EQUILIBRIUM FOR FLAT DEFORMATION IN CARTESIAN COORDINATES AT BILINEAR APPROXIMATION OF TRAILING EQUATIONS (geometrically linear model)

S.V. Bakushev

The issues of constructing differential equations of equilibrium in displacements for flat deformation of solid medium at bilinear approximation of trailing equations without taking into account geometrical non-linearity in the Cartesian coordinate system. Assuming independence of volumetric and shear deformation diagrams, six major cases of physical dependency, dependent on

the relative position of fracture points of bilinear charts of volumetric and shift deformation are studied. Building bilinear physical dependencies is based on the computation of secant modulus of volumetric and shear deformation. While on the first phase of the diagrams the secant modulus of volumetric and landslides deformation is constant, while on the second phase of diagrams the secant module of volumetric deformation is a function of volumetric deformation, and secant shear modulus is a shear deformation intensity function. Substituting the corresponding bilinear physical equations in differential equations of solid medium equilibrium recorded without taking into account geometrical non-linearity obtained allow differential equations of equilibrium in movements for two-dimensional strain in the Cartesian coordinate system. The obtained differential equations of equilibrium movement could be applied in determining the stress-strain State of solid medium under the flat deformation without considering geometric nonlinearity physical equations for which bilinear functions are approximated.

Keywords: solid medium, flat deformation, differential equations of equilibrium, trailing bilinear equations, geometrically linear model

Введение. Точное математическое описание зависимостей между напряжениями и деформациями для геометрически линейных нелинейно-упругих тел является одним из наиболее важных факторов, определяющих адекватное описание механического поведения строительных конструкций. Для нелинейно-упругих тел и конструкций, находящихся в условиях сложного напряжённо-деформированного состояния, зависимости между напряжениями и деформациями для геометрически линейных моделей описываются при помощи диаграмм объёмного и сдвигового деформирования.

Моделирование механического поведения твёрдых деформируемых тел, находящихся в условиях сложного напряжённого и деформированного состояния, основано на математических моделях, описывающих объёмное и сдвиговое деформирование соответствующего материала. Построение математических моделей является нетривиальной задачей, основанной на экспериментальных данных и усугубляемой тем, что разные тела из того или иного материала по-разному реагируют на внешние силовые воздействия. Обзор некоторых математических моделей, описывающих механическое поведение сплошных сред и разработанных во второй половине XX столетия (Сетх, Синьорини, Мурнаган, Джон, Блейтц и Ко), дан в работе А.И. Лурье [1]. К этому же периоду следует отнести математические модели сплошных сред, предложенные проф. Г.А. Гениевым, для описания механического поведения сыпучих сред и грунтовых массивов [2], бетона и железобетона [3].

Разработка математических моделей сплошных сред продолжается и в настоящее время. Так, для расчёта железобетонных конструкций получили распространение математические модели Н.И.Карпенко [4]. Развиваются идеи Карпенко Н.И. об установлении общих физических соотношений в виде связей между приращениями компонент тензоров напряжений и деформаций [5]. Обзор математических моделей, описывающих диаграммы деформирования железобетона, а также предъявляемые к диаграммам требования приведены в работе [6].

Моделирование механического поведения сыпучих сред и разнопрочных материалов с построением моделей смешанного типа, описывающих течение сыпучих материалов при наличии застойных зон квазистатического деформирования, представлено в монографии [7].

В статье [8] рассматривается математическая модель сплошной среды на основе фактической корпускулярной структуры вещества, между частицами которой в результате деформации появляются как силы притяжения (при растяжении), так и силы отталкивания (при сжатии), существенно отличающиеся от классических внутренних сил, возникающих при деформации тела и не оказывающих никакого влияния непосредственно на деформации. Автор вводит понятие деформационного напряжённого состояния (теория DSS) в рамках теории упругости. Эта теория образует основу для разработки теории «недостаточности», позволяющей надёжно определять запас прочности нагруженного тела.

Метод построения определяющих соотношений для изотропного твёрдого тела, при котором не требуется традиционного априорного постулирования их математического вида или вида энергетических функций, из которых эти соотношения следуют,

рассматривается в работе [9]. Установлены определяющие тензорно нелинейные соотношения, адекватно описывающие нелинейные эффекты при деформировании твёрдых тел. Отмечены особенности получения замкнутой системы разрешающих уравнений, учитывающие специфику определения тензора логарифмических деформаций, через который выражен закон состояния.

Кинематический вариационный принцип, согласно которому общий вид функционала энергии для исследуемой среды находится по заданным кинематическим связям различной сложности, используется в работе [10] для построения корректных математических моделей – определяющих и разрешающих уравнений, и граничных условий – для континуальных сред с микроструктурой. В работе [11] представлены разработанные на основе метода наименьших квадратов методы приближения нелинейных диаграмм деформирования полимеров и композитов, а также построенные математические модели нелинейно-упругого деформирования изотропной и армированной балок. В статье [12] на основе экспериментальных диаграмм упругопластического деформирования рассматривается новый численный метод оценки параметров математической модели, заключающийся в последовательном среднеквадратичном оценивании коэффициентов двух линейных регрессионных моделей. В работе [13] представлена разработка нелинейных физических соотношений для составных многофазных нелинейно-упругих стержней. В основе теории лежит аппроксимация целыми рациональными полиномами произвольной степени диаграмм деформирования фазовых материалов.

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

В данной работе рассматривается построение дифференциальных уравнений равновесия в перемещениях сплошной среды в декартовых координатах. Сплошная среда, описываемая без учёта геометрической нелинейности, находится в условиях плоской деформации. Замыкающие уравнения при этом аппроксимируются билинейными функциями.

Построение физических уравнений. В данной работе представлено построение дифференциальных уравнений равновесия в перемещениях в декартовых координатах для случая плоского деформирования сплошной среды $u = u(x, y)$, $v = v(x, y)$, $w = 0$ при аппроксимации замыкающих уравнений произвольной формы билинейными функциями без учёта геометрической нелинейности (рис. 1 и 2).

В соответствии с рис. 1 и 2 текущие модули объёмного расширения (сжатия) $K = K(\varepsilon, \Gamma)$ и сдвига $G = G(\varepsilon, \Gamma)$ без учёта геометрической нелинейности на первом прямолинейном участке диаграмм $\sigma \approx \varepsilon$ и $T \approx \Gamma$ будут определяться выражениями:

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

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

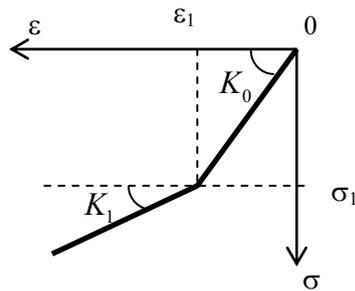

 Рис. 1. Диаграмма $\sigma \approx \varepsilon$

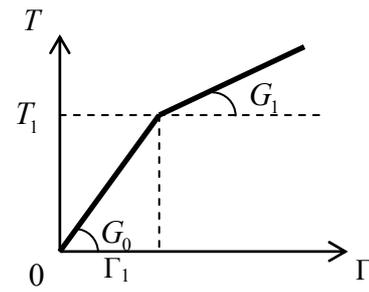
 Figure 1. Chart $\sigma \approx \varepsilon$

 Рис. 2. Диаграмма $T \approx \Gamma$

 Figure 2. Chart $T \approx \Gamma$

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

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

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

Здесь K_0 – начальный модуль объёмного расширения (сжатия); G_0 – начальный модуль сдвига; K_1 – модуль упрочнения при объёмном расширении (сжатии); G_1 – модуль упрочнения при сдвиге; σ – первый инвариант тензора напряжений; ε – первый инвариант тензора деформаций; T – интенсивность касательных напряжений; Γ – интенсивность деформаций сдвига.

Поскольку построение билинейных диаграмм объёмного и сдвигового деформирования выполняется, вообще говоря, независимо друг от друга, а при плоской деформации в декартовых координатах $\varepsilon = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}$ и

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \frac{3}{2} \varepsilon_{xy}^2},$$

то установить связь между точками излома билинейных диаграмм $\sigma \approx \varepsilon$ и $T \approx \Gamma$ в явном виде не представляется возможным.

Здесь $\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}$; $\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}$; $\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$, причём

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

Рассмотрим шесть основных случаев физических зависимостей.

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

Точки излома билинейных диаграмм не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| < \Gamma_1$. При этом $0 \leq |\varepsilon| \leq |\varepsilon_1|$ и $0 \leq \Gamma \leq \Gamma_0 < \Gamma_1$. Здесь интенсивности Γ_0 соответствуют такие компоненты деформации, что $|\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}| = |\varepsilon_1|$.

Точки излома билинейных диаграмм не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| > \Gamma_1$. При этом $0 \leq |\varepsilon| \leq \varepsilon_0 < \varepsilon_1$ и $0 \leq \Gamma \leq \Gamma_1$. Здесь объёмной деформации ε_0 соответствуют такие компоненты деформации, что $\sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \frac{3}{2} \varepsilon_{xy}^2} = \Gamma_1$.

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

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

Случай 2: $K_0 \neq K_1$, $G_0 \neq G_1$. Точки излома билинейных диаграмм не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| < \Gamma_1$. При этом $|\varepsilon_1| \leq |\varepsilon| \leq \varepsilon_0$ и $\Gamma_0 \leq \Gamma \leq \Gamma_1$. Здесь объёмной деформации ε_0 соответствуют такие компоненты деформации, что $\sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \frac{3}{2} \varepsilon_{xy}^2} = \Gamma_1$, а интенсивности Γ_0 соответствуют такие компоненты деформации, что $|\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}| = |\varepsilon_1|$.

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

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

Случай 3: $K_0 \neq K_1$, $G_0 \neq G_1$. Точки излома билинейных диаграмм не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| > \Gamma_1$. При этом $|\varepsilon_0| \leq |\varepsilon| \leq |\varepsilon_1|$ и $\Gamma_1 \leq \Gamma \leq \Gamma_0$. Здесь объёмной деформации ε_0 соответствуют такие компоненты деформации, что $\sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \frac{3}{2} \varepsilon_{xy}^2} = \Gamma_1$, а интенсивности Γ_0 соответствуют такие компоненты деформации, что $|\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}| = |\varepsilon_1|$.

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

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

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

Точки излома билинейных диаграмм не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| < \Gamma_1$. При этом $|\varepsilon| \geq |\varepsilon_0|$ и $\Gamma \geq \Gamma_1$. Здесь объёмной деформации ε_0 соответствуют такие компоненты деформации, что $\sqrt{\frac{2}{3} \left[(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \frac{3}{2} \varepsilon_{xy}^2 \right]} = \Gamma_1$.

Точки излома билинейных диаграмм не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| > \Gamma_1$. При этом $|\varepsilon| \geq |\varepsilon_1|$ и $\Gamma \geq \Gamma_0$. Здесь интенсивности Γ_0 соответствуют такие компоненты деформации, что $|\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}| = |\varepsilon_1|$.

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

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

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

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

Построение дифференциальных уравнений. Подставив физические уравнения (5) – (8) в дифференциальные уравнения равновесия плоской деформации сплошной среды в декартовых координатах:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + F_x = 0; \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + F_y = 0, \end{cases} \quad (9)$$

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

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

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

1. Для физических уравнений (5) получим:

$$\begin{aligned} A_1 = \frac{1}{3}K_0 + \frac{4}{3}G_0; \quad B_1 = G_0; \quad C_1 = 0; \quad D_1 = 0; \quad E_1 = 0; \quad F_1 = \frac{1}{3}K_0 + \frac{1}{3}G_0, \\ A_2 = 0; \quad B_2 = 0; \quad C_2 = \frac{1}{3}K_0 + \frac{1}{3}G_0; \quad D_2 = G_0; \quad E_2 = \frac{1}{3}K_0 + \frac{4}{3}G_0; \quad F_2 = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

2. Для физических уравнений (6):

$$\begin{aligned} A_1 = \frac{1}{3}K_1 + \frac{4}{3}G_0; \quad B_1 = G_0; \quad C_1 = 0; \quad D_1 = 0; \quad E_1 = 0; \quad F_1 = \frac{1}{3}K_1 + \frac{1}{3}G_0, \\ A_2 = 0; \quad B_2 = 0; \quad C_2 = \frac{1}{3}K_1 + \frac{1}{3}G_0; \quad D_2 = G_0; \quad E_2 = \frac{1}{3}K_1 + \frac{4}{3}G_0; \quad F_2 = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

3. Для физических уравнений (7):

$$\begin{aligned} A_1 = \frac{1}{3}K_0 + \frac{4}{3}G_1 + \frac{4}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma} - \frac{4}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon \right) (2\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}); \\ B_1 = G_1 + (G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma} - (G_0 - G_1) \varepsilon_{xy}^2 \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3}; \\ C_1 = -2(G_0 - G_1) \varepsilon_{xy} \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon \right) - \frac{2}{3}(G_0 - G_1) \varepsilon_{xy} \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} (2\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}); \\ D_1 = -2(G_0 - G_1) \varepsilon_{xy} \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon \right); \\ E_1 = -\frac{2}{3}(G_0 - G_1) \varepsilon_{xy} \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} (2\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx}); \\ F_1 = \frac{1}{3}K_0 + \frac{1}{3}G_1 + \frac{1}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma} - (G_0 - G_1) \varepsilon_{xy}^2 \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} - \\ - \frac{4}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon \right) (2\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx}); \end{aligned} \quad (13)$$

$$A_2 = -\frac{2}{3}(G_0 - G_1)\varepsilon_{xy} \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} (2\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy});$$

$$B_2 = -2(G_0 - G_1)\varepsilon_{xy} \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon \right);$$

$$C_2 = \frac{1}{3}K_0 + \frac{1}{3}G_1 + \frac{1}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma} - (G_0 - G_1)\varepsilon_{xy}^2 \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} - \\ - \frac{4}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon \right) (2\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy});$$

$$D_2 = G_1 + (G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma} - (G_0 - G_1)\varepsilon_{xy}^2 \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3};$$

$$E_2 = \frac{1}{3}K_0 + \frac{4}{3}G_1 + \frac{4}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma} - \frac{4}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon \right) (2\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx});$$

$$F_2 = -2(G_0 - G_1)\varepsilon_{xy} \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon \right) - \frac{2}{3}(G_0 - G_1)\varepsilon_{xy} \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} (2\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx}).$$

4. Для физических уравнений (8):

$$A_1 = \frac{1}{3}K_1 + \frac{4}{3}G_1 + \frac{4}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma} - \frac{4}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon \right) (2\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy});$$

$$B_1 = G_1 + (G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma} - (G_0 - G_1)\varepsilon_{xy}^2 \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3};$$

$$C_1 = -2(G_0 - G_1)\varepsilon_{xy} \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon \right) - \frac{2}{3}(G_0 - G_1)\varepsilon_{xy} \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} (2\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy});$$

$$D_1 = -2(G_0 - G_1)\varepsilon_{xy} \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon \right);$$

$$E_1 = -\frac{2}{3}(G_0 - G_1)\varepsilon_{xy} \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} (2\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx});$$

$$F_1 = \frac{1}{3}K_1 + \frac{1}{3}G_1 + \frac{1}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma} - (G_0 - G_1)\varepsilon_{xy}^2 \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} - \\ - \frac{4}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon \right) (2\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx}); \quad (14)$$

$$A_2 = -\frac{2}{3}(G_0 - G_1)\varepsilon_{xy} \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} (2\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy});$$

$$B_2 = -2(G_0 - G_1)\varepsilon_{xy} \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon \right);$$

$$C_2 = \frac{1}{3}K_1 + \frac{1}{3}G_1 + \frac{1}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma} - (G_0 - G_1)\varepsilon_{xy}^2 \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} - \\ - \frac{4}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon \right) (2\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy});$$

$$D_2 = G_1 + (G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma} - (G_0 - G_1)\varepsilon_{xy}^2 \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3};$$

$$E_2 = \frac{1}{3}K_1 + \frac{4}{3}G_1 + \frac{4}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma} - \frac{4}{3}(G_0 - G_1) \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon \right) (2\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx});$$

$$F_2 = -2(G_0 - G_1)\varepsilon_{xy} \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon \right) - \frac{2}{3}(G_0 - G_1)\varepsilon_{xy} \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} (2\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx}).$$

В формулах (11) – (14)

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \frac{3}{2} \varepsilon_{xy}^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2}.$$

Таким образом, дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях для плоской деформации сплошной среды в декартовых координатах при билинейной аппроксимации физических соотношений без учёта геометрической нелинейности построены.

Заключение. Полученные дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях в декартовых координатах могут быть использованы при определении напряжённо-деформированного состояния сплошных сред, которые находятся в условиях плоской деформации без учёта геометрической нелинейности и физические соотношения для которых аппроксимированы билинейными функциями.

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

Список литературы.

1. Лурье, А.И. Нелинейная теория упругости / А.И. Лурье. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
2. Гениев, Г.А. К вопросу о деформационной теории пластичности сыпучей среды / Г.А. Гениев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1974. – №4. – С.8–10.
3. Гениев, Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г.А. Гениев, В.Н. Киссюк, Г.А. Тюпин. – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с.
4. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
5. Карпенко, Н.И. О формировании физических соотношений для бетонных элементов при объёмном напряжённом состоянии в приращениях / Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко // Жилищное строительство. – 2015. – № 3. – С. 10–13.
6. Каверина, О.В. Способы описания диаграмм деформирования бетона / О.В. Каверина, А.А. Крючков // Современный учёный. – 2016. – № 2. – С. 38–40.
7. Садовская, О.В. Математическое моделирование в задачах механики сыпучих сред: монография / О.В. Садовская, В.М. Садовский. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
8. Skokánek, J. Deformation Stress State of Elastic Bodies /. J. Skokánek // Acta Polytechnica. – 2005. – № 45(1).
9. Панов, А.Д. Теория определяющих соотношений при деформировании изотропного твёрдого тела / А.Д. Панов // Известия Российской академии наук. Механика твёрдого тела. – 2004. – № 6. – С. 27.
10. Лурье, С.А. Вариационная формулировка математических моделей сред с микроструктурами / С.А. Лурье, П.А. Белов // Вестник Пермского государственного технического университета. Математическое моделирование систем и процессов. – 2006. – № 14. – С. 114–132.
11. Семисалов, Б.В. Разработка методов приближения диаграмм деформирования полимеров и композитов и математических моделей на основе таких приближений / Б.В. Семисалов, С.К. Голушко, Е.В. Амелина // Климат-2018: Вопросы прогнозирования коррозии, старения и биоповреждения материалов: сб. / III Всероссийская научно-техническая конференция. – 2018. – С. 313–330.
12. Зотеев, В.Е. Применение методов нелинейной регрессии при построении математической модели упругопластического деформирования / В.Е. Зотеев, Е.В. Небо-

гина, Я.В. Бербасов // Материалы X Всероссийской конференции по механике деформируемого твёрдого тела: сб. – 2017. – С. 255–258.

13. Мищенко, А.В. Расчётная модель нелинейного динамического деформирования составных многофазных стержней / А.В. Мищенко // Вестник МГСУ. – 2014. – № 5. – С. 35–43.

References

1. Lurie, A.I. Nonlinear Theory of elasticity / A.I. Lurie. – М.: Nauka, 1980. – 512 p.
2. Geniev, G.A. About the question of the deformation theory of plasticity of granular medium / G.A. Geniev // Building mechanics and Structural analysis. – 1974. – No.4. – P. 8–10.
3. Geniev, G.A. Plasticity theory of concrete and iron-concrete / G.A. Geniev, V.N. Kissyuk, G.A. Tyupin. – М.: Stroizdat, 1974. – 316 p.
4. Karpenko, N.I. General models of iron-concrete mechanics / N.I. Karpenko. – М.: Stroizdat, 1996. – 416 p.
5. Karpenko, N.I. On the formation of physical proportions for concrete elements at volume stressful position in increments / N.I. Karpenko, S.N. Karpenko // Housing construction. – 2015. – N3. – P. 10–13.
6. Kaverina, O.V. How to describe the diagram of concrete / O.V. Kaverina, A.A. Krushkov // Modern scholar. – 2016. – N2. – P. 38–40.
7. Sadovskaya, O.V. Mathematical modeling in loose medium mechanics problems: monograph / O.V. Sadovskaya, V.M. Sadovskii. – М.: Fizmatlit, 2008. – 368 p.
8. Skokánek, J. Deformation Stress State of Elastic Bodies / J. Skokánek // Acta Polytechnica. – 2005. – N 45(1).
9. Panov, A.D. Theory of defining relations with deformation isotropic solid / A.D. Panov // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Rigid body mechanics. – 2004. – N6. – P.27.
10. Lurie, S.A. Variational formulation of mathematical models Wednesday with microstructures / S.A., Lurie P.A. Belov // Bulletin of the Perm State Technical University. Mathematical modeling of systems and processes. – 2006. – N14. – P. 114–132.
11. Semisalov, B.V. Developing of methods of diagram approximation of polymers, composites and mathematic models straining on the basis of such approximations / B.V. Semisalov, S.K. Golushko, E.V. Amelina // Climate-2018: Predictability problems of corrosion, ageing and bio deterioration of materials: collection / III All-Russian scientific technical conference. – 2018. – P. 313–330.
12. Zoteev V.E., Nebogina E.V., Berbasov J.V. Application of nonlinear regression methods when building mathematical model of elastic-plastic deformation / V.E. Zoteev, E.V. Nebogina, J.V. Berbasov // Materials X all-Russia Conference on the mechanics of deformable solid body: collection. – 2017. – P. 255–258.
13. Mishenko, A.V. Method of formation of nonlinear physical correlation in direct and inverse problem calculation of multiphase bars / A.V. Mishenko // Vestnik of South-Urals state university. Series: Construction and architecture. – 2014. – V. 14, N 3. – P. 12–16.

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

ВЫБОР КОНСТРУКЦИЙ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ С УЧЕТОМ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

А.М. Береговой, В.А. Береговой

Исследована теплопроводность однородного неорганического материала наружной стены при периодических температурно-влажностных и агрессивных условиях эксплуатации, а также во время периода резкого похолодания. В процессе натурных обследований тепловой защиты многоэтажных зданий выявлено периодическое выпадение конденсационной влаги на внутренней поверхности наружных стен в помещениях с недостаточным воздухообменом. Результаты моделирования теплопроводности увлажненного и промерзшего материала стены в условиях агрессивных воздействий указали на возможность повышения тепловых потерь через нее в 1,3–1,7 раза по сравнению с нормативным значением.

Ключевые слова: наружное ограждение, теплопроводность материала, энергосбережение, влажный режим эксплуатации, воздухообмен помещений, агрессивные воздействия

SELECTION OF EXTERNAL ENCLOSURES TAKING INTO ACCOUNT ENERGY SAVING IN CONDITIONS OF AGGRESSIVE EFFECTS OF THE ENVIRONMENT

A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy

The thermal conductivity of the external wall material was studied in periodic temperature-humidity and aggressive operating conditions, as well as during the period of coldness. In the course of on-site inspections of thermal protection of multi-storey buildings periodic precipitation of condensation moisture on the internal surface of external walls in rooms with insufficient air exchange was detected. The results of modeling the total value of thermal conductivity of the wetted and frozen wall material of masonry in aggressive conditions indicated the possibility of increasing heat losses by 1.3–1.7 times compared with the standard value.

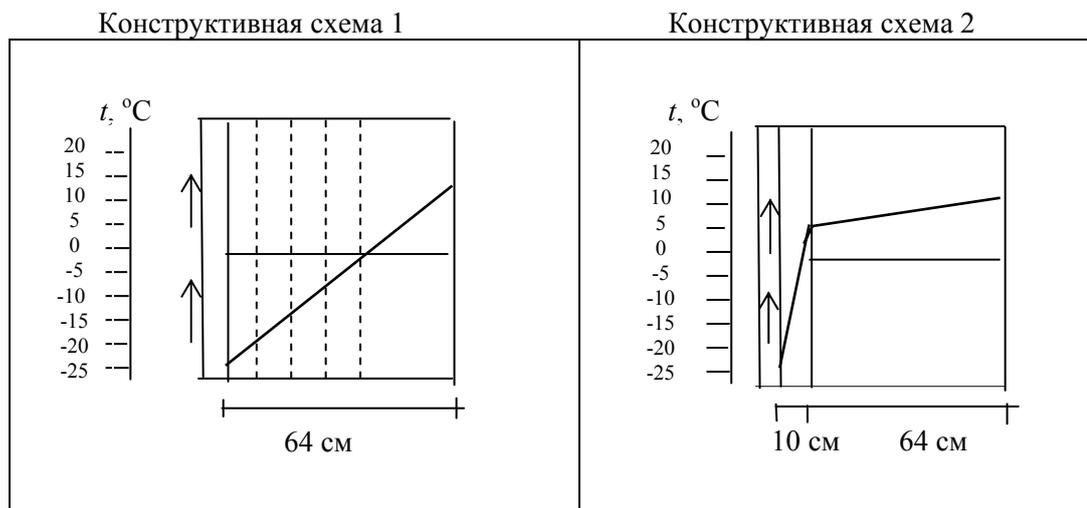
Keywords: external enclosure, material thermal conductivity, energy saving, wet mode of operation, indoor air exchange, aggressive effects

Важнейшим теплотехническим свойством, во многом определяющим энергоэффективность ограждающей конструкции, является теплопроводность ее материала. На теплопроводность, помимо таких факторов, как плотность, структура материала,

влияет и его влагосодержание. В нормах по тепловой защите зданий влияние влажностного режима на теплопроводность материала ограждения рассматривается при неизменных условиях эксплуатации А или Б [1]. Однако в процессе эксплуатации наружная оболочка зданий подвергается постоянно меняющимся (нестационарным) воздействиям окружающей среды, значительно осложняющим процесс теплопереноса и оценку теплофизического состояния ограждающей конструкции.

Циклический характер температурно-влажностных условий, а также агрессивная среда эксплуатации приводят к более быстрой потере теплотехнических и физико-механических свойств наружных конструкций по сравнению с проектной оценкой. По этой причине в нашей стране большой массив зданий, насчитывающий более 100 млн м² общей площади, признан малоприспособленным для проживания, в том числе около 160 многоквартирных домов в г. Пензе. Резкое снижение тепловой защиты и разрушение структуры материала наружных стен некоторых из этих зданий произошло по причине сверхсорбционного влагонакопления в массиве этих конструкций и перехода жидкокапельной влаги в твердую фазу с наступлением низких температур.

Исследование теплопроводности увлажненного материала конструкции в условиях переменных температурно-влажностных воздействий было проведено для наружных ограждающих конструкций из кирпичной кладки толщиной 51 см с сайдингом и вентилируемой воздушной прослойкой (схема 1) и такой же конструкции, дополненной эффективным утеплителем с наружной стороны (см. рисунок).



Распределение температур по толщине наружных стен

Как известно, с наступлением низких температур наружного воздуха теплопроводность влажных строительных материалов определяется характером фазовых превращений влаги и может отличаться от теплопроводности этих же материалов в зоне положительных температур.

Расчет линий распределения температуры по толщине ограждений показывает, что наружная теплоизоляция (схема №2) позволяет удерживать основной массив стены в зоне положительных температур и поэтому его капиллярная влага не подвергается замерзанию при достаточно длительном воздействии низких температур в отличие от конструкции по схеме 1.

Перед разработкой расчетной модели был выполнен анализ влажностного состояния материала нескольких типов ограждений, находящихся в различных условиях эксплуатации.

Влагосодержание поверхностных слоев ограждающих конструкций, непосредственно не увлажняемых атмосферной, капиллярной или конденсационной влагой, находится в пределах сорбционного. В процессе сорбции увлажнение наружного ограждения происходит за счет движения (диффузии) водяного пара при возникновении определенной разницы величин упругостей водяного пара в воздушной среде и порях

материала на граничащей поверхности. Значительная разница упругостей водяного пара, являющаяся потенциалом его переноса, возникает в зимний период эксплуатации, когда содержание водяных паров во внутреннем, более теплом воздухе становится больше, чем в наружном, более холодном. Одной из основных причин этого является неэффективная работа системы естественной вентиляции, что может привести к резкому повышению относительной влажности внутреннего воздуха [2-5]. Результаты проведенных натурных обследований тепловой защиты двух 10-этажных жилых зданий в г. Пензе показали, что фактическая величина воздухообмена в помещениях квартир составляет только 27-53 % от требуемой величины, в зависимости от площади приточного отверстия и количества комнат в квартире (см. таблицу).

Воздухообмен в помещениях квартир по данным инструментальных замеров

| Положение приоткрытия створки окна | Величина воздухообмена по факту, м ³ /ч | В процентах от требуемой величины | |
|------------------------------------|--|-----------------------------------|----------------------|
| | | 1-комнатная квартира | 2-комнатная квартира |
| Микрощелевое проветривание | 29-43 | 27-40 | 23-34 |
| На горизонтальной оси | 43-58 | 40-53 | 34-46 |

Натурные обследования, выполненные на других жилых и общественных зданиях, показали, что влагосодержание материала в толще наружного ограждения оказывается выше сорбционного в том случае, если его конструктивное решение препятствует выходу диффундирующего потока водяного пара в атмосферу (плотный отделочный слой на наружной поверхности или слой с большим количеством полимерной добавки). Прогрессирующее накопление влаги в материале ограждения указывает на непригодность конструкции к эксплуатации.

При обследовании однослойных однородных ограждений обычно наблюдалось стабильное сорбционное влагосодержание, поскольку коэффициент паропроницаемости такого материала по толщине конструкции практически постоянен. Однако при значительной разности температур наружного и внутреннего воздуха и упругостей водяных паров в такой ограждающей конструкции на некотором расстоянии от наружной поверхности может образоваться плоскость конденсации с температурой, равной точке росы или ниже.

Как в многослойных, так и однослойных наружных ограждающих конструкциях конденсация водяного пара на внутренней поверхности указывала на недостаточные теплозащитные качества конструкции или на повышенную относительную влажность внутреннего воздуха из-за неэффективного воздухообмена помещения, а также «мокрого» режима эксплуатации помещений. При наличии в конструкции «мостиков холода» конденсат выпадал на отдельных участках поверхности конструкции. В многослойных наружных ограждениях конструктивные слои должны чередоваться так, чтобы обеспечивалось снижение паропроницаемости конструкции по направлению от наружной к внутренней поверхности. Кардинальный способ обеспечения нормального влагосодержания наружного ограждения – установка экрана (сайдинга) с воздушной прослойкой, вентилируемой наружным воздухом.

В реальных условиях эксплуатации наружные ограждения подвергаются воздействию не только диффундирующего потока водяного пара, но и атмосферной влаги, а также утечек из систем ливневой и фекальной канализации.

В допущениях к расчетной модели было принято, что во внутреннем слое конструкции капилляры и поры материала заполнены смесью воздуха и влаги, коэффициент теплопроводности которой примерно в 20 раз выше, чем у воздуха. В увлажненном наружном слое ограждения с наступлением низких температур на стенках крупных пор начинается процесс льдообразования. При насыщении материала большим количеством влаги процесс передачи тепла интенсифицируется, так как в его структуре

образуются целые промерзшие микромассивы – «мостики холода». Для оценки теплопередачи через такие «мостики холода» определялся коэффициент теплопроводности промерзшего материала конструкции λ_3 [6].

Величина λ_3 находилась по уравнению В.Н. Богословского, которое оценивает тепло льдообразования в капиллярах и порах материала на границе промерзания конструкции:

$$r \cdot i \cdot u_{\text{ж}} \cdot \gamma_0 \cdot \frac{d\delta_3}{dz} = \lambda_3 \cdot \frac{\partial t_3}{\partial x} - \lambda_{\text{в}} \cdot \frac{\partial t_{\text{в}}}{\partial x} \quad (1)$$

Уравнение теплового баланса на границе мерзлой и влажной зон можно представить исходя из условий стационарной теплопередачи на основании уравнения (1), если учесть медленный характер изменения низких температур, а скорость продвижения границы промерзания принять как $\frac{\partial \delta_3}{\partial z} \rightarrow 0$:

$$\lambda_3 \cdot \frac{t_3 - t_{\text{н}}}{\delta_3} - \lambda_{\text{в}} \cdot \frac{t_{\text{в}} - t_3}{\delta - \delta_3} = 0, \quad (2)$$

где t_3 – температура начала замерзания влаги, °С; δ_3 – глубина промерзшей зоны ограждения, м.

Определив λ_3 из уравнения (2) и рассматривая мерзлую и влажную зоны наружного ограждения как отдельные слои с определенным термическим сопротивлением R , можно найти тепловые потери Q через конструкцию наружного ограждения. Расчет величины Q был выполнен при наружной температуре -25°C и максимальной глубине промерзания материала наружной стены $\delta_3 = 0,37$ м. Для кирпичной кладки толщиной 0,51 м с сайдингом и вентилируемой воздушной прослойкой (см. рисунок) и такой же стены без сайдинга установлено завышение тепловых потерь через эти конструкции соответственно на 11 и 16 % по сравнению с нормативной методикой расчета.

Оценка агрессивного воздействия среды на материал наружной стены была проведена на примере гигроскопической соли хлористого кальция CaCl_2 , которая впоследствии после поступления в капилляры и поры материала трансформируется в кристаллогидрат $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Величина температуры замерзания раствора этой соли в капиллярах материала принята равной $t_3 = -3,7^\circ\text{C}$ при содержании соли 7,1 %.

Результаты расчета показали, что величина теплотерь Q через вышеупомянутые конструкции стен в условиях промерзания и агрессивных воздействий составила 71,4 Вт (сопротивление теплопередаче $R_0 = 0,63 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$), что значительно больше, чем по нормативным требованиям ($Q = 53,6$ Вт, $R_0 = 0,84$).

Таким образом, в течение длительного периода эксплуатации в наружных ограждающих конструкциях может наблюдаться снижение теплопроводности, повышающее тепловые потери, из-за сверхнормативной влажности материала конструкции, фазовых переходов влаги и образования кристаллогидратов солей в ее поровой структуре.

Поэтому при проектировании наружных ограждений, эксплуатируемых в условиях повышенной влажности воздуха, низких температур и агрессивных воздействий среды, необходимо принимать конструктивные меры, предотвращающие прогрессирующее влагонакопление в структуре ограждения, промерзание материала его наружного слоя, проникновение микроконцентраций растворов солей и кислот в пористое пространство материала (например, нанесение кислотоупорных покрытий, устройство более плотных слоев со стороны внутренней поверхности ограждения).

Список литературы

1. СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23–02–2003. – М.: НИИСФ РААСН, 2012. – 95 с.
2. Береговой, А.М. Наружные ограждающие конструкции в системе воздухообмена жилого многоэтажного здания / А.М. Береговой, М.А. Дерина // Современные пробле-

мы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: [www.science-education.ru /121-17257](http://www.science-education.ru/121-17257) (дата обращения: 04.02.2015).

3. ГОСТ Р 55338-2012. Кладка каменная и изделия для нее. Методы определения расчетных значений показателей теплозащиты. – М., 2013.

4. 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.

5. 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.

6. Мальцев, А.В. Влияние теплопроводности материала наружных ограждений в стадии увлажнения и промерзания на энергоэффективность зданий / А.В. Мальцев, А.М. Береговой, В.А. Береговой, М.А. Дерина // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №1. – С. 57–61.

References

1. SP 50.13330.2012. Thermal protection of buildings. Actualized edition of SNiP 23-02-2003. – М.: NIISF RAASN, 2012. – 95 p.

2. Beregovoy, A.M. External enclosing structures in the air exchange system of a residential high-rise building / A.M. Beregovoy, M.A. Derina // Modern Problems of Science and Education. – 2015. – № 1. – URL: [www.science-education.ru / 121-17257](http://www.science-education.ru/121-17257) (circulation date: February 4, 2015).

3. GOST. P 55338-2012. Masonry and masonry products. Methods for determining estimates of the thermal protection. – М., 2013.

4. 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.

5. 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.

6. Maltsev, A.V. Influence of the thermal conductivity of the material of external enclosure structures in the stage of moistening and freezing on the energy efficiency of buildings / A.V. Maltsev, A.M. Beregovoi, V.A. Beregovoi, M.A. Derina // Regional architecture and construction. – 2013. – No. 1. – P. 57–61.

УДК 658.562.3:69.057:692.82

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77**Макарова Людмила Викторовна,**
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: Mak.78_08@inbox.ru**Тарасов Роман Викторович,**
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: rwtarasow@rambler.ru.**Безрукова Марина Сергеевна,**
магистрант 2 курса обучения направления
подготовки 27.03.01 Стандартизация и
метрология
E-mail: marina260710@mail.ru.*Penza State University of Architecture
and Construction*Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77**Makarova Ludmila Viktorovna,**
Candidate of Sciences, Assistant Professor of
the department «Management of quality and
the technology of the construction
production»
E-mail: Mak.78_08@inbox.ru**Tarasov Roman Viktorovich,**
Candidate of Sciences, Assistant Professor of
the department «Management of quality and
the technology of the construction
production»
E-mail: rwtarasow@rambler.ru.**Bezrukova Marina Sergeevna,**
master 2 courses of the direction of
preparation 27.03.01 Standardization and
metrology
E-mail: marina260710@mail.ru.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДУПРЕЖДАЮЩИХ ДЕЙСТВИЙ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ДЕФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ МОНТАЖЕ ПЛАСТИКОВЫХ ОКОН

Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов, М.С. Безрукова

Современная концепция управления качеством продукции предусматривает создание эффективной системы предупреждающих действий, направленных на недопущение выпуска бракованной продукции. В работе представлена методика оценки эффективности разработки и внедрения предупреждающих действий, направленных на совершенствование процесса монтажа пластиковых окон. Проведен предварительный анализ причин и количества рекламаций на реализованную продукцию. Выявлены основные процессы, с помощью которых можно решить проблемы по устранению выявленных несоответствий. Произведены расчёты стоимости восстановления работоспособного состояния пластиковых окон, и определены суммарные потери с учетом количества рекламаций, выявленных в течение года. Предложены различные подходы к предупреждению возможности появления дефектной продукции. Определена экономическая эффективность внедрения предупреждающих действий.

Ключевые слова: пластиковые оконные конструкции, рекламация, дефектная продукция, диаграмма Парето, затраты, реализация предупреждающих действий.

ASSESSMENT THE EFFICIENCY OF PREVENTIVE ACTIONS TO ELIMINATE DEFECTS ARISING AT INSTALLATION OF PLASTIC WINDOWS

L.V. Makarova, R.V. Tarasov, M.S. Bezrukova

The modern concept of product quality management provides the creation of an effective system aimed at preventing production of defective products. The paper presents a methodology for assessing

the effectiveness of development and implementation of preventive actions aimed at improving installation of plastic windows. A preliminary analysis of the causes and the number of claims for the products sold has been. The main processes have been identified, with the help of which the problems eliminating the identified problems can be solved. Calculations of the cost of restoring the working condition of each identified process and the total losses were made, taking into account the number of complaints detected during the year. Various approaches are proposed to prevent the possibility of production defective products. The economic efficiency of preventive actions has been determined.

Keywords: plastic window designs, reclamation, defective products, Pareto diagram, costs, implementation of preventive actions

Пластиковые окна уже давно стали популярными на российском рынке – их непревзойдённое качество, отличная звуко- и теплоизоляция, практичность, длительный срок эксплуатации и легкий уход сделали их лидерами на рынке оконных конструкций [1]. Несмотря на это, любая металлопластиковая конструкция требует грамотного монтажа, в противном случае может возникнуть ряд проблем при эксплуатации установленной оконной конструкции. Такого рода проблемы обнаруживаются как через некоторое время после монтажа конструкции, так и при смене сезона.

Рекламации на установленные оконные конструкции носят регулярный характер, следовательно, их можно предотвратить либо на этапе замера, либо на этапе монтажа. Около 5 % всех возникающих рекламаций связаны с человеческим фактором. Ошибки допускаются как со стороны специалиста по монтажу при неправильном замере проема, в который устанавливается конструкция, так и со стороны менеджера при внесении данных в расчетную программу. Также рекламация может возникнуть из-за особенностей несущей конструкции, здания, что невозможно предвидеть на стадии изготовления и при монтаже конструкции. К таким причинам можно отнести проседание здания, изменение его геометрии, нарушение вентиляции. Все остальные рекламации, которые встречаются на практике, связаны с нарушением технологии установки окон или производственным браком.

Наиболее часто встречающиеся рекламации – это провисание створок, продувание, конденсат на стеклопакете, промерзание, образование плесени, изменение геометрии конструкции как белых окон, так и ламинированных, растрескивание стеклопакета.

Для качественного анализа имеющихся рекламаций на реализованную продукцию можно воспользоваться диаграммой Парето. Основные виды рекламаций в порядке убывания представлены в табл. 1. Диаграмма Парето показана на рисунке.

Т а б л и ц а 1

Основные виды рекламации

| № п/п | Рекламация | Количество случаев | Доля в общем количестве случаев, % | Накопленный процент, % |
|-------|---------------------------------|--------------------|------------------------------------|------------------------|
| 1 | Провисание створки | 30 | 25,44 | 25,44 |
| 2 | Продувание створки | 23 | 19,49 | 44,93 |
| 3 | Растрескивание стеклопакета | 20 | 16,95 | 61,88 |
| 4 | Конденсат внутри стеклопакета | 15 | 12,71 | 74,59 |
| 5 | Конденсат на стеклопакете | 10 | 8,47 | 83,06 |
| 6 | Промерзание | 10 | 8,47 | 91,53 |
| | Другие: | 10 | 8,47 | 100 |
| 7 | Образование плесени | 7 | 5,93 | |
| 8 | Изменение геометрии конструкции | 3 | 2,54 | |

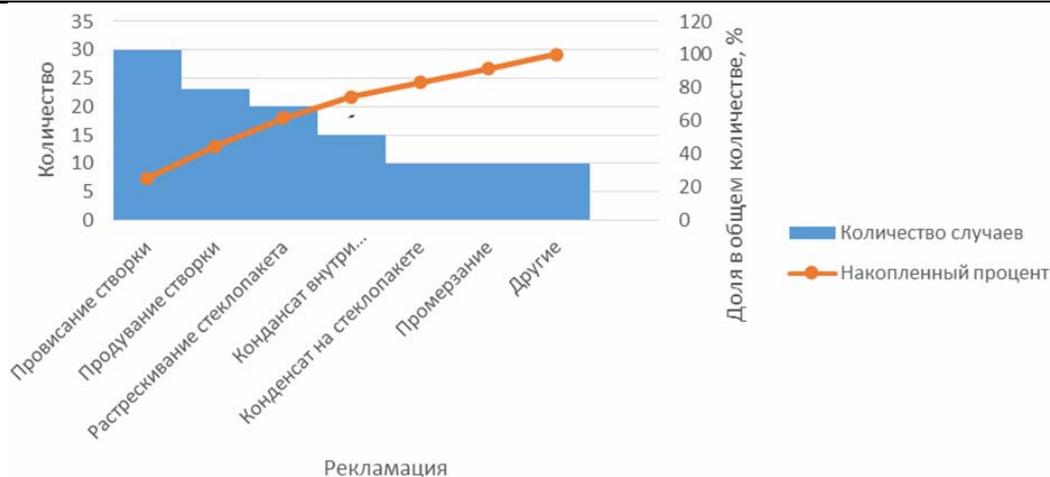


Диаграмма Парето накопленных рекламаций

Установлено, что из первоначального списка рекламаций, приводящих к значительным убыткам, максимально приоритетными являются провисание створки, продувание створки, растрескивание стеклопакета и появление конденсата внутри стеклопакета, что соответствует значению – 74,59 %. Отсюда следует, что устранение приоритетных рекламаций позволит избавиться от подавляющего большинства возникающих случаев потерь и снизить непредвиденные расходы.

Для решения задачи, направленной на сокращение непредвиденных расходов, необходимо выявить основные процессы, позволяющие восстановить работоспособное состояние объекта (устранение несоответствия) [2...4].

При обнаружении дефектов, представленных в рекламациях, их можно устранить сразу при монтаже либо с помощью изготовления или заказа новых изделий или комплектующих. Возможные виды работ, проводимых для устранения самых распространенных рекламаций, представлены в табл. 2. Для расчёта стоимости восстановления работоспособного состояния для каждого выявленного процесса необходимо создать рабочую группу из специалистов, в которую будут входить старший монтажник и исполнительный директор. Их задача заключается в изучении претензии заказчика, оценке возникшего дефекта и возможных затрат на его устранение. Анализ имеющейся информации позволил произвести расчет стоимости затрат на устранение рекламаций (табл. 3). Среднее время выполнения процесса – время на процесс, которое должно быть рассчитано с максимальной точностью. Информацию о требуемых временных затратах можно получить у ответственного инженера или в результате опроса исполнителей. Стоимость человеко-часа работы – оценка в денежном эквиваленте стоимости часа работы одного человека, занятого на этом процессе (зарплаты, премии и т.п. в пересчёте на час времени). Количество человек – количество человек, необходимое для выполнения процесса. Материальные затраты – стоимость затрат на поездки. Сумма затрат – итоговая сумма затрат по стоимости элемента и материальным затратам.

Т а б л и ц а 2

Виды работ по устранению рекламации

| № п/п | Рекламация | Виды работ |
|-------|-------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | Провисание створки | Регулировка створки |
| 2 | Продувание створки | Регулировка створки |
| 3 | Растрескивание стеклопакета | Изготовление нового стеклопакета |
| 4 | Конденсат внутри стеклопакета | Изготовление нового стеклопакета |

| 1 | 2 | 3 |
|---|---------------------------------|--|
| 5 | Конденсат на стеклопакете | Выявление причины возникновения конденсата: – если высокая влажность в помещении, то дать рекомендации по наладке вентиляции и проветриванию помещения – если батарея отопления закрыта подоконником, то уменьшить глубину подоконника – если установлен однокамерный стеклопакет, то установить новый двухкамерный стеклопакет |
| 6 | Промерзание | - регулировка створки – рекомендации по наладке отопления |
| 7 | Образование плесени | Разработка рекомендаций по наладке вентиляции и проветриванию помещения |
| 8 | Изменение геометрии конструкции | Новый монтаж всей конструкции |

Т а б л и ц а 3

Расчет стоимости затрат на устранение рекламации

| № п/п | Виды работ по устранению рекламации | Среднее выполнение процесса, ч | Стоимость человеко-часа работы, руб. | Количество человек, ед. | Стоимость элемента затрат, руб. | Материальные затраты, руб. | Сумма затрат, руб. |
|--------------|---|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|--------------------|
| 1 | Регулировка створки | 0,33 | 1515 | 1 | 499,95 | 200,00 | 699,95 |
| 2 | Установка нового стеклопакета | 0,5 | 2268 | 2 | 2268,00 | 200,00 | 2468,00 |
| 3 | Рекомендации по наладке вентиляции | 0,33 | 1515 | 1 | 499,95 | 200,00 | 699,95 |
| 4 | Уменьшение глубины подоконника | 0,77 | 1296 | 2 | 1995,84 | 200,00 | 2195,84 |
| 5 | Установка нового двухкамерного стеклопакета | 0,5 | 2268 | 2 | 2268,00 | 200,00 | 2468,00 |
| 6 | Рекомендации по наладке отопления | 0,33 | 1515 | 1 | 499,95 | 200,00 | 699,95 |
| 7 | Рекомендации по проветриванию помещения | 0,33 | 1515 | 1 | 499,95 | 200,00 | 699,95 |
| 8 | Новый монтаж всей конструкции | 1,5 | 430 | 2 | 1290,00 | 500,00 | 1790,00 |
| Итого | | | | | | | 11721,6 |

Суммарные потери с учетом имеющегося количества рекламаций, выявленных в течение года, представлены в табл. 4.

Для предупреждения появления некоторых видов рекламаций необходимо проводить дополнительные работы во время приемки и установки металлопластиковых конструкций с целью оптимизации затрат на устранение несоответствий (табл. 5).

Суммарные потери с учетом имеющегося количества рекламаций,
выявленных в течение года

| № п/п | Вид рекламации | Вид работ по устранению рекламации | Количество рекламаций | Стоимость устранения рекламаций, руб. (см. табл. 7) | Суммарные потери, руб. |
|--------------|---------------------------------|---|-----------------------|---|------------------------|
| 1 | Провисание створки | Регулировка створки | 30 | 699,95 | 20998,5 |
| 2 | Продувание створки | Регулировка створки | 23 | 699,95 | 16098,85 |
| 3 | Растрескивание стеклопакета | Изготовление нового стеклопакета | 20 | 2468,00 | 49360,00 |
| 4 | Конденсат внутри стеклопакета | Изготовление нового стеклопакета | 15 | 2468,00 | 37020,00 |
| 5 | Конденсат на стеклопакете | Рекомендации по наладке вентиляции | 7 | 699,95 | 4899,65 |
| 6 | | Уменьшение глубины подоконника | 2 | 2195,84 | 4391,68 |
| 7 | | Установка нового двухкамерного стеклопакета | 1 | 2468,00 | 2468,00 |
| 8 | Промерзание | Регулировка створки | 5 | 699,95 | 3499,75 |
| 9 | | Рекомендации по наладке отопления | 5 | 699,95 | 3499,75 |
| 10 | Образование плесени | Дать рекомендации по наладке вентиляции и проветриванию помещения | 7 | 699,95 | 4899,65 |
| 11 | Изменение геометрии конструкции | Новый монтаж всей конструкции | 3 | 1790,00 | 5370,00 |
| Итого | | | | | 152505,80 |

Т а б л и ц а 5

Подходы к предупреждению возможности появления дефекта

| № п/п | Вид рекламации | Подходы к предупреждению |
|-------|---|--|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | Провисание створки | Тщательная регулировка створки при установке окна |
| 2 | Продувание створки | Тщательная регулировка створки при установке окна |
| 3 | Растрескивание стеклопакета | Невозможно предотвратить возможность образования растрескивания, т.к. это происходит из-за перекаливания стекла на производстве и стеклопакет может дать трещину в течение 30 дней |
| 4 | Конденсат внутри стеклопакета | Невозможно предотвратить возможность образования конденсата внутри стеклопакета, т.к. это происходит из-за разгерметизации стеклопакета и конденсат может образоваться даже через 3 года |
| 5 | Конденсат на стеклопакете из-за высокой влажности в помещении | Предупредить клиента о возможном появлении конденсата из-за высокой влажности в помещении |

| 1 | 2 | 3 |
|----|---|--|
| 6 | Конденсат на стеклопакете из-за широкой глубины подоконника | Изначально устанавливать подоконник, который закрывает батарею не более чем на 1/3 |
| 7 | Конденсат на стеклопакете из-за несоответствующего стеклопакета | При оформлении заказа в офисе настоятельно рекомендовать заказчику устанавливать в отапливаемое помещение двухкамерный стеклопакет |
| 8 | Промерзание из-за неплотного прилегания створки | Тщательная регулировка створки при установке окна |
| 9 | Промерзание из-за плохого отопления | Предупредить клиента о возможном появлении промерзания при недостаточном использовании отопления |
| 10 | Образование плесени | Предупредить клиента о возможном образовании плесени из-за высокой влажности в помещении |
| 11 | Изменение геометрии конструкции | Производить монтаж с использованием должного количества пены и анкеров |

Проведенный анализ свидетельствует о том, что невозможно реализовать предупреждающие действия для всех видов рекламаций, но необходимо предложить ряд предупреждающих действий, которые следует максимально задействовать, чтобы исключить количество рекламаций.

Во избежание появления дефектов, возникающих на стадии замера и установки металлопластиковых конструкций, необходим наем высокоспециализированных бригад с последующей оценкой квалификации сотрудников (данная оценка может быть выполнена в Центре оценки квалификации) по установке либо проведение периодических семинаров, направленных на повышение квалификации персонала. Также можно нанять отдельного сотрудника, который будет отвечать за приемку объекта, контролировать качество установки и разъяснять клиенту на объекте установки о том, какие могут быть последствия, не зависящие от установки окна (высокая влажность в помещении, недостаточное использование отопления и др.). Дополнительно необходимо разработать для офисов продаж инструкцию по эксплуатации окна, в которой будут указаны все нюансы возникновения рекламаций. Примерный уровень затрат на реализацию предупреждающих действий представлен в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Расчет стоимости затрат на реализацию предупреждающих действий

| № п/п | Вид реализации предупреждающего действия | Стоимость затрат на реализацию, руб. в год |
|---------------|---|--|
| 1 | Оценка квалификации сотрудника | 16000,00 |
| 2 | Проведение семинаров | 30000,00 |
| 3 | Наем специалиста по контролю качества | 180000,00 |
| 4 | Разработка и снабжение офисов продаж инструкцией по эксплуатации окон | 50000,00 |
| Итого: | | 276000,00 |

В стоимость затрат по оценке качества сотрудника входит оценка качества офисного работника. При определении стоимости затрат на проведение семинаров и обучений учитывается наем высококвалифицированного специалиста, организующего подобные мероприятия с периодичностью один семинар в год. В стоимость затрат на наем специалиста по контролю качества включается заработная плата данного сотрудника. В стоимость затрат входят непосредственно сама разработка инструкции (10000 руб.) и услуги типографии с учетом выпуска необходимого количества экземпляров в год (400 экземпляров, 100 руб. за экземпляр).

Для оценки экономической эффективности предупреждения возникновения рекламаций проведем сопоставительный анализ затрат, связанных с устранением несоответствий и их предупреждением (табл. 7).

Т а б л и ц а 7

Суммарные потери на выявленные рекламации

| № п/п | Вид рекламации | Вид работ по устранению рекламации | Количество рекламаций | Стоимость устранения рекламации, руб. | Суммарные потери, руб. |
|--------------|---------------------------------|--|-----------------------|---------------------------------------|------------------------|
| 1 | Провисание створки | Регулировка створки | 30 | 699,95 | 20998,5 |
| 2 | Продувание створки | Регулировка створки | 23 | 699,95 | 16098,85 |
| 3 | Конденсат на стеклопакете | Рекомендации по наладке вентиляции | 7 | 699,95 | 4899,65 |
| 4 | | Уменьшение глубины подоконника | 2 | 2195,84 | 4391,68 |
| 5 | | Установка нового двухкамерного стеклопакета | 1 | 2468,00 | 2468,00 |
| 6 | Промерзание | Регулировка створки | 5 | 699,95 | 3499,75 |
| 7 | | Рекомендации по наладке отопления | 5 | 699,95 | 3499,75 |
| 8 | Образование плесени | Рекомендации по наладке вентиляции и проветриванию помещения | 7 | 699,95 | 4899,65 |
| 9 | Изменение геометрии конструкции | Новый монтаж всей конструкции | 3 | 1790,00 | 5370,00 |
| Итого | | | | | 66125,83 |

Выводы

Анализ полученной информации свидетельствует о том, что затраты на реализацию предупреждающих действий существенно превышают суммарные потери на устранение рекламаций, которых можно избежать за счет введения в практику предлагаемых рекомендаций. Реализация данных мероприятий приведет к значительному повышению имиджа компании и расширению рынка сбыта металлопластиковых оконных конструкций.

Список литературы

1. «Окна медиа». – Режим доступа: <http://www.oknamedia.ru/novosti/rynok-okon-itogi-i-prognoz-na-2017-god-47213>
2. Тарасов, Р.В. Управление качеством продукции промышленных предприятий: монография / Р.В. Тарасов, Л.В. Макарова. – Пенза: ПГУАС, 2017. – 168 с.
3. Библиотека управления: Анализ затрат на качество: материалы проекта ISO 9000. – Режим доступа: http://www.cfin.ru/management/iso9000/iso9000_cost.shtml.
4. Макарова, Л.В. Оптимизация процесса анализа затрат на качество / Л.В. Макарова Р.В. Тарасов, С.Г. Малёбнова // Вестник ПГУАС: Строительство, наука и образование. – 2016. – №2(3). – С.4–9.

References

1. «Windows of media». – Access mode: <http://www.oknamedia.ru/novosti/rynok-okon-itogi-i-prognoz-na-2017-god-47213>
2. Tarasov, R.V. Product quality control of the industrial enterprises: monograph / R.V. Tarasov, L.V. Makarova. – Penza: PGUAS, 2017. – 168 p.
3. Library of management: Analysis of costs of quality: materials of the project ISO 9000. – Access mode: http://www.cfin.ru/management/iso9000/iso9000_cost.shtml.
4. Makarova, L.V. Optimization of process of the analysis of costs of quality / L.V. Makarova, R.V. Tarasov, S.G. Malebnova // PGUAS Bulletin: construction, science and education. – 2016. – №2(3). – P.4–9.

УДК 006:721/728:502.17

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

Карпова Ольга Викторовна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: olga_viktorovna_60@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

Karpova Olga Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Quality management and
technology of construction production»
E-mail: olga_viktorovna_60@mail.ru

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ «ЗЕЛЕННЫХ» ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМАХ СЕРТИФИКАЦИИ ЗДАНИЙ

О.В. Карпова

Приведен перечень «зеленых» технологий, применение которых при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий обеспечивает благоприятные условия жизнедеятельности человека, рациональное использование природных ресурсов, ограничение негативного влияния на окружающую среду. Дана краткая характеристика наиболее применяемых в мире и в России международных систем рейтинговой оценки объектов недвижимости. Рассмотрены предпосылки разработки и внедрения национальных «зеленых» стандартов как инструмента внедрения новейших технологий. Приведен перечень национальных систем добровольной сертификации объектов недвижимости. Рассмотрены примеры применения инновационных «зеленых» технологий, позволивших получить некоторым объектам недвижимости сертификаты соответствующего уровня различных систем сертификации.

Ключевые слова: системы сертификации зданий, «зеленые» технологии, критерии оценки, экологическая маркировка строительных материалов, «зеленое» строительство, энергоэффективные здания, принцип устойчивого развития, уровень соответствия объекта

THE EVALUATION CRITERIA OF “GREEN” TECHNOLOGIES IN CERTIFICATION SYSTEMS OF BUILDINGS

O.V. Karpova

The list of «green» technologies is given, their use in design, construction and operation of buildings provides favorable human living conditions, rational use of natural resources, and restriction of the negative impact on the environment. A brief description of the most used in the world and in Russia international rating systems of real estate is given. The prerequisites of the development and implementation of national «green» standards as a tool for the introduction of new technologies are considered. The list of national systems of voluntary certification of real estate objects is given. The examples of application of innovative «green» technologies, which allow to obtain certificates of corresponding level of various certification systems for some real estate objects, are considered.

Keywords: building certification systems, «green» technologies, evaluation criteria, environmental labeling of building materials, «green» building, energy efficient buildings, sustainable development principle, the level of object compliance

Специалисты считают, что проблемы глобального потепления связаны в том числе с экологическим неблагополучием современных городов. По результатам исследований установлено, что все здания в мире, независимо от их назначения, «потребляют» около 40 % всей первичной энергии, 67 % всего электричества, 40 % всего сырья и 14 % всех запасов питьевой воды, кроме того, производят 35 % всех выбросов углекислого газа и почти половину всех твердых бытовых отходов [1]. Все это создает неблагоприятные условия для жизни человека. Живя в населенном пункте, мы

проводим все свое время в зданиях (жилье, офисы, производственные помещения), а по пути на работу, домой, на прогулках – около них. Поэтому во всем мире растет спрос на экологически чистое жилье, офисы, промышленные здания. Однако если думать, что, построив здание из экологичных материалов, прошедших сертификацию и имеющих соответствующую экомаркировку [2], можно решить эту проблему, то это заблуждение. Вот почему в последнее время во всем мире уделяется огромное внимание внедрению инновационных «зеленых» технологий при проектировании, возведении, эксплуатации и утилизации зданий, обеспечивающих не только благоприятные условия жизнедеятельности человека, рациональное использование природных ресурсов, но и ограничивающих негативное влияние на окружающую среду [3].

Примерами «зеленых» технологий, внедрение которых при проектировании, возведении и эксплуатации зданий, обеспечивает возможность сертификации объектов недвижимости, являются [4]:

- выбор ограждающих конструкций, параметров, подбор теплоизоляционных и имеющих экологическую маркировку строительных и отделочных материалов;
- абсорбционные системы отопления и охлаждения;
- светодиодное освещение;
- механическая вентиляция с утилизацией теплоты;
- энергоэффективные лифты и эскалаторы;
- автономные опоры для наружного освещения;
- солнечные батареи и коллекторы;
- вертикальные ветрогенераторы;
- воздушные и подземные тепловые насосы;
- учет потребления тепловой и электрической энергии по зонам;
- естественное дневное освещение 80 % офисной площади, достигаемое с помощью панорамного остекления, световодов, математического моделирования освещенности и др.;
- затеняющие конструкции на фасаде;
- датчики присутствия;
- учет потребления воды с использованием датчиков с импульсным входом;
- системы управления зданием с применением диспетчеризации и автоматического управления оборудованием и пр.

Сертификация зданий основывается на оценке применения «зеленых» технологий, поэтому у строительной индустрии возникла потребность в выработке критериев экологического строительства. Для этого в разных странах были разработаны соответствующие «зелёные» стандарты, предполагающие снижение негативного влияния зданий на протяжении всего их жизненного цикла на окружающую среду и здоровье человека. Оценка объектов недвижимости на соответствие этим стандартам до недавнего времени в России проводилась только международными системами сертификации.

Система добровольной сертификации энергоэффективных зданий BREEAM введена в Великобритании с 1990 г. Система имеет собственную программу обучения независимых оценщиков, которые и проводят оценку по всем категориям «зеленых» стандартов и подают отчет для получения сертификата. При сертификации объект оценивается по девяти направлениям: вредные выбросы в атмосферу, землепользование и экология, отходы, материалы, водопользование, транспорт, энергетика, здоровье и благоустройство, менеджмент. В перечень критериев оценки в отличие от других международных систем входит категория «транспорт». Общая оценка заключается в присуждении рейтинга: «Удовлетворительно», «Хорошо», «Очень хорошо», «Отлично», «Великолепно».

Система добровольной сертификации LEED разработана в США в 1993 году. Принцип работы экспертов в этой системе иной: заявитель самостоятельно собирает исходную информацию для оценки объекта, а аккредитованные специалисты его лишь консультируют. При сертификации по LEED проводится оценка объекта недвижимости по пяти направлениям: планирование территории, рациональное водопользование, энергопотребление, применение строительных материалов и качество внутрен-

него микроклимата. В отличие от системы BREEAM учитывается критерий «региональная специфика». Уровень соответствия стандартам, присваиваемый объектам системой LEED: «Сертифицирован», «Серебряный сертификат», «Золотой сертификат», «Платиновый сертификат».

Система DGNB принята в Германии с 2009 года. Оценка зданий осуществляется по шести критериям: экологический, экономический, социокультурный и функциональный, технологический, эксплуатационный и по местоположению. По результатам сертификации зданиям присваивается статус: «Сертифицировано», «Бронзовый сертификат», «Серебряный сертификат», «Золотой сертификат». В отличие от других систем сертификации возможна оценка жизненного цикла здания за пятидесятилетний период его функционирования, что дает возможность ещё при проектировании применить «зеленые» технологии, которые обеспечат наибольшую экономию при эксплуатации здания.

Система HQE осуществляет сертификацию объектов во Франции с 1992 году на соответствие стандарту Haute Qualité Environnementale (HQE – «высокое качество окружающей среды»), в основу которого положена концепция о том, что устойчивое развитие является совокупностью экологических, экономических и социальных факторов, которые подлежат анализу в течение всего жизненного цикла объекта недвижимости. Сертификация HQE проводится по 14 критериям и нацелена на эффективность принимаемых проектных решений и управления строительными процессами, увязанными с нормативной базой страны. Кроме того, процедура сертификации объединяет все заинтересованные стороны. Команда проекта устанавливает цели для конкретных условий проекта и обладает свободой выбора архитектурных решений и местных технологий [5].

Практика применения приведенных выше международных систем сертификации показывает, что на американском континенте и в Азии наиболее используемой является система LEED, а в Европе, в том числе в России, – BREEAM.

Началу внедрения «зеленых» технологий в строительной отрасли России способствовали проведение Олимпиады в 2014 году и Чемпионата мира по футболу в 2018 году, так как МОК и FIFA предъявили требования к сертификации объектов по международным стандартам. Кроме того, ужесточение экологического законодательства в РФ, указы Президента РФ, требования иностранных девелоперов и арендаторов, предпочитающих использовать здания, имеющие «зеленые» сертификаты, растущая грамотность населения, предпочитающего жить в экологически чистых домах и экономить на оплате ЖКХ при эксплуатации жилища, привели к тому, что в России стали разрабатываться и внедряться отечественные «зеленые» стандарты и функционировать соответствующие системы сертификации.

Большое значение в отечественной практике для оценки «зеленых» технологий имеют стандарты СТО НОСТРОЙ 2.35.4–2011 «Зеленое строительство. Здания жилые и общественные. Рейтинговая система оценки устойчивости среды обитания», СТО НОСТРОЙ 2.35.68–2012, учитывающий региональные особенности в этой рейтинговой системе, и ГОСТ Р 54964–2012 «Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости», признанный государством как национальный стандарт «зеленого» строительства. В них учтены и переформулированы те рекомендации международных систем экологической сертификации объектов недвижимости, которые может использовать на практике строительная индустрия страны. Эти стандарты, являясь инструментами внедрения «зеленых» технологий при обеспечении безопасности и устойчивости среды обитания, должны использоваться при сертификации объектов недвижимости, что призвано ускорить переход от традиционного проектирования и строительства зданий и сооружений к «зеленому», в основе которого лежат принципы устойчивого развития общества [6]:

- экологичность (означает снижение негативного влияния на окружающую среду и здоровье человека);
- эффективное ресурсопотребление (обеспечивается экономным потреблением природных ресурсов и использованием возобновляемых источников энергии);

- технологичность (достигается внедрением «зеленых» технологий);
- экономичность (обеспечивается удовлетворением основных потребностей с минимальными затратами);
- эргономичность и социальная ответственность (заключается в оптимизации социально-бытовой инфраструктуры населенных мест для максимального удовлетворения потребностей общества).

В настоящее время функционирует несколько российских систем экологической сертификации зданий, таких, как «Зеленые стандарты» (2010 г.), СДОС НОСТРОЙ; GREEN ZOOM (2014 г.); СДС «РУСО» (2015 г.) [7]. Рассматривая процедуру рейтинговой оценки зданий во всех системах сертификации, можно выделить несколько этапов. На первом этапе проводится оценка проекта или здания отдельно по каждой категории, представленной в «зеленом» стандарте, затем выставляется общая оценка, а на заключительном этапе на ее основе присваивается уровень соответствия объекта недвижимости «зеленому» стандарту и выдается сертификат.

Критерии, на соответствие которым сертифицируется объект в системе «Зеленые стандарты», объединены в 8 групп. По результатам сертификации при выполнении всех необходимых требований объекту выдается один из четырех видов сертификатов: «Зеленый стандарт», «Зеленый стандарт – серебро», «Зеленый стандарт – золото», «Зеленый стандарт – платина».

При сертификации в системе СДОС НОСТРОЙ устойчивость среды обитания оценивается десятью базовыми категориями. В соответствии с суммой набранных баллов по результатам оценки, подтвержденной заключением, предусматривается выдача следующих четырех видов сертификатов с присвоением соответствующих знаков: сертификат класса А, сертификат класса В, сертификат класса С; сертификат класса D. По объектам, получившим классы оценки E, F или G, выдаются заключения с указанием величин полученных баллов.

В системе GREEN ZOOM, состоящей из 48 практических рекомендаций на русском языке, контролируется и оценивается объект недвижимости по восьми направлениям (критериям). Отличительная черта этой системы энергоэффективности – использование малозатратных практических рекомендаций с целью выполнения законодательных актов РФ. Если в проекте реализуется та или иная рекомендация, соблюдены все обязательные требования, то в зависимости от набранных баллов проект получает сертификат соответствующего уровня: бронзовый, серебряный, золотой или платиновый.

В процессе сертификации экспертами СДС «РУСО» объект оценивается по 40 критериям, которые содержат 150 показателей-индикаторов и объединены в 9 оценочных категорий, по которым и начисляются баллы. В зависимости от количества набранных баллов за степень выполнения критериев выдается сертификат: базовый уровень – «Зеленый стандарт», 1-й уровень – «Серебро», 2-й уровень – «Золото», 3-й уровень – «Платина». В сертификационной системе «РУСО. Футбольные стадионы» оцениваются на соответствие «зеленым» стандартам футбольные стадионы, а также легкоатлетические стадионы и спортивные универсальные комплексы. В зависимости от количества начисленных по результатам оценки баллов стадиону присваивается сертификат и знак соответствия одного из 4 уровней с правом его нанесения на официальные документы и размещения на самом объекте, включая арену, трибуны, игровую зону.

Рассмотрим несколько объектов недвижимости, получивших сертификаты соответствия в различных системах сертификации по итогам набранных баллов в результате критериальной оценки внедренных «зеленых» технологий на объектах недвижимости [8].

Применение таких технологий, как утилизация тепла, автоматизированная система управления инженерными системами, естественное освещение, вентиляция по потребности, системы мониторинга уровня углекислого газа, вторичное использование воды, а также применение дождевой воды для технических нужд позволили заводу SKF (Россия, Тверская область) получить международный сертификат LEED в 2010 году.

Бизнес-центру Ducat Place III (г. Москва) после оценки примененных «зеленых» технологий (энергоэффективное освещение, датчики движения, оптимизированная система работы лифтов и кондиционирования, отдельный сбор отходов, велосипедная парковка, объемная автомобильная парковка, высокие визуальные характеристики вида из окон) был вручен в 2010 г. сертификат BREEAM Very Good.

ГиперКуб в Сколково (г. Москва) получил сертификат LEED в результате внедрения инновационных «зеленых» технологий, таких, как возможность трансформирования фасадов и внутренних объемов здания, работа осветительных приборов от солнечных батарей, наличие светопрозрачной кровли и гелиоэнергетических установок, вырабатывающих электричество для освещения фасада и технических зон, круглогодичный обогрев и охлаждение здания тепловыми насосами, система очистки сточных вод, позволяющая использовать ее для полива растений и деревьев, подключение всех коммуникаций к единой системе управления и пр.

По результатам внедрения и критериальной оценки «зеленых» технологий в процессе сертификации, таких, как регулировка радиаторного отопления, рекуперативная вентиляция, погодозависимая автоматика, повышение теплозащитных характеристик ограждающих конструкций и использование датчиков углекислого газа, бизнес-центр в Екатеринбурге получил золотой сертификат GREEN ZOOM.

При сертификации отеля «Русские сезоны» в г. Сочи (система добровольной сертификации «Зеленые стандарты» при Минприроды РФ) оценивались следующие инновации: применение зеленой кровли, масштабное размещение солнечных батарей для выработки электричества на стенах, окнах и на кровле здания.

Таким образом, при проектировании, возведении, эксплуатации и утилизации зданий и сооружений необходимо соблюдать принцип устойчивого развития общества, что, в свою очередь, обеспечивается в том числе оценкой критериев внедрения «зеленых» технологий при сертификации зданий и сооружений. Рейтинговая оценка объектов недвижимости на соответствие установленным в «зеленых» стандартах и системах сертификации критериям обеспечивает объективность оценки зданий и внедренных технологий, конкурентоспособность владельцам недвижимости и управляющим компаниям.

И хотя очевидно, что для иностранных девелоперов приоритетными системами еще долгое время будут являться международные системы сертификации, нет сомнения в необходимости развития национальных систем экологической сертификации зданий. Однако нужно ли увеличение их количества? Цели систем, по сути, одинаковы, а различие заключается в перечне и количественной оценке рейтинговых показателей, а также в выдаваемых сертификатах. Очевидно, на современном этапе развития «зеленого» строительства в России следует продолжать совершенствовать и положения национальных «зеленых» стандартов, и деятельность систем экологической сертификации зданий.

Список литературы

1. Национальное агентство устойчивого развития. Экологическое строительство в России. – URL: <https://green-agency.ru/ekologicheskoe-stroitelstvo-v-rossii/>
2. Карпова, О.В. Экологическая сертификация – гарантия безопасности строительных и отделочных материалов / О.В. Карпова // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 3(36). – С. 91–97.
3. Петрянина, Л.Н. Учет экологических факторов при проектировании промышленных предприятий / Л.Н. Петрянина, А.А. Булдыгина, О.В. Карпова // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 1(26). – С. 138–143.
4. Иванов, А. Рейтинг «зеленых» технологий в России / А. Иванов, Е. Волынкин // ИД Строительный эксперт. – URL: <https://ardexpert.ru/article/8255>
5. Горбанева, Е. Международные системы сертификации в концепции «зеленого» строительства / Е. Горбанева. – URL: <https://in-regional.ru/ekspertnoe-mnenie/mezhdunarodnye-sistemy-sertifikatsii-v-kontseptsii-zelenogo-stroitelstva.html>

6. Уткина, Н.А. Принципы устойчивого развития: классификация, взаимосвязи, практическая реализация / Н.А. Уткина // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=6406>.
7. Карпова, О.В. Рейтинговые системы оценки недвижимости в России / О.В. Карпова // News of science and education. – 2019. – №2, v. 4. – С.29-31. – URL: <http://www.rusnauka.com/books/2019-01-19-A4-tom-4+.pdf>
8. Дувинг, С. «Зеленые» здания в России и за рубежом / С. Дувинг // Вестник «ЮНИДО в России». – 2017. – № 8. – URL: http://www.unido-russia.ru/archive/num8/art8_17/

References

1. National Agency for Sustainable Development. Ecological construction in Russia. – URL: <https://green-agency.ru/ekologicheskoe-stroitelstvo-v-rossii/>
2. Karpova, O.V. Ecological certification – guarantee safety of building and finishing materials / O.V. Karpova // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 3 (36). – P. 91–97.
3. Petryanina, L.N. Accounting for environmental factors in the design of industrial enterprises / L.N. Petryanina, A.A. Buldygina, O.V. Karpova // Regional architecture and engineering. – 2016. – No. 1 (26). – P. 138–143.
4. Ivanov, A. Rating of «green» technologies in Russia / A. Ivanov, E. Volynkin // Building expert. – URL: <https://ardexpert.ru/article/8255>
5. Gorbaneva, E. International certification systems in the concept of «green» construction / E. Gorbaneva. – URL: <https://in-regional.ru/ekspertnoe-mnenie/mezhdunarodnye-sistemy-sertifikatsii-v-kontseptsii-zelenogo-stroitelstva.html>
6. Utkina, N.A. Principles of sustainable development: classification, mutual relations, practical implementation / N.A. Utkina // Modern problems of science and education. – 2012. – No. 3. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=6406>.
7. Karpova, O.V. Rating systems for a valuation of real estate in Russia / O.V. Karpova // News of science and education. – 2019. – No. 2, v. 4. – P. 29–31. – URL: <http://www.rusnauka.com/books/2019-01-19-A4-tom-4+.pdf>
8. Duving, S. «Green» buildings in Russia and abroad / S. Duving // Bulletin «UNIDO in Russia». – 2017. – No. 8. – URL: http://www.unido-russia.ru/archive/num8/art8_17/

УДК 69.056.55:72.012

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

Зворыгина Светлана Владимировна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Городское строительство
и архитектура»
E-mail: gsia@pguas.ru

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

Penza State University of Architecture
and Construction

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

Zvorygina Svetlana Vladimirovna,
Candidate of Sciences,
Associate Professor of the department «Urban
construction and Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПЛИТНО-СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДАПТАЦИОННОГО МЕТОДА

С.В. Зворыгина, О.Л. Викторова

Рассматривается приложение адаптационного способа для определения рациональных геометрических параметров пространственных плитно-стержневых систем и распределения жесткостей по отдельным элементам. Определяются направление развития сечения, энергия нагружения от изгиба стержней в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Разработан модифицированный метод конечных элементов с формированием матрицы жесткости и вектора нагрузок всей системы.

Ключевые слова: адаптационный метод, алгоритм решения, конструктивные элементы, геометрические параметры, выбор параметров, пространственные системы, плитно-стержневые системы, жесткость конструкции

DETERMINATION OF RATIONAL GEOMETRICAL PARAMETERS OF SPATIAL PLATE-CORE SYSTEMS USING ADAPTIVE METHOD

S.V. Zvorygina, O.L. Viktorova

The application of an adaptive method for determining the rational geometric parameters of spatial plate-rod systems and the distribution of stiffness on individual elements is considered. The direction of the cross section, the energy of loading from the bending of the rods in two mutually perpendicular planes are determined. A modified finite element method with the formation of the stiffness matrix and the load vector of the entire system is developed.

Keywords: the adaptive method, the solution algorithm, structural elements, geometrical parameters, selection of parameters, the spatial system plate-rod system, the rigidity of the structure

Основная задача проектировщика состоит в определении рациональных геометрических параметров горизонтальных и вертикальных несущих элементов здания при действующих на эти элементы нагрузках. Как правило, для этого используется метод конечных элементов. При выполнении расчетов конструктивных систем необходимо установить зависимости между основными расчетными параметрами. Выявление общих закономерностей, происходящих в сложных конструктивных системах, как отмечалось в [1], позволяет в значительной степени облегчить решение задачи, а польза

системного подхода заключается в точном выборе системообразующего фактора, влияющего на формирование конструктивной системы в целом. При выполнении расчета система разбивается на отдельные элементы (стержневые и плоские). Каждому конечному элементу назначают жесткостные характеристики, которые зависят от вида материала и геометрических размеров конечного элемента. Таким образом, устанавливается взаимосвязь между жесткостью системы и геометрическими параметрами конструктивных элементов.

В практике проектирования сложных механических систем, состоящих из большого числа элементов, довольно часто возникает проблема рационального распределения жесткостей по отдельным элементам [2, 3]. Если система является пространственной и к тому же статически неопределимой, то задача еще более усложняется и сводится к выполнению серии расчетов, в которых по результатам расчета на текущей итерации производится корректировка жесткостей (линейных размеров сечений) элементов для последующих расчетов. Существующие подходы к решению подобных задач очень трудоемки и, кроме того, не дают полной уверенности в том, что полученная система является рациональной.

В данной статье рассмотрен подход к решению задачи определения рациональных геометрических параметров произвольных пространственных плитно-стержневых систем с применением адаптационного метода, опробованного на простых показательных примерах [2–6].

На начальном этапе применения адаптационного метода укрупненным элементам системы задают некоторые значения (толщины плит, сечения балок и колонн). Укрупненные элементы системы – плиты, балки, колонны – разбиваются на конечные элементы. Задача решается широко распространенным в настоящее время методом конечных элементов в форме метода Ритца. Формируется общая матрица жесткости, вектор нагрузок всей системы, и выполняется первичный расчет по формуле

$$\mathbf{K}^{(1)} \mathbf{q}^{(1)} = \mathbf{P}^{(1)} \Rightarrow \mathbf{q}^{(1)},$$

где \mathbf{K} – матрица жесткости системы, \mathbf{q} – вектор обобщенных координат, \mathbf{P} – матрица-столбец узловых внешних сил, приложенных по направлению обобщенных координат.

По найденным узловым перемещениям для укрупненных элементов вычисляется энергия нагружения по формуле

$$U_k^{(1)} = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^n q_r^{(1)T} k_r q_r^{(1)}, \quad r = 1, 2, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, m,$$

где n – общее число конечных элементов в укрупненном элементе (плите, балке, колонне); m – число укрупненных элементов в системе.

Определяется средняя плотность энергии нагружения для каждого укрупненного элемента:

$$\vartheta_k^{(1)} = \frac{U_k^{(1)}}{V_k^{(1)}},$$

где $U_k^{(1)}$ – энергия нагружения укрупненного элемента на первой итерации расчета; $V_k^{(1)}$ – объем укрупненного элемента на первой итерации расчета.

Из условия $U_k^{(1)} = \vartheta_k^{(1)} \cdot V_k^{(1)} = [\vartheta_k] \cdot V_k^{(2)}$ определяются параметры укрупненных элементов для следующего шага:

– для плит $V_k^{(1)} = A_k \cdot t_k^{(1)}, \quad V_k^{(2)} = A_k \cdot t_k^{(2)};$

$$t_k^{(2)} = \frac{\vartheta_k^{(2)}}{[\vartheta_k]} t_k^{(1)};$$

– для стержней $V_k^{(1)} = I_k \cdot A_k^{(1)}, \quad V_k^{(2)} = I_k \cdot A_k^{(2)};$

$$A_k^{(2)} = \frac{\vartheta_k^{(1)}}{[\vartheta_k]} A_k^{(1)},$$

где $[\vartheta_k]$ – нормируемая плотность энергии нагружения, зависящая от прочности материала укрупненного элемента.

Кроме того, для стержней важно определить, в каком направлении развивать сечение, т.е. найти отношение высоты к ширине $k=h/b$. Для этого отдельно находятся энергии нагружения от изгиба стержня в двух плоскостях:

$$U_x = \frac{1}{2} \frac{2EI_x}{l} \{\varphi_{nx} \ \varphi_{kx}\} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varphi_{nx} \\ \varphi_{kx} \end{Bmatrix} = \frac{EI_x}{l} (\varphi_{nx}^2 + \varphi_{nx}\varphi_{kx} + \varphi_{kx}^2);$$

$$\vartheta_{cp\ x} = \frac{U_x}{A \cdot l}, \quad \vartheta_{cp\ x} = \vartheta_{cp\ y};$$

$$\frac{\vartheta_{cp\ x}}{\vartheta_{cp\ y}} = \frac{I_x(\varphi_{nx}^2 + \varphi_{nx}\varphi_{kx} + \varphi_{kx}^2)}{I_y(\varphi_{ny}^2 + \varphi_{ny}\varphi_{ky} + \varphi_{ky}^2)} = 1;$$

$$\frac{I_x}{I_y} = \frac{h^2}{b^2} = k^2, \quad k = \sqrt{\frac{I_x}{I_y}} = \sqrt{\frac{(\varphi_{ny}^2 + \varphi_{ny}\varphi_{ky} + \varphi_{ky}^2)}{(\varphi_{nx}^2 + \varphi_{nx}\varphi_{kx} + \varphi_{kx}^2)}} = 1;$$

$$A = h \cdot b = k \cdot b^2 \Rightarrow b = \sqrt{\frac{A}{k}}.$$

При значительном преобладании изгиба в одной из плоскостей инерции необходимо ограничить величину k некоторым диапазоном значений, не допуская неограниченного развития сечения в одном из направлений осей инерции.

Вычислив новые геометрические параметры, перейдем к следующему шагу итерационного процесса. На n -й итерации алгоритм адаптационного метода состоит из следующих операций:

$$K^{(n)} q^{(n)} = P^{(n)} \Rightarrow q^{(n)}, U_k^n, \vartheta_k^n;$$

– для плит
$$t_k^{(n+1)} = \frac{\vartheta_k^{(n)}}{[\vartheta_k]} t_k^{(n)}; \quad t \in [t_1, t_2];$$

– для стержней
$$A_k^{(n+1)} = \frac{\vartheta_k^{(n)}}{[\vartheta_k]} A_k^{(n)}; \quad k, b, h; \quad h \in [h_1, h_2], \quad b \in [b_1, b_2].$$

Для апробации адаптационного метода решена задача по определению рациональных геометрических параметров пространственной плитно-стержневой системы, приведенной на рис. 1.

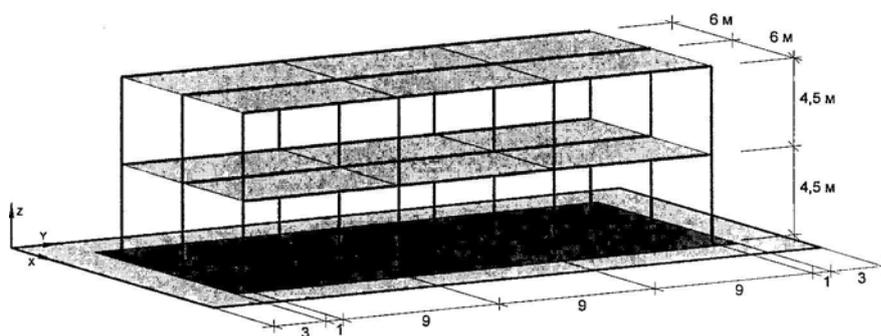


Рис. 1. Схема пространственной плитно-стержневой системы

Пространственная плитно-стержневая система располагается на сплошной фундаментной плите, лежащей на деформируемом основании. Деформируемое основание задано двухпараметрической моделью. Характеристики основания следующие: модуль деформации $E=8$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu=0,25$. Фундаментная плита и плиты перекрытия моделировались прямоугольными конечными элементами с 20 степенями свободы. Материал плиты перекрытия – железобетон класса В20: $E_{сск}=11500$ МПа;

$\sigma_{доп}=4,6$ МПа, $\mu=0,2$. Начальная толщина плит перекрытий 200 мм. Фундаментная плита из железобетона класса В15: $E_{сек}=6000$ МПа; $\sigma_{доп}=2,4$ МПа, $\mu=0,2$. Начальная толщина плиты 500 мм.

Колонны и балки смоделированы стержневыми элементами с 12 степенями свободы.

Материал балок и колонн – железобетон класса В20. Начальные размеры сечения стержневых элементов 300×300 мм. Размер ячейки сетки конечных элементов 1×1,125 м. Количество элементов 2012, порядок системы уравнений – 9336.

Система загружена равномерно распределенной нагрузкой на перекрытиях ($q=1000$ кг/м²) и собственным весом железобетонных элементов ($g=2500$ кг/м³).

По результатам определения плотности энергии деформации после расчета плитно-стержневой системы на первой итерации отмечено существенное увеличение общего объема системы в связи с тем, что сечения некоторых элементов были занижены и плотность энергии деформации в них превышала нормируемую величину. На последующих итерациях наблюдается уменьшение объема, причем интенсивность этого уменьшения снижается с увеличением числа итераций. Итерационный процесс прекращается, когда изменение объема на смежных итерациях становится несущественным. В приведенном примере изменение объема системы уже к четвертой итерации не превышало величины 0,01 %. Количество итераций аналогичных задач зависит от того, насколько близко располагаются начальные заданные геометрические параметры системы к рациональным. Изменение объема рассматриваемой в примере системы по итерациям представлено на рис. 2.

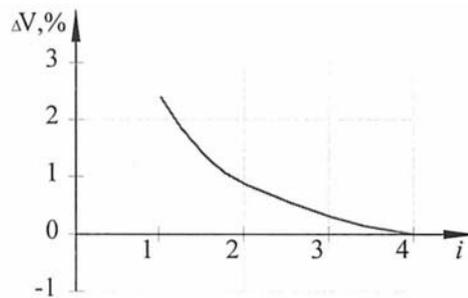


Рис. 2. Изменение объема системы по итерациям

В результате расчета получена система с подобранными геометрическими параметрами – размерами сечений стержневых элементов и толщинами плит перекрытий и фундаментной плиты (рис. 3).

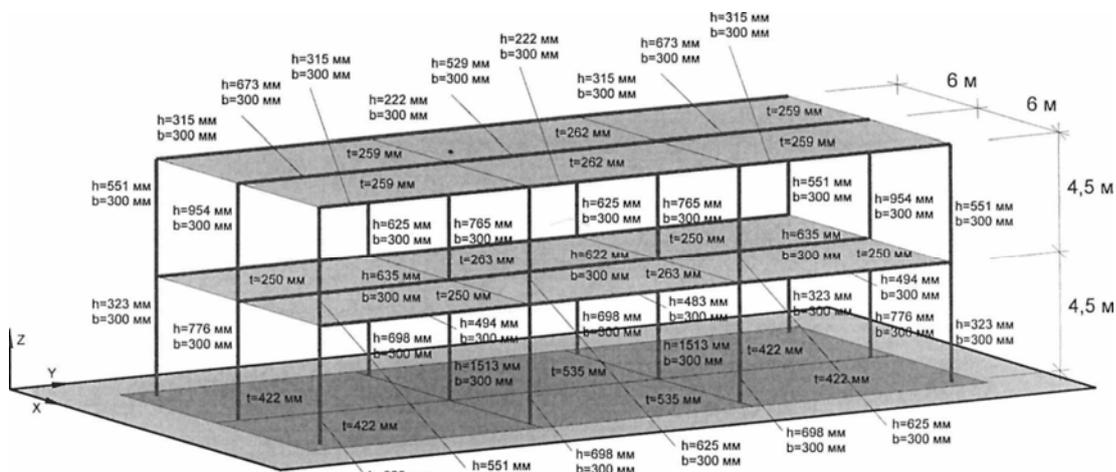


Рис. 3. Результаты расчета с определенными параметрами

Результаты расчета показали, что толщины плит перекрытий увеличились на 25–30 % по сравнению с первоначальными значениями. При этом толщина крайних плит на 5 % меньше толщины плит, расположенных в центре перекрытия. Ширина сечений балок и колонн ограничена величиной 0,3 м, что, судя по результатам расчета, для некоторых элементов является малой величиной и, например, для колонн среднего ряда привело к значительному увеличению высоты сечений. Поэтому в случае реального проектирования после корректировки ограничения $k=h/b$ необходимо выполнить повторный расчет. В целом объем сооружения увеличился на 10,5 % и составил $V=394,4 \text{ м}^3$.

На рис. 4–9 приведена деформированная схема и наглядно показана полная картина напряженно-деформированного состояния системы.

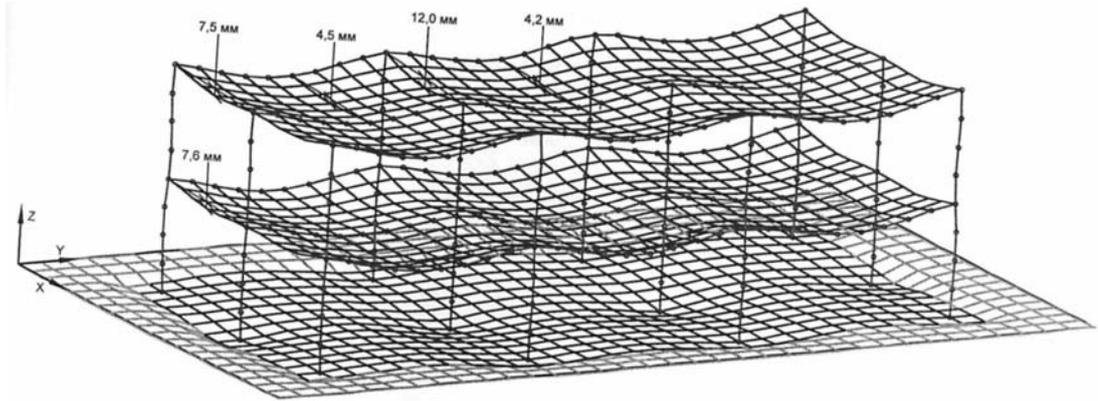


Рис. 4. Общая схема деформаций системы

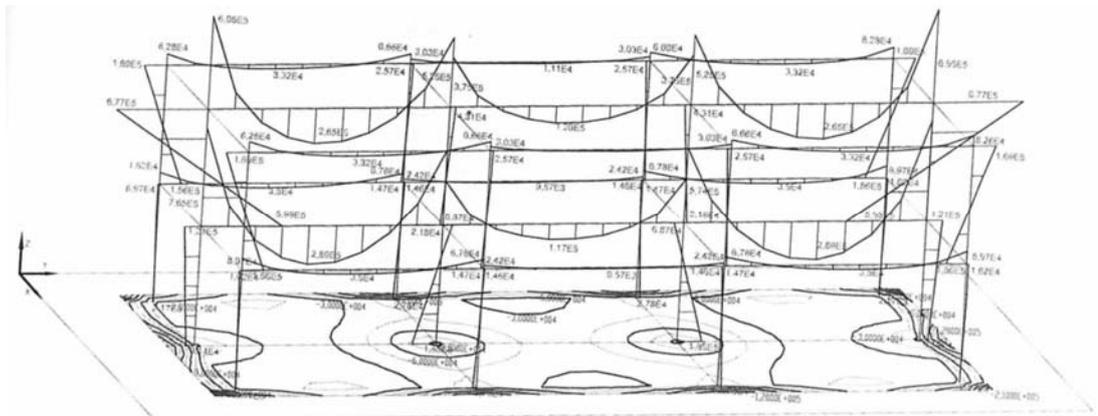


Рис. 5. Напряжения σ_x (Па) в элементах основания, изгибающие моменты M_x в стержнях

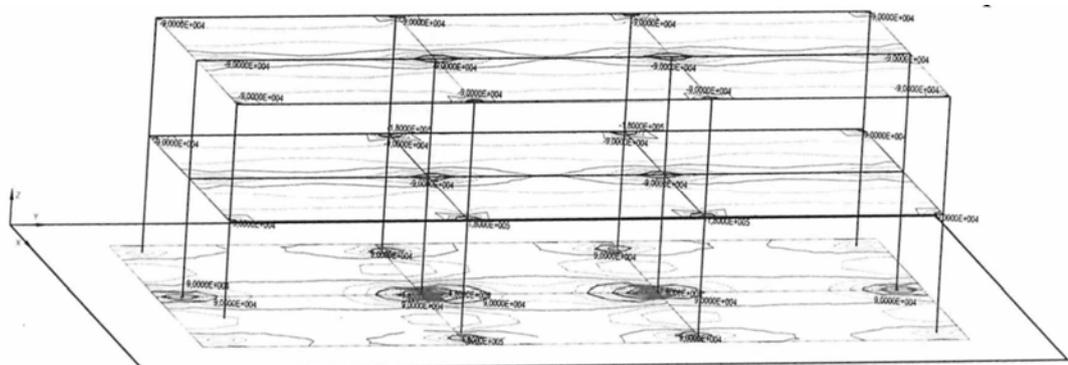


Рис. 6. Изгибающие моменты M_x в плитах (Н)

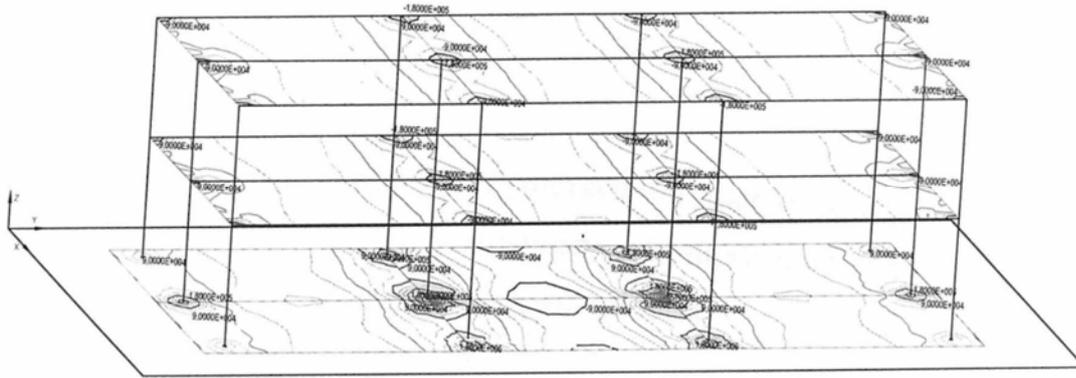


Рис. 7. Изгибающие моменты M_y в плитах (Н)

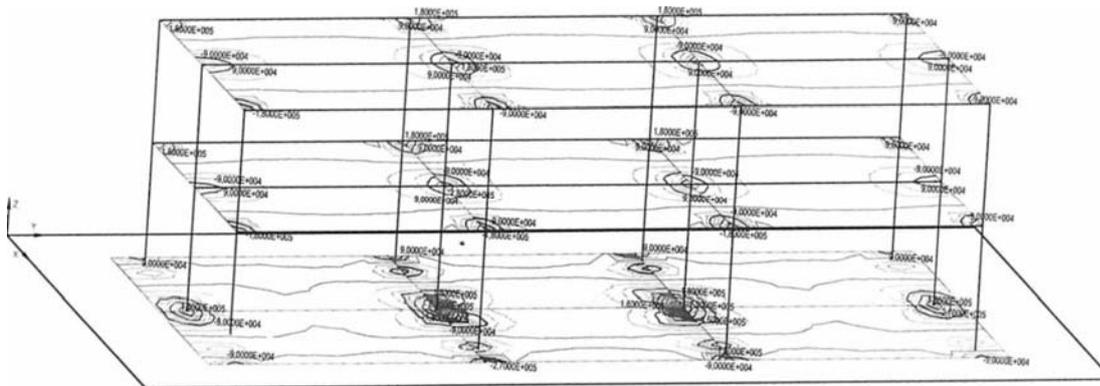


Рис. 8. Поперечные силы Q_x (Н/м)

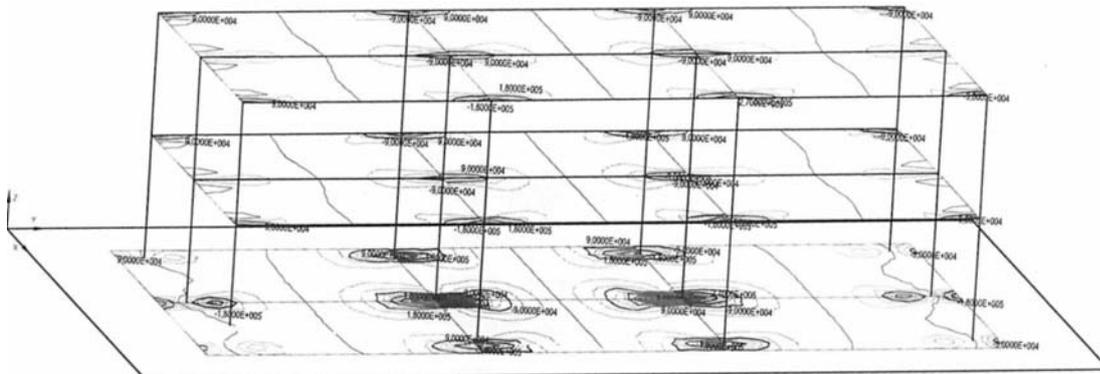


Рис. 9. Поперечные силы Q_y (Н/м)

Таким образом, приведенный пример показал, что предложенный адаптационный метод работает на сложных плитно-стержневых системах, позволяет подобрать рациональные геометрические параметры и определить систему, обладающую наибольшей жесткостью и экономичностью одновременно.

Выводы

1. Применение метода конечных элементов позволяет решать задачи по определению напряженно-деформированного состояния пространственных плитно-стержневых систем, но не обеспечивает подбор рациональных параметров.

2. Для определения рациональных геометрических параметров сложной пространственной плитно-стержневой системы предлагается использовать адаптационный метод совместно с методом конечных элементов.

3. Расчет пространственной плитно-стержневой системы по адаптационному методу позволяет получить систему с наибольшей жесткостью при наименьшем объеме, то есть экономически обоснованную.

Список литературы

1. Гарькина, И.А. Проектирование и оптимизация свойств сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №4(37). – С.5–10.
2. Васильков, Г.В. Адаптационные методы определения энергетически равнопрочных систем / Г.В. Васильков, С.А. Холькин // Известия вузов. Строительство. – 2002. – №10.
3. Васильков, Г.В. Эволюционные задачи строительной механики. Синергетическая парадигма / Г.В. Васильков. – Ростов н/Д: ИнфоСервис, 2003.
4. Васильков, Г.В. Новые вариационные принципы механики конструктивно нелинейных систем / Г.В. Васильков // Известия вузов. Естественные науки. – 2001. – №1.
5. Васильков, Г.В. О вариационных принципах и методах определения энергетически равнопрочных систем / Г.В. Васильков // Известия вузов. Естественные науки. – 2002. – №2.
6. Васильков, Г.В. Теория адаптивной эволюции механических систем / Г.В. Васильков. – Ростов н/Д: Terra-Принт, 2007.

References

1. Garkina, I.A. Design and optimization of the properties of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering. – 2018. – №4(37). – С. 5–10.
2. Vasilkov, G.V. Adaptive methods for the determination of energetically equal-strength systems / G.V. Vasilkov, S.A. Holkin // News universities. Construction. – 2002. – №10.
3. Vasilkov, G.V. The evolution of the problem of structural mechanics. Synergetic paradigm / G.V. Vasilkov. – Rostov-on-Don: Infoservice, 2003.
4. Vasilkov, G.V. New variational principles of mechanics of structurally nonlinear systems / G.V. Vasilkov // News universities. Natural science. – 2001. – No. 1.
5. Vasilkov, G.V. On variational principles and methods for determining energy-equal-strength systems / G.V. Vasilkov // News universities. Natural science. – 2002. – No. 2.
6. Vasilkov, G.V. Theory of adaptive evolution of mechanical systems / G.V. Vasilkov. – Rostov-on-Don: Terra-Print. – 2007.

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

ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ И СХЕМЫ РАЗРУШЕНИЯ РОСТВЕРКОВ ПОД КОЛОННУ С МНОГОРЯДНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ СВАЙ

М.В. Кочеткова

Приведены данные физического эксперимента железобетонных ростверков под колонну с многорядным расположением свай. Выявлен характер образования и развития трещин при изменении основных факторов (схема приложения нагрузки, процент и схема армирования, перемещение свай и частичное исключение их из работы). Представлена классификация трещин. Описаны три схемы разрушения ростверков: по сжатой зоне, по растянутой зоне, смешанное разрушение.

Ключевые слова: трещинообразование, схемы разрушения, ростверки под колонну, многорядное расположение свай, напряжённо-деформированное состояние, физический эксперимент

CRACKING AND DESTRUCTION SCHEME OF GRILLAGE UNDER THE COLUMN WITH MULTI-ROW PILES ARRANGEMENT

M.V. Kochetkova

The data of physical experiment of reinforced concrete grillages under the column with multi-row arrangement of piles are presented. The character of formation and development of cracks at change of the main factors (the scheme of application of loading, percent and the scheme of reinforcement, movement of piles and their partial exclusion from work) is revealed. The classification of cracks is presented. Three schemes of destruction of foundations: on the compressed area, in the stretched zone and mixed failure are described.

Keywords: crack formation, fracture schemes, grillage under the column, multi-row arrangement of piles, stress-strain state, physical experiment

На трещинообразование в ростверках влияют многие факторы. Ростверки под колонны можно разделить на две основные группы: ростверки с количеством свай от двух до четырех; ростверки с многорядным расположением свай, т.е. с количеством свай более четырех. При переходе от двухсвайных ростверков к трех- и четырехсвайным появляется пространственный характер работы конструкции, изменяется характер распределения нормальных напряжений над сваями и в пролете между сваями [1–3]. При дальнейшем увеличении количества опор разрушающая сила и характер работы ростверка тоже несколько меняются [4–6].

Опираясь на экспериментальные исследования [7], рассмотрим образование и развитие трещин в 6- и 8-свайных ростверках при изменении следующих факторов: процент армирования растянутой зоны, концентрированное расположение арматуры

над сваями, несимметричное нагружение, работа всех свай или частичное исключение свай из работы, перемещение свай.

Несимметричная схема нагружения ростверка с уменьшением размеров поперечного сечения колонны. Испытаны образцы РК-1, РК-1в (рис. 1, 2). У них одинаковые размеры в плане (110×60 см), количество арматурных стержней и их расположение, равное количество опор – 8 штук. В образце РК-1в, когда нагрузка передавалась с эксцентриситетом 5 см, трещины начали появляться при нагрузке 450 кН. В образце РК-1 подобная трещина образовалась при нагрузке 750 кН, что составляет разницу в 1,6 раза.

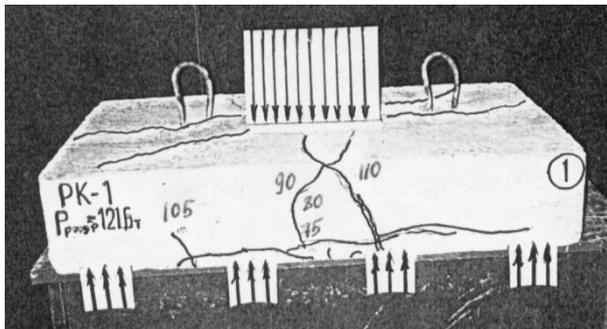


Рис. 1. Образование трещин в образце РК-1 (разрушение по сжатой зоне бетона)

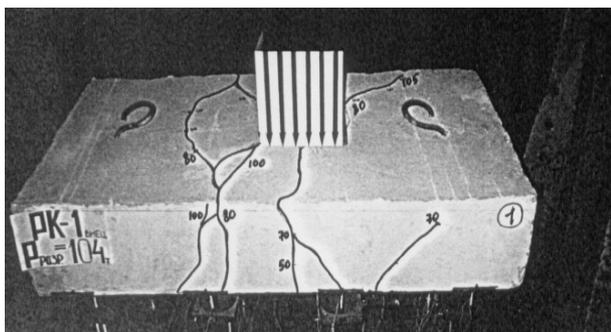


Рис. 2. Образование трещин в образце РК-1в (разрушение по сжатой зоне бетона)

Разрушение образцов произошло по сжатой зоне бетона. Наклонные трещины, образованные у центральных опор, стали наиболее опасными. Так, уменьшение площади грузовой площадки и её смещение относительно центра привели к более раннему появлению трещин в той части ростверка, где был эксцентриситет. Отсутствие трещин у крайних опор можно объяснить малой загруженностью этих участков.

Изменение процента армирования. Испытаны две пары образцов (рис. 1) [3–5]. Первая пара РК-1 и РК-2 с размерами в плане 110×60 см, каждый на восьми опорах. Вторая пара образцов РК-3 и РК-6 с размерами 80×60 см на шести опорах. Ростверки РК-1 и РК-3 запроектированы с завышенным процентом армирования: 1,2 % и 1,6 % соответственно. Ростверки РК-2 и РК-6 – с заниженным процентом армирования – 0,18 %.

В образце РК-2 начало образования трещин наблюдалось при нагрузке $P=0,42 P_{\text{разр}}$ по длинной стороне ростверка: нормальные трещины между центральными сваями и наклонные трещины, исходящие от центральных опор по направлению к крайним (рис. 3). При нагрузке $P=0,93 P_{\text{разр}}$ появилась трещина в поперечном направлении между сваями. На подошве ростверка наблюдалась серия трещин в средней части ростверка вдоль арматурных стержней. В зоне крайних свай трещины отсутствуют (рис. 3).

В образце РК-3 (рис. 4) первыми образовались наклонные трещины у крайних опор при нагрузке 0,3–0,35 от $P_{\text{разр}}$. Трещины появились в середине высоты ростверка, а затем росли вверх и вниз по направлению к колонне и опорным площадкам. Появление данных наклонных трещин можно объяснить началом разрушения бетона в этих

зонах. Несмотря на небольшую ширину раскрытия, эти трещины оказались критическими для шестисвайного ростверка. По сравнению с восьмисвайным ростверком есть некоторые отличительные особенности. Первая состоит в том, что в шестисвайном ростверке отсутствуют трещины у средних опор. При этом на поверхности образовались трещины, выделяющие сжатую зону и расположенные внутри этой зоны.

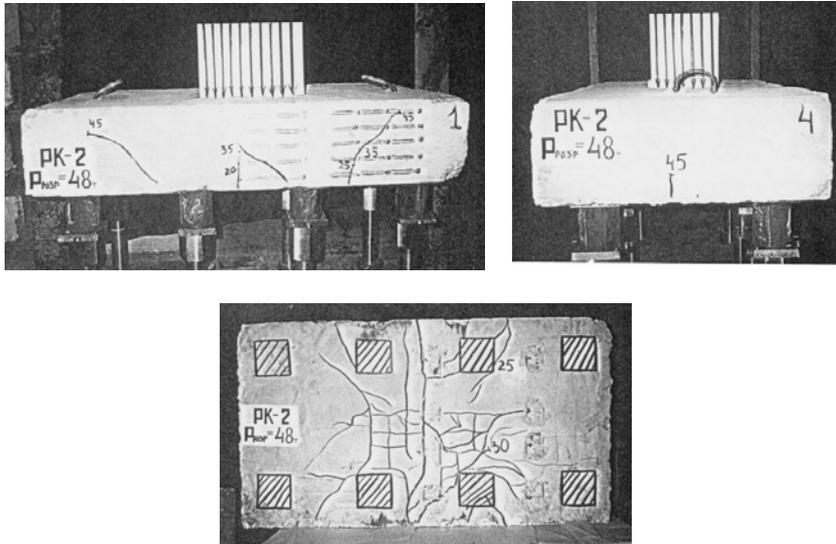


Рис. 3. Образование трещин в образце РК-2 (разрушение по растянутой зоне)

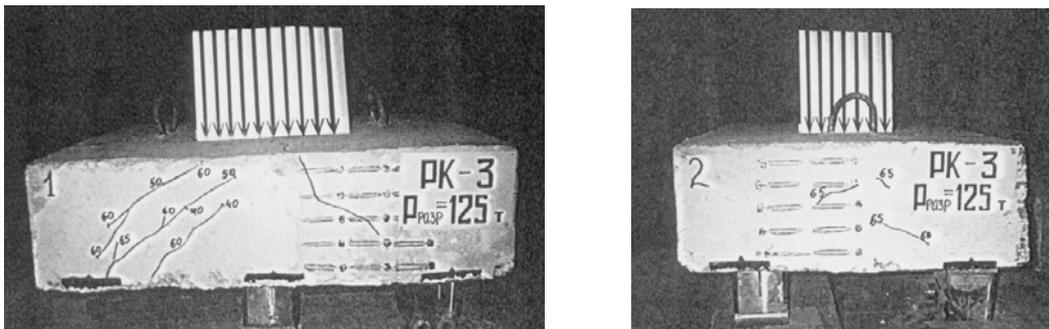


Рис. 4. Образование трещин в образце РК-3 (разрушение по сжатой зоне бетона)

В образце РК-6 первыми образовались трещины над центральными сваями при нагрузке $P = 0,5 P_{\text{разр}}$. Их рост наблюдался до нагрузки, равной $0,87$ от $P_{\text{разр}}$. При $P = 0,62 P_{\text{разр}}$ появились трещины в пролетах в продольном и поперечном направлениях (рис. 5). С дальнейшим увеличением нагрузки трещины в поперечном направлении продолжали развиваться и явились критическими для данного образца. На подошве ростверка можно наблюдать серию трещин возле средних опор, что объясняется наибольшими напряжениями в данной зоне.

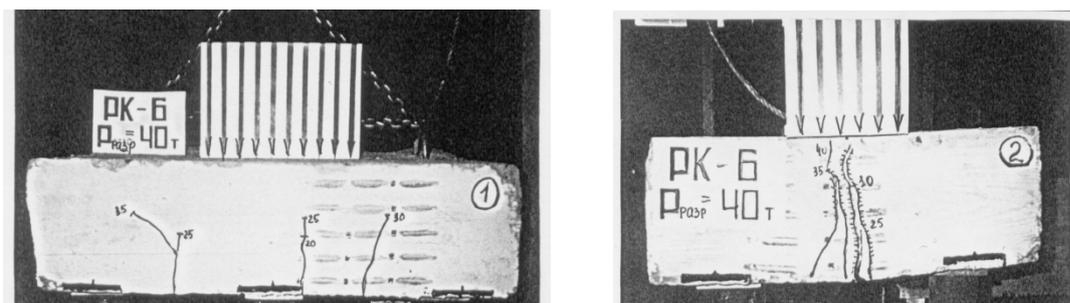


Рис. 5. Образование трещин в образце РК-6 (разрушение по растянутой зоне)

Армирование растянутой зоны ростверка влияет на схему разрушения ростверка, на его прочность. Однако во многих образцах первыми появляются трещины в пролетах между сваями, независимо от процента армирования, при нагрузке $P=(0,4\div 0,6)P_{\text{разруш}}$. В сильноармированных образцах их рост быстро прекращается, а в малоармированных ростверках эти трещины являются разрушающими. В результате эксперимента с 6-свайными ростверками, когда процент армирования был увеличен с 0,18 % до 1,6 % , разрушающая сила повысилась в 3 раза; в 8-свайных ростверках с увеличением процента армирования с 0,18 % до 1,2 % разрушающая сила повысилась в 2,2 раза.

Изменение схемы армирования (концентрация арматуры над опорами). Минимальный процент армирования (0,18 %) у нижней грани ростверка даёт возможность исследовать влияние различных схем армирования на прочность растянутой зоны. Выявлено, что при концентрации стержней над сваями (образец РК-5) разрушающая сила повышается в 1,17 раза по сравнению с равномерным армированием сеткой (РК-2), несмотря на одинаковый процент армирования.

Перемещение свай и частичное выключение свай из работы: образцы РК-6, РК-4. Образец РК-4 с минимальным количеством арматуры в виде сетки устанавливался на 4 опоры, две из которых были ниже на 10 мм. Первые трещины появились при нагрузке $P = 0,4 P_{\text{разр}}$ у опор, не имеющих перемещений при нагрузке, впоследствии они и стали критическими (рис. 6).

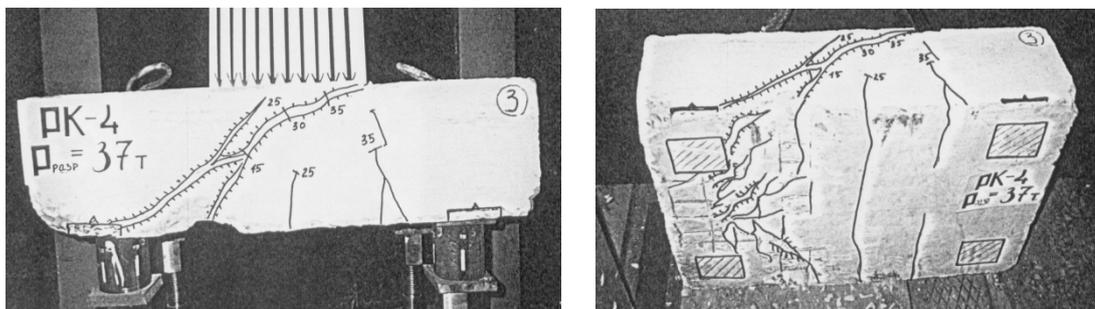


Рис. 6. Образование трещин в образце РК-4 (смешанное разрушение: по сжатой и растянутой зонам одновременно)

Выключение из работы некоторых свай: образцы РК-3, РК-7. Образец РК-7 с процентом армирования 1,6 % испытан на двух центральных опорах. Первые трещины появились при $P=0,5 P_{\text{разруш}}$. Характерными являются трещины от местного действия нагрузки у внутренней грани свай.

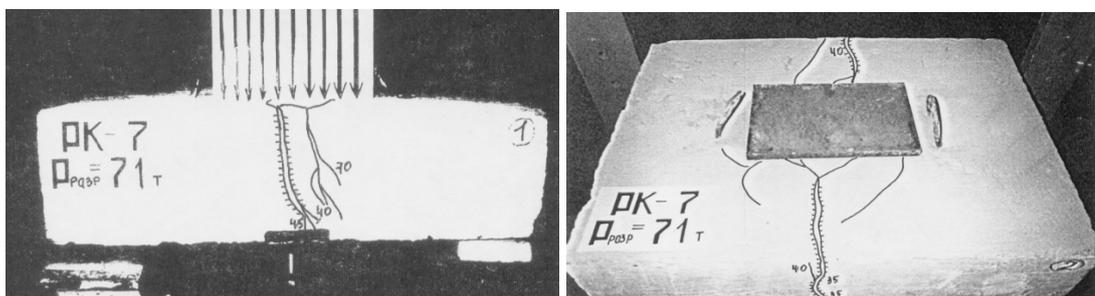


Рис. 7. Образование трещин в образце РК-7 (разрушение по сжатой зоне)

На основе данных исследований произведена классификация трещин:

1) Вертикальные (нормальные) трещины в растянутой зоне Т-нР и Т-Р, наблюдаемые в пролетах в продольном (Т-нР) и поперечном (Т-Р) направлениях. Как правило, появляются первыми, независимо от вида и процента армирования. При разрушении по растянутой зоне эти трещины являются критическими (рис. 8).

2) Наклонные граничные трещины Т-Г, развивающиеся от опор.

При большом проценте армирования они развиваются от внутренней грани сваи до колонны с увеличением ширины раскрытия и ростом в глубине ростверка, становясь при этом критическими. При малом проценте армирования трещины Т-Г развиваются почти до верха ростверка, но при этом не являются разрушающими. Дугообразная траектория граничных трещин выделяет участки ростверка над наиболее нагруженными центральными сваями, как в продольном, так и в поперечном направлениях.

3) Наклонные трещины Т-С характеризуют разрушение сжатых бетонных полос, развиваются внутри ростверка, в зонах между колонной и сваями (рис. 8).

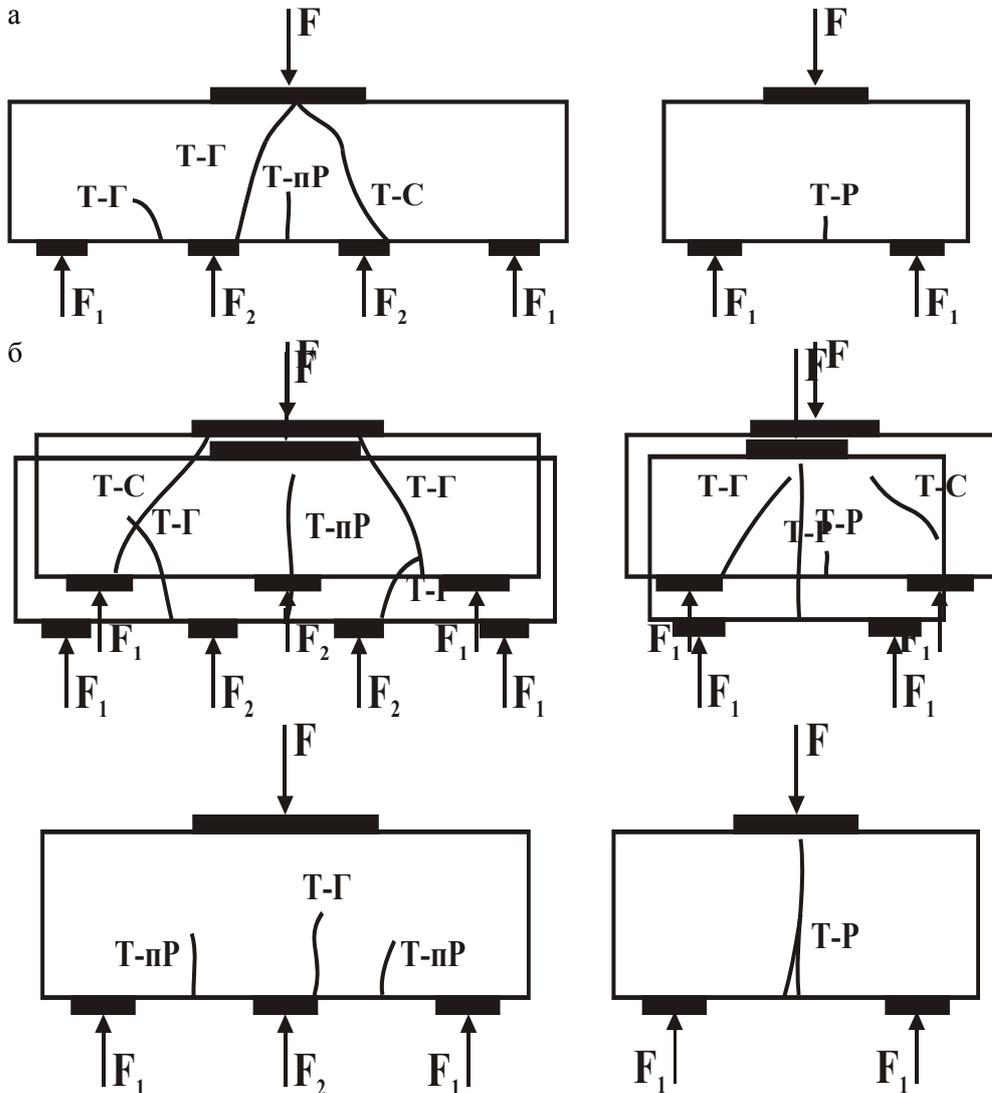


Рис. 8. Классификация трещин. Схемы разрушения для шести- и восьмисвайных ростверков: а – по сжатой зоне; б – по растянутой зоне

Характер трещинообразования ростверков при многорядном расположении свай имеет свои особенности и отличается от трещинообразования в других ростверковых конструкциях. Например, в 4-свайных ростверках были выявлены трещины Σ T-С в виде серии прерывистых трещин, характерных при раздавливании бетона [7]. В наших образцах таких трещин не наблюдалось. Пространственное расположение сжатой полосы бетона существенно влияет на время появления трещин на поверхности ростверка. Поэтому можно наблюдать отсутствие трещин на поверхности ростверка, несмотря на рост внешней нагрузки. Очевидно, по мере увеличения нагрузки в наклонных сжатых полосах ростверка накапливаются микротрещины. При этом

остаётся запас прочности у ростверка примерно 15 % за счёт эффекта пространственной работы ростверка. Микротрещины, развиваясь, выходят на поверхность ростверка уже к моменту его разрушения. В связи с этим при моделировании напряжённо-деформированного состояния ростверков под колонну с многорядным расположением свай следует учитывать влияние окружающего бетона с помощью коэффициента.

В результате экспериментальных исследований получены три схемы разрушения.

Разрушение по сжатой зоне. Признаком разрушения являются наклонные трещины, которые образуются в бетоне между колонной и сваями-опорами.

Разрушение по растянутой зоне. Признаком разрушения являются трещины, активно развивающиеся в пролётах между сваями и на нижней грани ростверка с разделением ростверка вертикальными трещинами.

Смешанное разрушение, т.е. разрушение ростверков по сжатой и растянутой зонам одновременно. Признаком разрушения являются трещины, которые активно развиваются над сваями-опорами и в пролёте между ними.

Усилия образования трещин и усилия, при которых произошло разрушение испытанных образцов, показаны в таблице.

| № п/п | Марка образца | Бетон | | | Класс арматуры | Кол-во опор, участвовавших в работе | Опытные величины | | | | Разрушение F_{test} , кН |
|-------|---------------|-------------|----------------------------|----------------|----------------|-------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|----------------------------|
| | | R_b , МПа | $E_b \times 10^{-3}$, МПа | R_{bb} , МПа | | | Образование трещин | | | | |
| | | | | | | | F_{T-nP} | F_{T-P} | F_{T-G} | F_{T-C} | |
| 1 | РК-1 | 10,5 | 19,2 | 0,86 | А-3 | 8 | 750 | 900 | 1100 | - | 1215 |
| 2 | РК-1В | 12,2 | 20,6 | 0,94 | А-3 | 8 | 450 | - | 700 | 750 | 1041 |
| 3 | РК-2 | 12,2 | 20,6 | 0,94 | Вр-1 | 8 | 200 | 450 | 250 | - | 480 |
| 4 | РК-5 | 12,2 | 20,6 | 0,94 | Вр-1 | 8 | 200 | 300 | 350 | - | 540 |
| 5 | РК-3 | 12,2 | 20,6 | 0,94 | А-3 | 6 | - | - | 400 | 600 | 1250 |
| 6 | РК-6 | 10,2 | 18,8 | 0,84 | Вр-1 | 6 | 250 | 250 | 200 | - | 400 |
| 7 | РК-4 | 10,2 | 18,8 | 0,84 | Вр-1 | 4 | 150 | 160 | 160 | - | 370 |
| 8 | РК-7 | 10,2 | 18,8 | 0,84 | А-3 | 2 | - | - | - | 350 | 710 |

Выводы

Напряжения в растянутой зоне имеют максимальные значения в центральной части ростверка и уменьшаются по мере отдаления свай от колонны.

Концентрация арматуры над сваями-опорами без изменения процента армирования ростверка способствует повышению разрушающей силы.

Увеличение процента продольного армирования повышает разрушающую силу. При увеличении диаметра продольной арматуры в 2–2,5 раза прочность возрастает в 2,6 раза.

Список литературы

1. Снежкина, О.В. Короткие балки. Моделирование физической работы / О.В. Снежкина, М.В. Кочеткова, А.В. Корнюхин. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 122 с.
2. Скачков, Ю.П. Определение схем разрушения и трещинообразования коротких железобетонных балок по экспериментальным данным / Ю.П. Скачков, О.В. Снежкина, М.В.Кочеткова, А.В. Корнюхин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 74–81.
3. 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.
4. Кочеткова, М.В. Совершенствование методов расчёта многорядных свайных ростверков под колонны / М.В. Кочеткова, О.В. Снежкина, А.В. Корнюхин. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 139 с.

5. Корнюхин, А.В. Экспериментально-теоретические исследования толстых плит / А.В. Корнюхин, М.В. Кочеткова, О.В. Снежкина. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 131 с.
6. Скачков, Ю.П. Оценка напряжённо-деформированного состояния железобетонных ростверков / Ю.П. Скачков, А.В. Корнюхин, О.В. Снежкина, М.В. Кочеткова // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 1. – С. 72–76.
7. Кочеткова, М.В. 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.

References

1. Snezhkina, O.V. Short beams. Modeling physical work / O.V. Snezhkina, M.V. Kochetkova, A.V. Kornukhin. – Penza: PGUAS, 2011. – 122 p.
2. Skachkov, Y.P. To identify the patterns of destruction and fracturing of short reinforced concrete beams based on the experimental data / Y.P. Skachkov, O.V. Snezhkina, M.V. Kochetkova, A.V. Kornukhin. // Regional architecture and engineering. – 2013. – № 3. – P. 74–81.
3. Skachkov, Y.P. Scheme of destruction and cracking of raft grillage of pile foundations under the columns / Y.P. Skachkov, V.N. Mishchenko, O.V. Snezhkina. // Regional architecture and engineering. – 2016. – № 2 (27). – P. 87–92.
4. Kochetkova, M.V. Improvement of methods for calculating multilayer pile grilles for columns / M.V. Kochetkova, O.V. Snezhkina, A.V. Kornukhin. – Penza: PGUAS, 2011. – 139 p.
5. Kornukhin, A.V. Experimental and theoretical study of thick plates / A.V. Kornukhin, M.V. Kochetkova, O.V. Snezhkina. – Penza: PGAS, 2013. – 131 p.
6. Skachkov, Y. P. Estimation of stress-strain state of reinforced concrete pile caps / Y.P. Skachkov, A.V. Kornukhin, O.V. Snezhkina, M.V. Kochetkova // Regional architecture and engineering. – 2014. – № 1. – P. 72–76.
7. 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.

УДК 691:519.7

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

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

Penza State University of Architecture
and Construction

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

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

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

ЕДИНАЯ КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

И.А. Гарькина, А.М. Данилов

Предлагается единая концепция системного проектирования сложных систем в приложении к формообразованию архитектурно-пространственных конструкций и строительных материалов на основе разработки иерархической структуры критериев качества. Определяются требования к декомпозиции системы, исходя из необходимости агрегирования частей в целостную систему. Рассматриваются методы аналитического описания задач на разных этапах. Указываются пути преодоления неопределенности целей при многокритериальном синтезе систем различной природы. Результаты реализации предложенного подхода подтвердили его эффективность.

Ключевые слова: сложные системы, системное проектирование, методологические принципы, комбинированные пространственные конструкции, строительные материалы, формообразование, модульный принцип

UNIFIED CONCEPT OF SYSTEM DESIGN OF COMPLEX SYSTEMS

I.A. Garkina, A.M. Danilov

A unified concept of system design of complex systems is proposed in the application to the form formation of architectural and spatial structures and building materials based on the development of a hierarchical structure of quality criteria. The requirements for system decomposition are determined based on the need for aggregation of parts into an integral system. The methods of analytical description of tasks at different stages are considered. The ways of overcoming the ambiguity of goals in the case of multicriterial synthesis of systems of various nature are indicated. The results of the implementation of the proposed approach confirmed its effectiveness.

Keywords: complex systems, system design, methodological principles, combined spatial structures, building materials, form formation, modular principle

Системный подход к разработке сложных систем позволяет целостно охватить многосторонние аспекты функционирования систем в их взаимосвязи [1...6]. Творческий подход к разработке определяется учетом требований к конечному результату, который оценивается на основе множества критериев. Рациональное *формообразование* предполагает преодоление узкой специализации на основе сотрудничества конструктора, архитектора, материалововеда, технолога, что позволит обеспечить *комплексное решение целостной проблемы* (реализация архитектурного замысла, соответствие материальным возможностям, технологическое исполнение в условиях взаимодей-

ствия с внешней средой, соблюдение требований к надежности и комфортности эксплуатации). Объединяющей основой при разработке *общих и частных критериев* является *системный подход*. Он применяется, в частности, при формообразовании строительных конструкций. Здесь создание комбинированных пространственных конструкций предполагает обеспечение наиболее выгодных условий работы для каждого из используемых материалов (повышает эффективность конструкции по сравнению с конструкциями из мономатериалов). Так, при четко выраженных законах сжатия и растяжения «... существенный экономический эффект может быть достигнут, если взамен мономатериала использовать, например, в сжатой зоне – железобетон, дерево или другой композитный материал, а в растянутой – сталь» [7]. Естественно, архитектурно-конструктивное решение органически впишется в окружающую человека предметно-пространственную среду только при проектировании на основе принципа единства, неразрывной *связи формы и содержания* (нельзя принижать или преувеличивать значение формы, чтобы не скатиться ни к функционализму, ни к формализму; должна быть гармония). Технический эффект приобретает *функциональность* (социально-культурная значимость) исходя из определенной человеческой потребности. Проявление прекрасного во внешних образах (*эстетичность*) обеспечивает социальную эффективность объекта. С другой стороны, по степени его изящности судят о степени совершенства самой конструкции. Эстетичность достигается методами *художественного проектирования* (дизайна), цель которого – достичь единства формы (художественного восприятия) и содержания (функционального назначения и технической целесообразности). Внешний вид изделия (*стилизм*) может создавать иллюзии изменения потребительских свойств (за счет дизайнерских решений достигается до 60 % удовлетворения потребностей в новых технических решениях). *Функционализм* предполагает подчинение эффективности функционирования и базируется на знании принципов конструирования и технологичности, которые и определяют будущие формы разрабатываемого изделия.

Одним из основных принципов композиционного моделирования является принцип выразительности формы, позволяющий в спроектированной форме получить информацию о социальной значимости объекта. Выразительность (художественная и информационная) и композиционная целостность являются двумя из трех основных принципов совершенствования изделия на всех стадиях его создания. Третьим принципом является рациональность объекта (отражает соответствие формы изделия его назначению, способу работы с ним, конструктивному решению, особенностям технологии изготовления и примененным материалам). Целостность предполагает обоснованность формы объекта его содержательностью и осмысленностью (эстетическое свойство, характеризующее завершенность образа).

При проектировании системы для получения эффективных результатов используется не любое решение задачи, а наилучшее среди допустимых при наличии правила предпочтения одного другому; оптимальное решение – при наличии хотя бы одного критерия и не менее двух сравниваемых вариантов (необходимость выбора). Оптимальность по одному критерию не всегда будет достигнута по другому критерию. *Качество системы* характеризуется рядом показателей: состав зависит от назначения проектируемого объекта, условий его функционирования и других факторов. Стремление максимально полно охарактеризовать проектируемый объект делает задачу проектирования практически не разрешимой; *требуется селекция главных и ранжирование показателей, отражающих наиболее существенные свойства объекта* (критериальный подход к проектированию – определение эффективных решений с указанием причин их выбора). Показатели должны быть *количественными*, выбираться с учетом простоты определения, измерения и контроля; наглядности отображения свойств системы; чувствительности к изменению свойств; устойчивости к случайным помехам. Эффективность решения задачи зависит и от того, насколько полно учтены все связи как между частями рассматриваемого объекта, так и с взаимодействующими с ним другими объектами. *Качество проектируемого объекта определяется выбранным принципом действия, предложенной структурой и соотношением параметров.*

Разработка системы начинается с постановки задачи и формирования технического задания (совместно с заказчиком). *Структура* определяется выбранным *принципом действия*. На этапе *параметрического синтеза* отыскиваются значения параметров объекта, находится численное решение проектной задачи. Возможна необходимость разработки дополнительных частей. *Вследствие неполноты начальных знаний процесс проектирования итерационен*; ведется в условиях информационного дефицита: неопределенность устраняется выполнением итерационных процедур. Число циклов итераций зависит от степени неопределенности начальной постановки задачи, ее сложности, опыта и квалификации проектировщика, требуемой точности решения. *В процессе приближений возможно не только уточнение, но и отказ от первоначальных предположений*. Нередко проектирование направлено на совершенствование конструкции путем введения в нее отдельных новых или дополнительных элементов взамен морально устаревших и не удовлетворяющих современным требованиям, либо с целью изменения прежних характеристик системы в целом: уточняются новые требования к конструкции; определяются элементы конструкции, препятствующие удовлетворению этих требований; осуществляется поиск путей по усовершенствованию данных элементов или их замены.

Требования к отдельным частям определяются при *нисходящем проектировании* (последовательно от общих черт проектируемого объекта к детальным частным). Эффективность решения задачи зависит от того, насколько полно учтены все связи как между частями рассматриваемого объекта, так и с взаимодействующими с ним другими объектами; единство частных свойств которых и образует качественно новые свойства объекта. *Человек рассматривается в качестве одной из взаимодействующих систем*. Учет этапов жизненного цикла (период от возникновения потребности в создании объекта до его ликвидации вследствие исчерпания потребительских качеств) позволяет уменьшить издержки, рационально спланировать деятельность по созданию и обслуживанию объекта. Необходимо учитывать историю и предусматривать перспективы развития и применения разрабатываемого объекта, а также областей науки и техники, на достижениях которых базируются соответствующие разработки.

После декомпозиции каждое расчленение образует свой уровень. Исходная система располагается на нулевом уровне. После ее расчленения получают подсистемы первого уровня. Расчленение подсистем или некоторых из них приводит к появлению подсистем второго уровня и т.д. Количество уровней определяется требованиями обзорности и удобства восприятия получаемой *иерархической структуры, ее соответствия уровням знаний*: иерархическая структура всегда субъективно ориентирована; для более квалифицированного специалиста она будет менее подробна. Число уровней иерархии влияет на обзорность структуры: много уровней – задача трудно-обозримая, мало уровней – возрастает число находящихся на одном уровне подсистем и сложно установить между ними связи. Обычно, в зависимости от сложности системы и требуемой глубины проработки, выделяют до 6 уровней [1, 2, 8, 9]. В процессе проектирования *декомпозиция неразрывно связана с последующим агрегированием подсистем в единую систему* с проверкой на реализуемость в целом, совместимость и согласованность параметров (*восходящее проектирование*). В процессе согласования может возникать потребность в новой, *корректирующей декомпозиции*.

При определении количественных характеристик взаимосвязанных входных и выходных исследуемых параметров можно использовать *регрессионные модели* (основаны на разложении искомой функции в ряд с удержанием одного (линейная зависимость, линия регрессии) или нескольких (нелинейные зависимости) членов разложения (ряды Фурье, Тейлора)). Степень взаимосвязанности факторов и выходных параметров определяется на основе корреляционного анализа результатов испытаний. При обработке или использовании экспериментальных данных, представленных в табличном виде, для получения промежуточных значений можно применять методы линейной и нелинейной (полиномиальной) интерполяции и экстраполяции и т.д.

Поиск оптимальных параметров объекта в рамках его заданных принципа действия и структуры производится на основе решения задач скалярной оптимизации, вариаци-

ционного исчисления (критерий описывается функционалом), линейного программирования (критерий и условия, накладываемые на решение задачи, являются линейными функциями параметров), нелинейного программирования; полного или частичного перебора [9, 10]. В большинстве случаев в силу противоречивости критериев абсолютно лучшее решение выбрать невозможно; выбранное решение всегда будет компромиссным. Компромисс разрешается введением тех или иных дополнительных ограничений или субъективных предположений. Поэтому невозможно говорить об объективном единственном решении такой задачи. Многокритериальная оптимизация [10, 11] может производиться рядом известных способов (поиск решений, оптимальных по Парето, метод последовательных уступок, построение обобщенного критерия качества и т.д.).

Эффективность предложенной единой концепции системного проектирования сложных систем подтвердилась при разработке ряда композиционных материалов и строительных конструкций [2, 12...14].

Список литературы

1. Данилов, А.М. Сложные системы: идентификация, синтез, управление / А.М. Данилов, И.А. Гарькина. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 308 с.
2. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: МГСУ: Библиотека научных разработок и проектов, 2012. – 432 с.
3. Вознесенский, В.А. Рецептурно-технологические поля свойств материала в компьютерном строительном материаловедении / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко // Строительные материалы. – 2006. – №7. – С. 8–11.
4. Сапрыкина, Н.А. Основы динамического формообразования в архитектуре / Н.А. Сапрыкина. – М.: Архитектура-С, 2005. – 312 с.
5. Garkina, I.A. Construction survey objects agro industrial complex with system approach / I.A. Garkina, I.N. Garkin, S.V. Klyayev // Advances in Engineering Research (AER). – 2017. – Vol. 102. – P.274–277.
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.60–63.
7. Абовский, Н.П. Формообразование строительных конструкций: монография / Н.П. Абовский, Л.В. Енджиевский, И.С. Инжутов, С.В. Деордиев, В.И. Палагушкин. – Красноярск: СФУ, 2013. – 184 с.
8. Данилов, А.М. Гомеостатическая концепция моделирования систем в строительном материаловедении / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, Д.С. Сорокин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 4. – С. 24–30.
9. Garkina I.A. Mathematical Methods of System Analysis in Construction Materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – №245. –P.062014.
10. Данилов, А.М. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем: монография / А.М. Данилов, И.А. Гарькина. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 168 с.
11. Данилов, А.М. Полиномиальные модели в прогнозировании свойств композитов: состояние, перспективы / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №2(35). – С.50–54.
12. Garkina, I.A. Modeling of Building Materials as Complex Systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, Y.P. Skachkov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 730. – P.412–417.
13. Бормотов, А.Н. Принцип Парето в управлении качеством материалов / А.Н. Бормотов, А.П. Прошин, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2002. – № 11. – С. 42–51.

14. Garkina, I.A. Methodological principles design of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.A. Budylna // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2016. – №11(11). – P. 2524–2527.

References

1. Danilov, A.M. Complex systems: identification, synthesis, control / A.M. Danilov, I.A. Garkina. – Penza: PGUAS, 2011. – 308 p.
2. Bazhenov, Yu.M. Systems analysis in construction materials science: a monograph / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M., Danilov E.V. Korolev. – M.: MGSU: Library of scientific research and projects, 2012. – 432 p.
3. Voznesensky, V.A. Prescription-technological fields of material properties in computer-aided materials science / V.A. Voznesensky, T.V. Lyashenko // *Construction materials*. – 2006. – №7. – P. 8–11.
4. Saprykina, N.A. Basics of dynamic shaping in architecture / N.A. Saprykina. – M.: Architecture-S, 2005. – 312 p.
5. Garkina, I.A. Construction survey objects agro industrial complex with system approach / I.A. Garkina, I.N. Garkin, S.V. Klyaev // *Advances in Engineering Research (AER)*. – 2017. – Vol. 102. – P.274–277.
6. Garkina, I.A. The evolution of ideas about composite materials from the standpoint of changing paradigms / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // *Construction materials*. – 2018. – №1–2. – P. 60–63.
7. Abovskiy, N.P. Formation of building structures: monograph / N.P. Abovskiy, L.V. Endzhievsky, I.S. Inzhutov, S.V. Deordiev, V.I. Palagushkin. – Krasnoyarsk: SFU, 2013. – 184 p.
8. Danilov, A.M. Homeostatic concept of modeling systems in building materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina, D.S. Sorokin // *Regional architecture and engineering*. – 2014. – № 4. – P. 24–30.
9. Garkina, I.A. Mathematical Methods of System Analysis in Construction Materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – №245. –P.062014.
10. Danilov, A.M. Interpolation, approximation, optimization: analysis and synthesis of complex systems: monograph / A.M. Danilov, I.A. Garkina. – Penza: PGUAS, 2014. – 168 p.
11. Danilov, A.M. Polynomial models in predicting the properties of composites: state, prospects / A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and engineering*. – 2018. – №2 (35). – P. 50–54.
12. Garkina, I.A. Modeling of Building Materials as Complex Systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, Y.P. Skachkov // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 730. – P.412–417.
13. Bormotov, A.N. Pareto principle in the quality management of materials / A.N. Bormotov, A.P. Proshin, A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Proceedings of higher educational institutions. Building*. – 2002. – № 11. – P. 42–51.
14. Garkina, I.A. Methodological principles design of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.A. Budylna // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2016. – №11(11). – P. 2524–2527.

УДК 624.011.1:691-4

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

Вдовин Вячеслав Михайлович,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Карпов Владимир Николаевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: Karpov5656@mail.ru

Penza State University of Architecture and Construction

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

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

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

КЛЕЕННЫЕ КРУПНОРАЗМЕРНЫЕ ПАНЕЛИ ПЕРЕКРЫТИЯ С НЕСУЩИМИ ДЕРЕВЯННЫМИ РЕБРАМИ

В.М. Вдовин, В.Н. Карпов

Предлагаются конструкции стыковых соединений несущих ребер крупноразмерных клееных панелей с применением различных связей (клеевых швов, кольцевых шпонок, вклеенных кольцевых шпонок). Приводятся результаты испытаний предлагаемых соединений. На основании результатов испытаний предложены рациональные виды стыков применительно к панелям перекрытий дома серии 101-1-3Д. Представлены результаты натурных испытаний большепролетных ребристых панелей с различными стыками ребер с анализом работы элементов панелей и стыков ребер.

Ключевые слова: панель клееная ребристая, клей, кольцевая шпонка, натурные испытания, оценка результатов, надежность

GLUED LARGE SIZE ROOF SLABS WITH BEARING WOODEN RIBS

V.M. Vdovin, V.N. Karpov

Structures of butt joints of bearing ribs of large sized glued panels with the use of various connections (glue seams, ring keys, glued ring keys) are proposed. The test results of the proposed compounds are given. On the basis of test results proposed the most rational types of joints as applied to roof slabs of the house series 101-1-3D are preposed. Full-scale testing of long span ribbed panels with various joints of the ribs are presented. Results of full-scale tests of panels with the analysis of work of panel elements and joints of the ribs are given.

Keywords: glued ribbed panel, glue, ring key, full-scale tests, evaluation of results, reliability

Полнооборный деревянный дом собирается из небольшого количества крупных панелей. В частности, для перекрытия полнооборного дома используют панели размером в плане 2400×9300 мм, представляющие собой ребристую систему, состоящую из двух обшивок и девяти продольных несущих ребер, выполняемых из цельных строганых досок сечением от 35×118 мм до 44×144 мм. Ввиду ограниченности сортамента досок по длине, несущие дощатые ребра необходимо срощивать. Любые стыковые соединения снижают несущую способность элемента и создают определенные трудности в технологическом режиме изготовления панелей, тем более если этот вопрос касается массового изготовления полнооборных домов [1].

Несмотря на большое разнообразие конструктивных решений стыковых соединений дощатых элементов, рациональным следует считать такой стык, который должен отвечать следующим требованиям:

– достаточной надежности (прочности и жесткости);

- технологичности (простота изготовления);
- экономичности (малая стоимость).

С учетом этих требований применительно к технологии комбинатов по изготовлению домов было рассмотрено несколько видов стыковых соединений [2], представленных на рис. 1. Это далеко не все виды существующих стыков дощатых элементов, в частности отсутствует стык на «зубчатый шип», отвечающий всем названным выше требованиям. Однако для внедрения технологии его изготовления необходима самостоятельная технологическая линия.

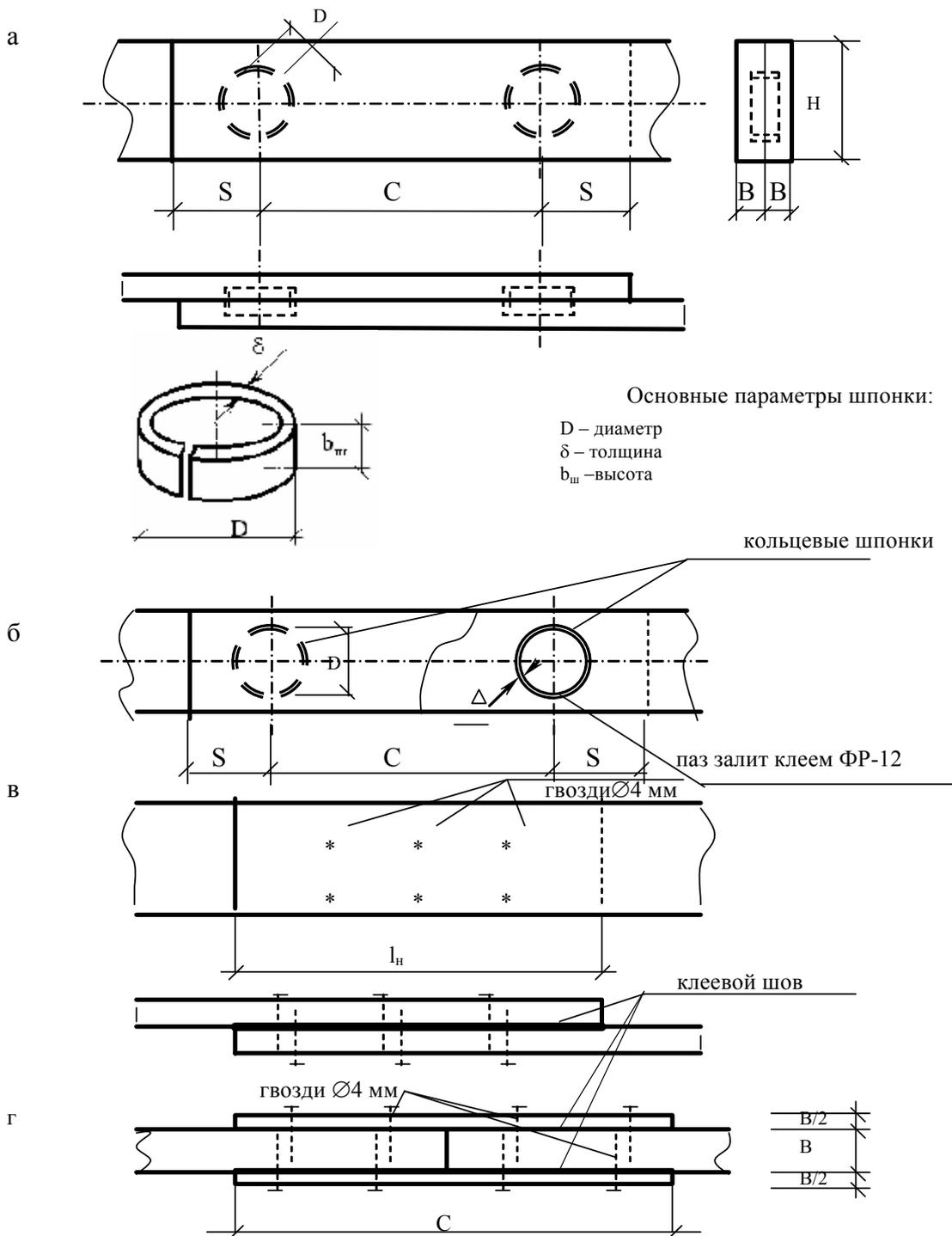


Рис. 1. Общий вид образцов стыковых соединений изгибаемых элементов деревянных конструкций:

- а – на кольцевых шпонках (БКШ); б – на клею кольцевых шпонках (БККШ);
- в – внахлестку на клею (БКН); г – с парными накладками меньшей толщины на клею

Для выявления надежности в работе все указанные на рис. 1 виды стыков были испытаны нагрузкой с выявлением несущей способности и жесткости. Для сравнения результатов испытаний образцов одновременно были проведены испытания цельных образцов, выполненных из досок такого же сечения и сорта древесины, что и стыковые образцы.

В табл. 1 приведены результаты испытания всех видов образцов по отношению к образцам цельного сечения. Маркировка образцов принята как в [3] (последняя цифра в марке образцов показывает длину нахлестки).

Т а б л и ц а 1

Результаты испытаний образцов

| Разрушающая нагрузка ($P_{разр}$, кН) для образцов серии | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|------------|------|------------|------|-------------|------|-------------|-----|--------------|-----|---------|-----|
| БЦ | | БКШ-75-300 | | БКШ-75-400 | | БКШ-100-300 | | БККШ-75-400 | | БККШ-100-300 | | БКН-400 | |
| абс | % | абс | % | абс | % | абс | % | абс | % | абс | % | абс | % |
| 3.9 | 100 | 3.0 | 76.9 | 3.6 | 92.3 | 3.8 | 97.6 | 6.8 | 174 | 4.81 | 123 | 4.6 | 118 |

Как видно из результатов испытаний, хорошей надежностью обладают стыки БКШ75-400, БККШ75-400 и БКН-400. Они приняты для дальнейших исследований в работе панелей.

Для проверки работы панелей, выявления их несущей способности со стыковыми соединениями несущих ребер, а также выбора рациональной конструкции стыковых несущих ребер были проведены натурные испытания панелей. С этой целью были изготовлены три экспериментальных образца панелей в натуральную величину по технологии, принятой на комбинатах при изготовлении полносборных деревянных домов со всеми конструктивно-технологическими требованиями применительно для дома серии 101-1-3Д.

В каждой панели размещались разные виды стыковых соединений ребер. В панели ПРЭ-1 ригели имели стыки клеевые ПКН-400, в панели ПРЭ-2 – соединения на шпонках ПКШ-72-400, в панели ПРЭ-3 – на клеенных шпонках ПККШ-72-400. Длина всех испытываемых стыков принималась одинаковой и составляла 400 мм.

Испытываемые панели были изготовлены на технологических линиях в полном соответствии с изготовлением панельных конструкций дома 101-1-3Д. Стыки, требующие применения клея, выполнялись на клее ФР-12 холодного отверждения с опрессовкой клеевого шва гвоздевым забоем.

Конструкция и размеры элементов испытываемых панелей показаны на рис. 2.

Все стыки ребер располагались в одном поперечном сечении панелей (наихудший вариант для панели). Эти сечения находились в месте действия максимальных изгибающих моментов, т.е. над средней опорой и в пролетах. Стыки обшивки выполнялись «впритык», без дополнительных накладок, и, следовательно, обшивки в сечении со стыком не могли участвовать в работе панели.

Перед испытанием были проведены соответствующие осмотры испытываемых панелей и их расчеты. Расчетные нагрузки на панель подсчитывались как для дома без мансарды и с распорной крышей без промежуточных стоек, т.е. нагрузка на панель складывалась из собственного веса и полезной «чердачной» нагрузки. За расчетную схему плиты принималась двухпролетная балка с пролетами $l_1 = 4,45$ м и $l_2 = 4,9$ м исходя из фактической схемы работы плиты ПП-4 в доме 101-1-3Д. Расчетная схема показана на рис. 3.

Сделан статический расчет такой балки, определены максимальные усилия M и Q , которые приведены в табл. 2.

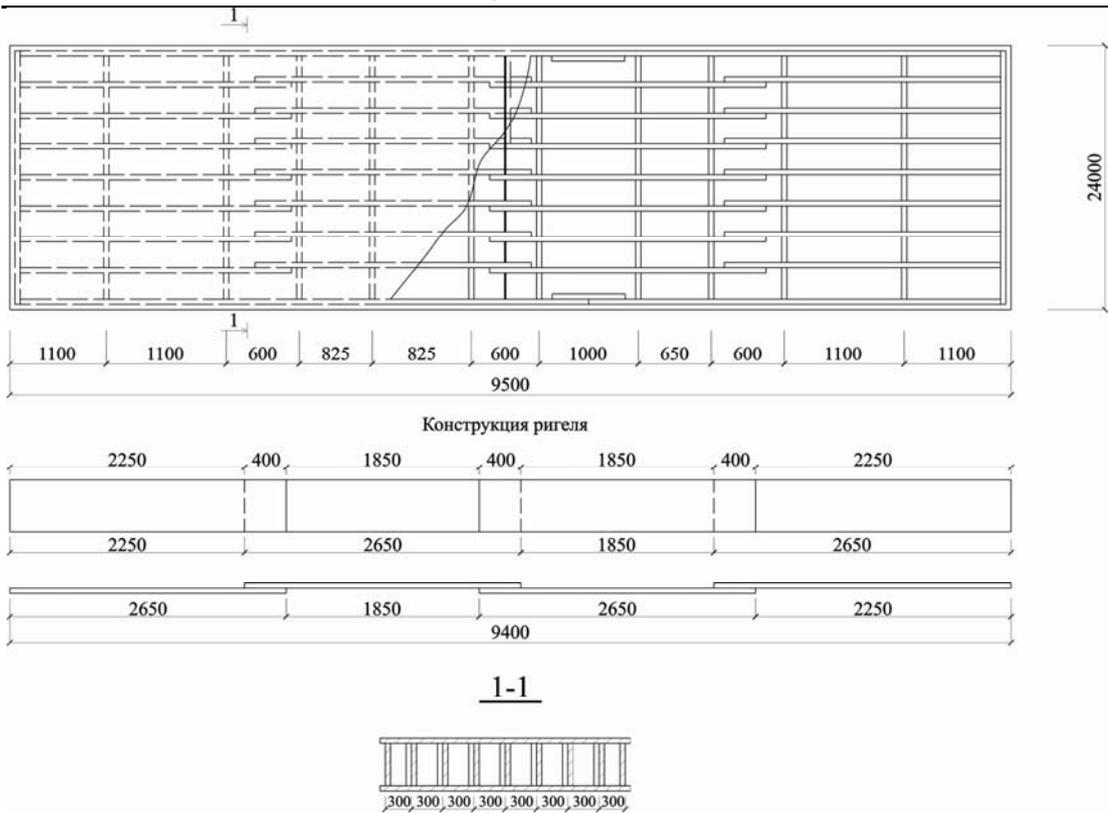


Рис. 2. Конструкция панели

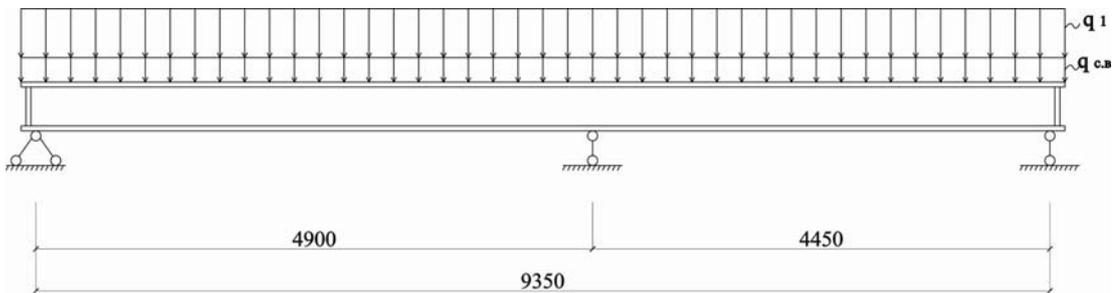


Рис. 3. Схема нагрузок

Т а б л и ц а 2
Значения расчетных нагрузок и усилий в плите ПП-4 дома серии 101-1-3Д

| Расчетная схема | Расчетная нагрузка, кН/м | Максимальные расчетные усилия | | Контрольные усилия $M_{\text{контр}}$, кН·м |
|-----------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------|--|
| | | M , кН·м | Q , кН | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | $\frac{3,36}{1,17}$ | $\frac{9,22}{3,22}$ | $\frac{10,09}{3,52}$ | $\frac{36,80}{23,894}$ |

П р и м е ч а н и я : 1. Контрольные усилия, подсчитанные в панели без учета работы обшивок, приведены в знаменателе, с учетом работы обшивок – в числителе.

2. В графах «расчетная нагрузка» и «максимальные расчетные усилия» в знаменателе даны величины, вызванные собственным весом конструкции.

Для измерения прогибов и деформаций, возникающих в обшивках и ребрах, ставились приборы (тензометры и прогибомеры). Схема их установки показана на рис. 4.

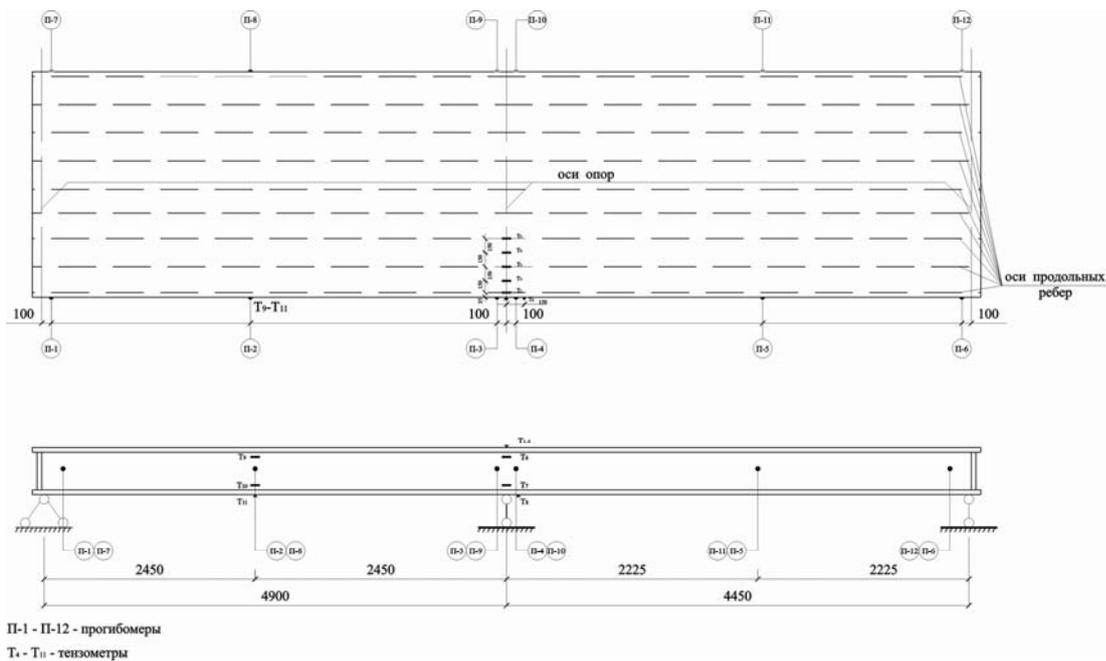


Рис. 4. Схема расположения приборов

Для создания нагрузки использовались две воздушные подушки. Характер нагрузки при испытании уточнялся исходя из размеров подушек (ширина подушки – 2400 мм, длина – 2400 мм). Месторасположение подушек принималось из расчета создания максимальных усилий в пролетах.

Причиной разрушения панелей явился отрыв обшивок от ребер, вследствие чего резко возросли напряжения в ребрах, которые способствовали разрушению самих ребер. Разрушение происходило по целым сечениям ребер вблизи стыков ребер. Однако не замечено, чтобы наличие стыков способствовало разрушению ребер. После испытания было произведено вскрытие панели путем снятия верхней обшивки, которое показало, что стыки ребер находятся в состоянии, пригодном для дальнейшего восприятия нагрузок. Некоторые ребра разрушились в результате поперечного излома или продольного скалывания, как правило, в местах, где имели место пороки древесины. Вследствие перераспределения изгибающих моментов в панелях возрастали пролетные изгибающие моменты. Это приводило к тому, что явные разрушения ребер наблюдались не над опорой, где момент больше, чем в пролете, а в пролете. Испытания показали также, что слабым местом работы панелей являются клеевые швы, соединяющие обшивки и несущие ребра.

Графики нарастания прогибов панелей приведены на рис. 5.

Как видно из графиков, прогибы панелей существенно увеличиваются перед моментом разрушения, что говорит о развитии пластических деформаций в материалах панелей.

Максимальные прогибы испытываемых панелей составили (при условной нормативной нагрузке):

- для панели ПРЭ-1 – 5,92 мм;
- для панели ПРЭ-2 – 5,22 мм;
- для панели ПРЭ-3 – 4,79 мм.

Все эти величины меньше предельно допустимой величины, равной $1/200$ от l и указанной в СНиП II-25-80.

Тензометры, поставленные в нескольких сечениях панели, зафиксировали совместное участие в работе обшивок и ребер. На рис. 6 показан график распределения деформаций в обшивке по ширине и по высоте панели. Как и следовало ожидать, наблюдается некоторое увеличение деформаций в обшивке над ребрами и спад их на участке между ребрами.

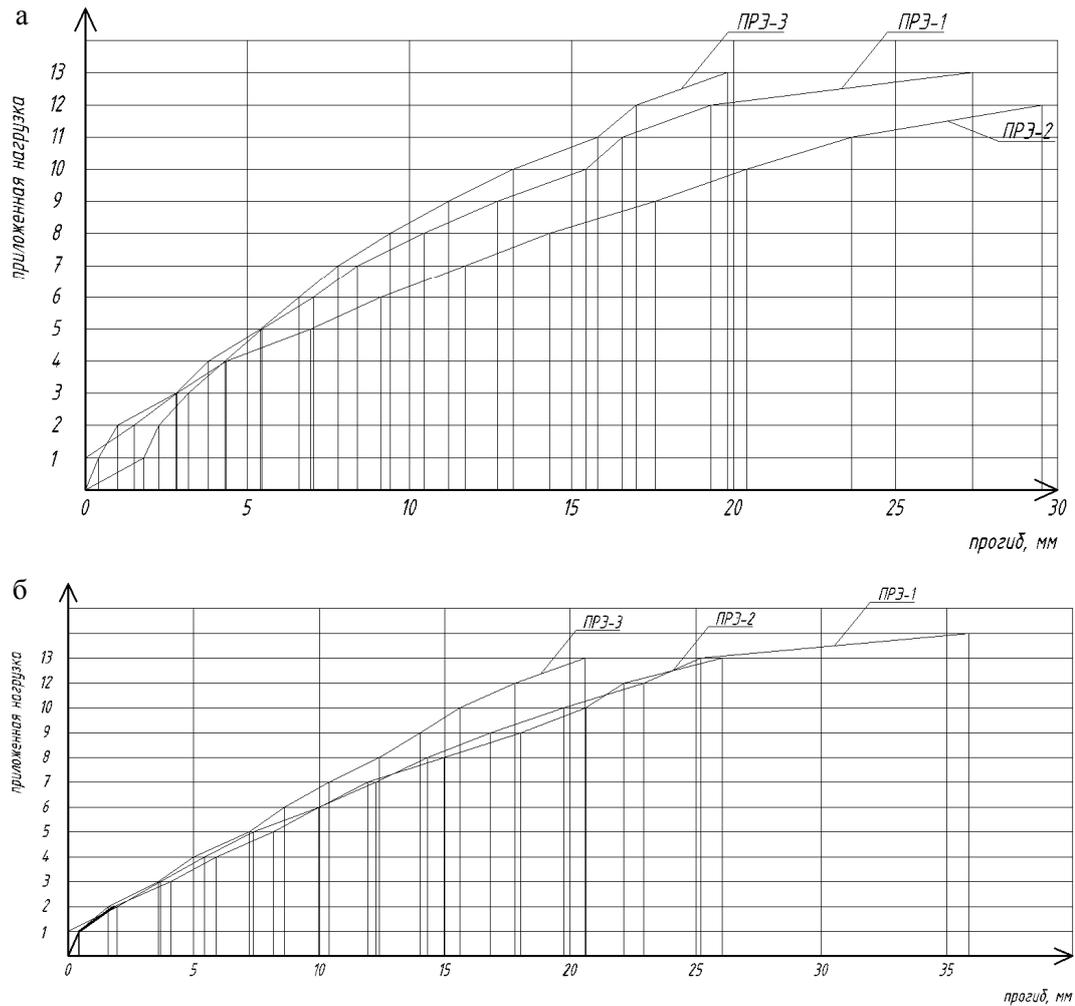


Рис. 5. Нарастания прогибов панели:
а – малый пролет, б – большой пролет

При действии разрушающих нагрузок (с учетом собственного веса панели) в элементах панели возникали максимальные усилия, нормальные и касательные напряжения, величины которых приведены в табл. 3.

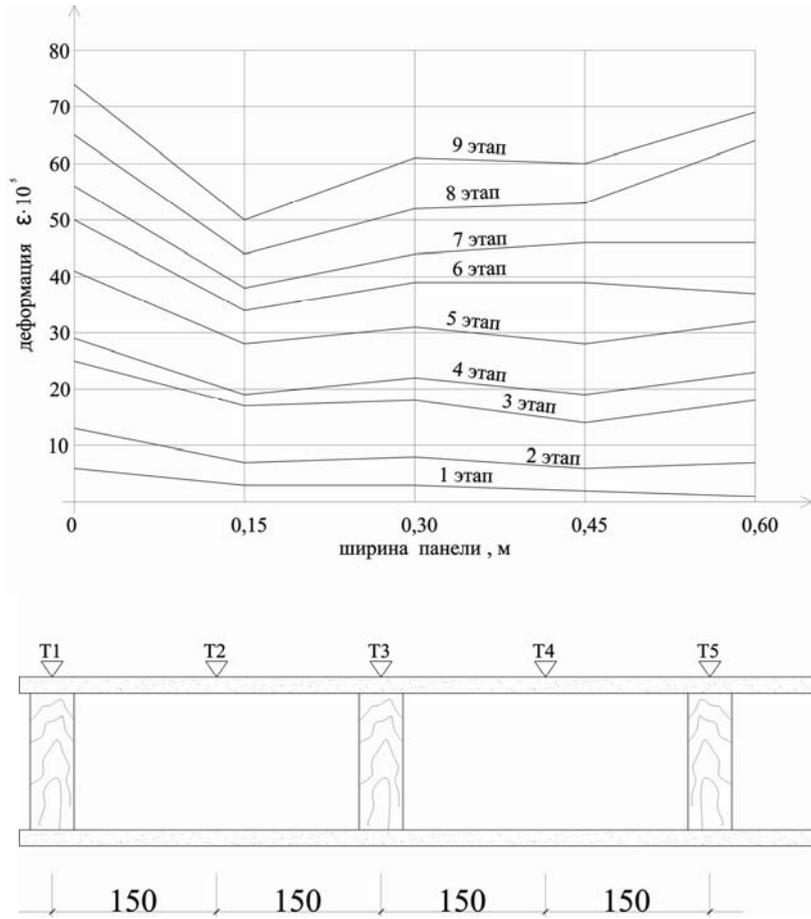
Т а б л и ц а 3

Результаты испытания панелей

| Марка панели | Вид стыков | Разр. нагр. $P_{разр}$, кН | Максимальные усилия | | Макс. норм. напряж. в ребрах | | | Макс. касат. напряж. | | Коэффициенты | |
|--------------|----------------------|--------------------------------|---------------------|----------|------------------------------|------------------|------------|----------------------|---------------------|--------------|-------|
| | | | M , кН·м | Q , кН | с учет. обшив. | без учет. обшив. | в обшивках | в ребре | в общ. | K_1 | K_2 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| ПРЭ-1 | накладка на клею | 9,0 | 41,48 | 38,08 | $\frac{28,26}{30,00}$ | 46,22 | 3,69 | $\frac{0,97}{2,46}$ | $\frac{0,26}{0,79}$ | 4,61 | 1,16 |
| ПРЭ-2 | на шпонках | 7,0 | 32,32 | 27,42 | $\frac{21,50}{22,08}$ | 35,16 | 2,73 | $\frac{0,74}{1,87}$ | $\frac{0,20}{0,60}$ | 3,61 | 0,88 |
| ПРЭ-3 | на вклеенных шпонках | 10,00 | 46,18 | 32,17 | $\frac{30,73}{32,61}$ | 50,25 | 3,90 | $\frac{1,06}{2,67}$ | $\frac{0,29}{0,86}$ | 5,01 | 1,26 |

П р и м е ч а н и е : В знаменателе указаны величины напряжений из расчета, что только три ребра включаются в работу с обшивками (условно).

а



б

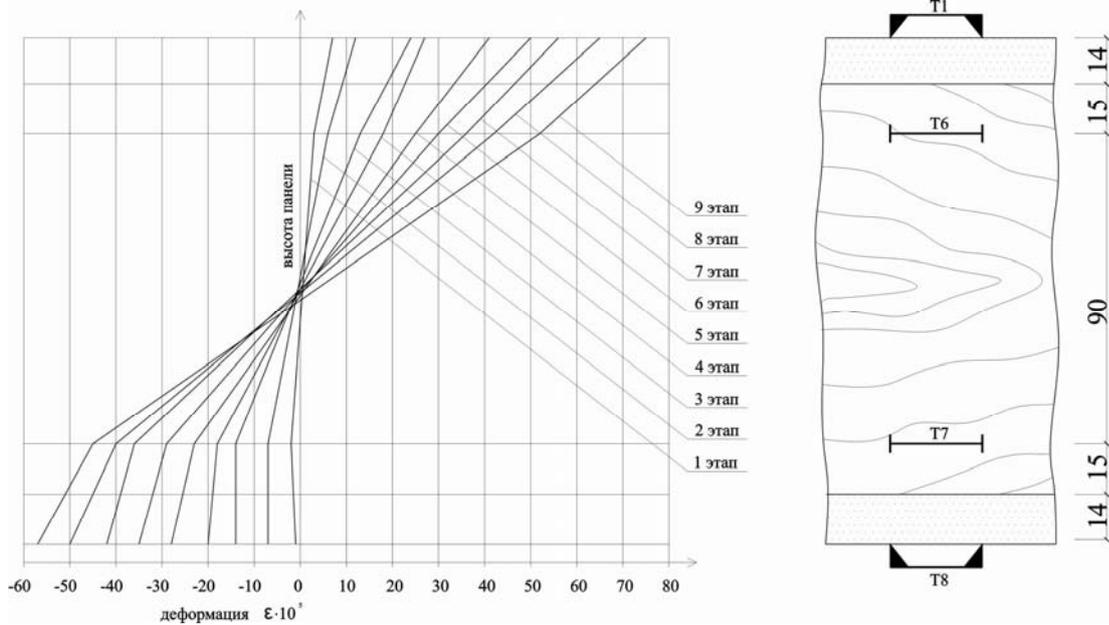


Рис. 6. Распределение деформаций:

а – в обшивке по ширине панели (фрагмент), б – по высоте сечения панели

В табл. 3 показаны также коэффициенты K_1 и K_2 для оценки несущей способности испытанных панелей, которые подсчитывались как

$$K_1 = M_{\text{разр}}/M_{\text{расч}}, K_2 = M_{\text{разр}}/M_{\text{контр}}$$

где $M_{\text{разр}}$ – максимальный изгибающий момент от действия $P_{\text{разр}}$; $M_{\text{расч}}$ – максимальный расчетный изгибающий момент от действия $P_{\text{расч}}$; $M_{\text{контр}}$ – контрольный изгибающий момент, подсчитанный из условия, когда максимальные напряжения σ^{max} составляют величину, равную $2R$.

По результатам натурных испытаний панелей и стыков несущих ребер можно сделать следующие выводы:

1. Испытания показали достаточно высокую несущую способность панелей со стыками несущих ребер выполненных на клею (с накладками и внахлест), а также с клееными кольцевыми шпонками, о чем свидетельствуют значения коэффициентов $K_1 > 2$ и $K_2 > 1$. Несущая способность испытанных панелей вполне достаточна для восприятия действующих на нее расчетных нагрузок в системе дома серии 101-1-3Д.

Указанные стыки несущих ребер могут быть рекомендованы для изготовления панелей перекрытия полносборного деревянного дома.

2. Панели с ребрами, имеющими стыки, обладают достаточной жесткостью, так как удовлетворяют условию

$$f_{\text{факт}}/\ell < [f/\ell],$$

где $f_{\text{факт}} = f/n_{\text{вр}} = 5,92/0,4 = 14,8$ мм – прогиб панели с учетом времени действия эксплуатационных нагрузок; $n_{\text{вр}}$ – временно-деформационный коэффициент, учитывающий действие постоянных и временных нагрузок.

С учетом $n_{\text{вр}}$ получим: $f_{\text{факт}}/\ell = 14,8/4900 = 1/331 < [1/200]$.

Список литературы

1. Вдовин, В.М. Новая конструкция ребер панелей / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов // Сельское строительство. – 1989. – № 6. – С. 36–37.
2. Вдовин, В.М. Разработка и исследование стыков несущих ригелей и обшивок крупноразмерных панелей перекрытий полносборных деревянных домов: монография / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов. – М., 2010. – 141 с. – Деп. в ВНИИТПИ, № 12078. Вып.1.
3. Вдовин, В.М. Вклеенные кольцевые шпонки в соединяемых деревянных конструкциях / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов, М.С. Галахов. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 172 с.

References

1. Vdovin, V.M. New design of ribs of panels / V.M. Vdovin, V.N. Karpov // Rural construction. – 1989. – № 6. – P. 36–37.
2. Vdovin, V.M. Development and research of the joints of load-bearing crossbars and skins of large-size floor panels of prefabricated wooden houses: monograph / V.M. Vdovin, V.N. Karpov. – M., 2010. – 141 p. – Dep. in VNIINTPI, No. 12078. Vol. 1.
3. Vdovin, V.M. Glued ring splines in the joined wooden structures / V.M. Vdovin, V.N. Karpov, M.S. Galakhov. – Penza: PGUAC, 2011. – 172 p.

УДК 69.059

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

Булавенко Вячеслав Олегович,
инженер ООО «Техностройпроект»
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

Bulavenko Vyacheslav Olegovich,
Engineer «Technostroyproect» ltd.
E-mail: stroyconst@pguas.ru

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

УСИЛЕНИЕ ПЛИТ ИЗ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ

И.С. Гучкин, В.О. Булавенко, Н.Н. Ласьков

Рассматриваются результаты внедрения новой эффективной конструкции усиления плит из ячеистого бетона, расположенных в покрытии производственного здания. Необходимость усиления вызвана значительной коррозией рабочей арматуры и опасностью внезапного обрушения. Приводятся данные обследования плит, результаты расчета прочности до и после усиления. Предлагается малозатратный и нетрудоёмкий способ усиления плит, не требующий остановки производственного цикла. Оценивается достигнутый эффект повышения несущей способности плит в результате усиления.

Ключевые слова: плита покрытия из ячеистого бетона, коррозия арматуры, несущая способность, расчет, усиление стальным прокатом

STRENGTHENING OF CELLULAR CONCRETE PLATES AFTER PROLONGED USE IN INDUSTRIAL BUILDINGS COVERING

I.S. Guchkin, V.O. Bulavenko, N.N. Laskov

The results of the introduction of a new effective design of reinforcement of cellular concrete slabs located in the coating of industrial buildings are considered. The need for strengthening is caused by significant corrosion of the working valves and the danger of sudden collapse. The data of inspection of plates, results of calculation of durability before and after strengthening are given. The low-cost and labor-intensive way of strengthening of plates which is not demanding a stop of a production cycle is offered. The achieved effect of increasing the bearing capacity of the plates as a result of strengthening is estimated.

Keywords: porous concrete slab, reinforcement corrosion, bearing capacity, settlement, reinforcement steel strengthening

Обеспечение безопасной эксплуатации несущих конструкций зданий является важной задачей, решаемой в строительной индустрии [2, 3]. Результаты натурного обследования ряда производственных зданий г. Пензы показали, что многие плиты покрытий, выполненные из ячеистого бетона, за время длительной эксплуатации получили существенные повреждения и нуждаются в замене. При этом массовые повреж-

дения в виде отслоений защитного слоя, коррозии арматуры, чрезмерных прогибов наблюдаются преимущественно в местах протечек кровли, вблизи труб внутреннего водостока и оконных проемов (рис. 1). Следует отметить, что замена плит в условиях действующего производства связана с большими материальными и трудовыми затратами и часто оказывается неприемлемой, особенно в многопролетных цехах, где невозможно использование стрелового крана.

При традиционном способе усиления аварийные плиты разгружаются путем подвески к стальным балкам, размещенным на крыше и опирающимся на стропильные конструкции каркаса здания. Недостатками такого усиления являются: увеличение рабочих габаритов покрытия по высоте, неудобства при устройстве и эксплуатации кровли, необходимость специальной антикоррозионной защиты несущих элементов усиления (балок и подвески), а также высокая вероятность образования снеговых мешков вдоль балок.



Рис. 1. Фрагменты конструкции покрытия производственного цеха:
а – общий вид покрытия; б – характерное повреждение плит из ячеистого бетона (отслоение защитного слоя, коррозия арматуры)

Разработанный авторами способ усиления плит [1] базируется на специфических качествах ячеистого бетона [5], а именно его высокой пористости и небольшой прочности (твердости), что позволяет без значительных трудозатрат прорезать в плитах и швах по линии сопряжения смежных плит сквозные щели, которые можно использовать для размещения элементов усиления (рис. 2).

Конструкция усиления выполняется в виде подвески, состоящей из продольных и поперечных стальных балок двутаврового или швеллерного профиля. Продольные балки с приваренными к нижнему поясу фасонками размещаются в прорезанных щелях, опираются на стропильные конструкции, имеют длину, примерно равную длине плиты. Под плиту подводятся поперечные балки и через имеющиеся на торцах фасонки соединяются на болтах с продольными балками. Включение подвески в работу обеспечивается плотным контактом поперечных балок с нижней поверхностью плиты, который достигается зачеканкой в зазор цементно-песчаного раствора жесткой консистенции на расширяющемся цементе.

Работы по усилению плит производят в следующем порядке.

Вначале исследуют физическое состояние плит, выполняют поверочные расчеты плит и элементов усиления по несущей способности. Затем проектируют и изготавливают элементы усиления. После этого вскрывают конструкцию кровли вдоль шва сопряжения смежных плит на ширину 300–400 мм. Дисконной электропилой или другим способом прорезают вдоль швов на всю длину плиты сквозные щели шириной 85–90 мм, после этого в щели сверху вставляют продольные стальные балки усиления 3, опирая на стропильные фермы каркаса здания. К продольным балкам снизу подводят поперечные балки усиления 4 и соединяют их с продольными балками через имеющиеся на балках фасонки 7, 8 монтажными болтами 5. Зазоры между продольными балками и боковыми поверхностями плит заполняют монтажной пеной, а щель над

поверхностью продольных балок – утеплителем (минватой) 6. Зазоры между поперечными балками усиления 4 и усиливаемой панелью заполняют мелкозернистым бетоном 9 класса В15, жесткой консистенции. Восстанавливают конструкцию кровли, а выступающие за потолочную поверхность плит стальные элементы усиления покрывают защитными материалами.

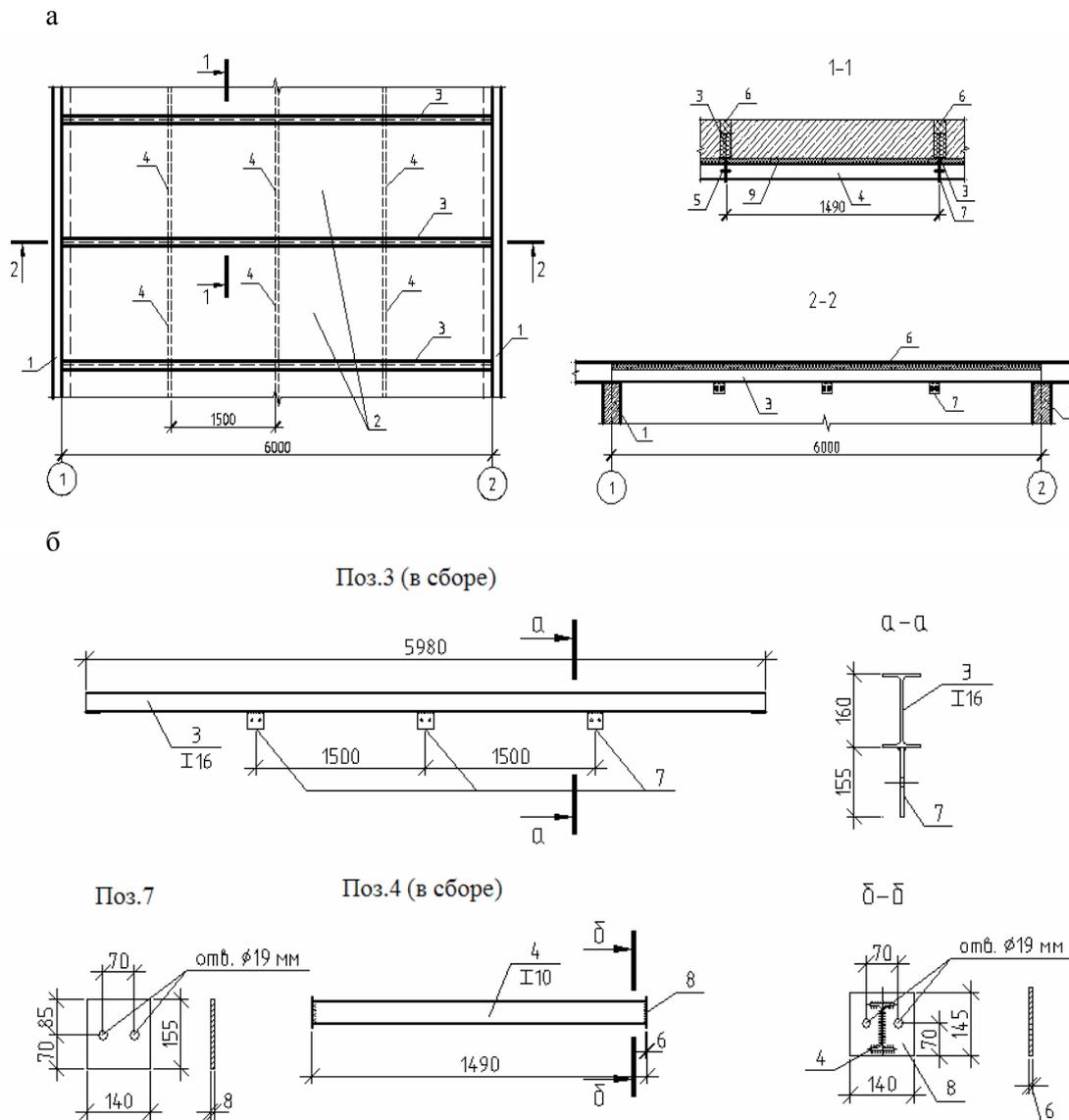


Рис. 2. Конструкция усиления плит:

а – фрагмент плана покрытия; б – элементы конструкции усиления

Проектирование конструкции усиления плит, имеющих масштабные отслоения защитного слоя и глубокую язвенную коррозию рабочей арматуры, выполнялось в несколько этапов. При этом оценка прочности плиты с учетом имеющихся повреждений производилась в соответствии со СНиП 52-01-2003 (актуализированная редакция) [4], а прочности стальных элементов конструкции усиления – по СНиП 11-23-81* (актуализированная редакция).

При детальном обследовании производственного корпуса установлено: плиты покрытия марки ГКП-IV по серии ПК-01-92 выполнены из ячеистого бетона плотностью $\gamma = 700 \text{ кг/м}^3$, имеют коррозию рабочей арматуры в пределах 20...30 % площади сечения. Марка бетона по результатам неразрушающего контроля прочности соответствует проектной М50 (класс В 3,5) с расчетными параметрами: $R_b=2,2 \text{ МПа}$;

$E_b = 2,9 \cdot 10^3$ МПа [4]. Рабочая арматура 9Ø12 А-I (А-240), $R_s = 225$ МПа, площадь $A_s = 10,8$ см² ($A_{s,f} = 7,126$ см² с учетом коррозии 30 %). Размеры панелей в плане 6×1,5 м; толщина 0,24 м, расчетная длина $l_0 = 5,8$ м, полезная высота сечения $h_0 = 0,21$ м.

Оценка несущей способности плиты выполнена на основании поверочного расчета прочности нормального сечения, ослабленного коррозией арматуры.

Расчетная погонная нагрузка на плиту, включая временную от снега, а также постоянную от веса кровли и плиты: $q = 5,81 \cdot 1,5 = 8,71$ кН/м.

Расчетный изгибающий момент $M = 0,125ql^2 = 0,125 \cdot 8,71 \cdot 5,8^2 = 36,63$ кН·м.

Относительная высота сжатой зоны сечения:

$$\zeta = \frac{R_s A_{sf}}{R_b b h_0} = \frac{225 \cdot 7,126 \cdot 10^{-4}}{2,2 \cdot 1,5 \cdot 0,21} = 0,231; \quad \alpha_0 = 0,203.$$

Момент, воспринимаемый нормальным сечением плиты:

$$M_r = \alpha_0 \cdot R_b \cdot \gamma_{b2} \cdot b \cdot h_0^2 = 0,203 \cdot 2,2 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 1,5 \cdot 0,21^2 = 25,59 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$M_r < M$; 26,59 < 36,63 кН·м – превышение в 1,4 раза. Требуется радикальное усиление плиты или замена.

На основании технико-экономической оценки восстановительных работ и конструктивных особенностей покрытия многопролетного производственного здания принято решение усилить плиты устройством, состоящим из продольных и поперечных стальных балок с болтовым соединением в узлах. Расчетная схема элементов усиления показана на рис. 3.

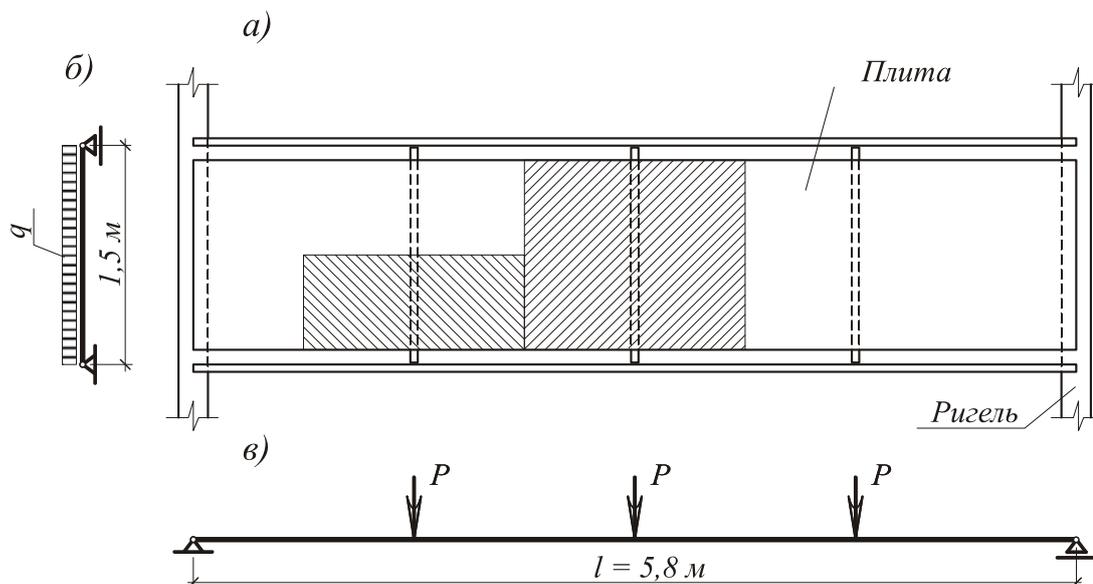


Рис. 3. Расчетные схемы конструкции усиления плиты:

а – схема конструкции усиления; б, в – расчетные схемы поперечной и продольной балок соответственно

Расчет элементов конструкции усиления

Продольные балки

Расчетная нагрузка на балку

$$P = 5,81 \cdot 1,45 \cdot 0,75 = 6,32 \text{ кН}.$$

Максимальный изгибающий момент

$$M_1 = 0,375Pl = 0,375 \cdot 6,32 \cdot 5,8 = 13,75 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Принимаем двутавровую балку I №12, $W_x = 58,4$ см³.

Момент, воспринимаемый продольной балкой с учетом развития пластических деформаций:

$$M_{r1} = 1,2 \cdot R_s W_x = 1,2 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 58,4 \cdot 10^{-6} = 14,72 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

$$M_{r1} > M_1 \rightarrow 14,72 > 13,75 \text{ кН} \cdot \text{м} - \text{условие выполняется, прочность достаточная.}$$

При одновременном усилении двух и более смежных плит нагрузка на промежуточные продольные балки удваивается.

$$\text{В этом случае } M'_1 = 2 \cdot 13,75 = 27,5 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

$$\text{Принимаем балку I №18, } W_x = 143 \text{ см}^3.$$

Момент, воспринимаемый балкой:

$$M'_2 = 1,2 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 143 \cdot 10^{-6} = 36,0 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$M'_2 > M'_1 \rightarrow 36,0 > 27,5 \text{ кН} \cdot \text{м}$ – условие выполняется. Следовательно, продольные балки способны воспринять полную расчетную нагрузку от плиты, включая ее собственный вес.

Поперечные балки

$$\text{Расчетная погонная нагрузка } q = 5,81 \cdot 1,5 = 8,71 \text{ кН}.$$

$$\text{Изгибающий момент } M_2 = 0,125 q l_1^2 = 0,125 \cdot 8,71 \cdot 1,5^2 = 2,45 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

$$\text{Опорная реакция } R_1 = 0,5 q l_1 = 0,5 \cdot 8,71 \cdot 1,5 = 6,53 \text{ кН}.$$

$$\text{Принимаем балку из швеллера [№8, } W_x = 22,4 \text{ см}^3.$$

$$\text{Момент, воспринимаемый балкой: } M_{r2} = 1,2 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 22,4 \cdot 10^{-6} = 5,64 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

$$M_{r2} > M_2, 5,64 > 2,45 \text{ кН} \cdot \text{м} - \text{условие выполняется.}$$

Поперечные балки крепятся к продольным с помощью двух болтов диаметром 8 мм. $A_{sb} = 1,01 \text{ см}^2$.

$$\text{Расчетное усилие среза } N_s = R_s A_{sb} = 130 \cdot 10^3 \cdot 1,01 \cdot 10^{-4} = 13,1 \text{ кН}.$$

$$N_s > R_1, 13,1 > 6,53 \text{ кН} - \text{условие выполняется.}$$

Расчет конструкции усиления из условия совместных деформаций с усиливаемой плитой не производим, так как конструкция, являющаяся упругой опорой, полностью воспринимает постоянную нагрузку от кровли, плиты и временную от снега.

Расчет прочности бетона стропильной фермы в зоне опирания балок усиления (I №18) на местное сжатие

По результатам обследования класс бетона стропильных ферм В35, $R_b = 19,5 \text{ МПа}$.

Длина площадки опирания $l_n = 0,15 \text{ м}$, ширина $b_n = 0,09 \text{ м}$.

Проверку прочности бетона на местное сжатие выполняем в соответствии с рекомендациями «Пособия...» к СП 52-101-2003 по формуле

$$N \leq \psi \cdot R_{b,loc} \cdot A_{b,loc},$$

где N – опорная реакция продольной балки усиления

$$N = 0,5 q l = 0,5 \cdot 8,71 \cdot 1,5 = 25,26 \text{ кН};$$

$\psi = 0,75$ – коэффициент, учитывающий способ приложения нагрузки; $R_{b,loc}$ – расчетное сопротивление бетона с учетом стесненных условий деформаций,

$$R_{b,loc} = \varphi_b R_b = 1,152 \cdot 19,5 = 22,46 \text{ МПа};$$

φ_b – коэффициент увеличения расчетного сопротивления бетона,

$$\varphi_b = 0,8 \cdot \sqrt[3]{\frac{A_{b,max}}{A_{b,loc}}} = 0,8 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,0405}{0,0135}} = 1,152;$$

$A_{b.loc}$ – площадь зоны смятия;

$$A_{b.loc} = b_n \cdot l_n = 0,09 \cdot 0,15 = 0,0135 \text{ м}^2;$$

$A_{b.max}$ – расчетная площадь зоны смятия,

$$A_{b.max} = 3b_n \cdot l_n = 3 \cdot 0,09 \cdot 0,15 = 0,0405 \text{ м}^2.$$

Проверка условия:

$25,26 < 0,75 \cdot 22,46 \cdot 10^3 \cdot 0,0135$; $25,26 < 227,41$ (кН) – условие выполняется.

Произведенные расчеты подтвердили достаточную несущую способность конструкции усиления плиты и сопрягающихся элементов.

Выводы

Результаты исследований конструкции усиления плит покрытия из ячеистого бетона показали следующее:

- радикально восстановлены эксплуатационные качества плит покрытия;
- значительно повышены несущая способность плит на действие изгибающего момента и поперечных сил, а также их жесткость;
- обеспечена надежная связь плит и сопрягающихся элементов устройств усиления;
- отсутствуют сварочные работы на высоте;
- сокращены трудозатраты на монтаж несущих элементов конструкции усиления и восстановление теплоизолирующих свойств покрытия;
- работы по усилению выполняются без остановки производственного цикла.

Список литературы

1. Патент RU №2550173. Способ усиления сборных панелей покрытия из ячеистого бетона / авт. Гучкин И.С., Булавенко В.О., Мигунова К.В. Бюл.№3–2015.
2. СТО 36554501-014-2008. Надежность строительных конструкций и оснований. – М.: ФГУП НИЦ «Строительство», 2008.
3. Клименко, Е.В. К вопросу определения остаточного ресурса эксплуатируемых железобетонных конструкций / Е.В. Клименко // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: сб. / АННОО «Приволжский Дом зданий». – Пенза, 2004.
4. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: Росстандарт, 2012.
5. Danilov, A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8. – № 5–8. – P. 219–225.

References

1. Patent RU №2550173. Method for strengthening of precast panels coating of porous concrete / Guchkin I. S., Bulavenko V.O., Migunova K.V. Bul.№3–2015.
2. STO 36554501-014-2008. Reliability of structures bases. – M.: FSUE SIC «Construction», 2008.
3. Klimenko, E.V. On the question of determining the residual life of exploited reinforced concrete structures / E.V. Klimenko // Efficient building structures: theory and practice: col. / ANNOO «Privolzhskiy Dom znaniy». – Penza, 2004.
4. SP 63.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures. Fundamentals. The updated edition of SNiP 52-01-2003. – M.: Rosstandart, 2012.
5. Danilov A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8. – № 5–8. – P. 219–225.

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»

Артюшин Дмитрий Викторович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Жуков Александр Николаевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Курткезов Дмитрий Харлампиевич,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

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

Nezhdanov Kirill Konstantinovich,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Building constructions»

Artyushin Dmitriy Viktorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Building constructions»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Zhukov Alexander Nikolaevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Building constructions»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Kurtkeзов Dmitry Kharlampievich,
Postgraduate of the department «Building
constructions»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

ГАРАНТИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ П-ОБРАЗНЫХ РАМ КАРКАСОВ ТЭЦ

К.К. Нежданов, Д.В. Артюшин, А.Н. Жуков, Д.Х. Курткезов

Приводятся результаты исследований по предотвращению лавинообразных обрушений сооружений и обеспечению их надежности. Даются рекомендации по эксплуатации, усилению и проектированию каркасов ТЭЦ, а также по снижению трудоемкости и автоматизации их изготовления.

Ключевые слова: причины обрушения покрытий, аварии каркасов, безопасная эксплуатация, повышение статической неопределенности каркасов, амортизирующая способность овальных профилей

RELIABILITY AND DURABILITY GUARANTEE U-SHAPED FRAMES OF AT THERMOELECTRIC PLANTS

K.K. Nezhdanov, D.V. Artyushin, A.N. Zhukov, D.Kh. Kurtkeзов

The results of studies on the prevention of avalanche-like collapse of structures and ensuring their reliability are given. Recommendations are given on the exploitation, reinforcement and design of frameworks of thermoelectric plants, as well as on the reduction of labor intensity and automation of production.

Keywords: causes of coating collapse, frames crashes, safe exploitation, increased static frame indefiniteness, ability oval profiles damping

ГОСТ [1] требует гарантировать бесперебойную, безопасную, безаварийную эксплуатацию каркасов ТЭЦ в течение века, т.е. 100 лет. Каркасы ТЭЦ, построенные в 40-х годах 20 века, рассчитаны по устаревшим нормам СССР. В действующих нормах снеговые нагрузки увеличены на 30-35 %. Колонны каркасов действующих ТЭЦ выполнены из железобетона, в системе покрытий в основном применены ребристые однопролетные железобетонные плиты. Срок безаварийной эксплуатации таких несущих железобетонных конструкций (50 лет) истек в 90-х годах прошлого века. Поэтому прочность и несущая способность покрытий и каркасов ТЭЦ явно не обеспечены, а вероятность обрушений высока.

Аварии с обрушением покрытий с однопролетными тяжелыми железобетонными плитами, уложенными по фермам, отмечаются на всей территории бывшего СССР. Например, в январе 2017 г. в г. Пензе произошло обрушение 42 железобетонных однопролетных плит покрытия (три шага) ТЭЦ-1, действующей с 1941 г., вместе с двумя стропильными стальными фермами (рис. 1). Аналогичные обрушения покрытий ТЭЦ наблюдаются и в других городах России (рис. 2). Тем не менее аварийные покрытия ТЭЦ, построенных в 40-х годах прошлого века, продолжают эксплуатировать. В связи с чем железобетонные плиты и стальные фермы необходимо постоянно обследовать, выявлять аварийные и заменять легкими надежными конструкциями покрытия. Надежность каркасов П-образных рам каркасов ТЭЦ следует повысить, а металлоемкость в целом снизить.



Рис. 1. Общий вид обрушения железобетонных плит и стальных ферм покрытия Пензенской ТЭЦ-1 (26 января 2017 года)



Рис. 2. Общий вид обрушения железобетонных плит и стальных ферм покрытия Барнаульской ТЭЦ-2 (26 марта 2006 года)

Основные причины обрушений покрытий ТЭЦ как важнейших объектов инфраструктуры городов

- Железобетонные плиты являются наиболее слабым звеном покрытий ТЭЦ, т.к. однопролетные тяжелые плиты имеют низкую надежность и большую массу. Плиты превращаются в аварийные из-за наличия коррозии арматуры внутри бетона. Объем ржавчины примерно в два раза превышает первоначальный объем стали. Возникшие распирающие силы откалывают защитный слой бетона, сцепление арматуры с бетоном исчезает, и аварийные плиты обрушаются. Статистика участвовавших в обрушениях железобетонных плит покрытий (вместе с фермами) свидетельствует о том, что их несущая способность исчерпана.

- В устаревших каркасах ТЭЦ фермы, шарнирно опирающиеся на колонны, имеют нулевую живучесть, что превращает П-образные рамы в один раз статически неопределимые системы. Потеря устойчивости одного из сжатых стержней превращает ферму в механизм, и она обрушается. Наиболее опасны лавинообразные обрушения покрытий зданий. Примером может служить обрушение несущих конструкций покрытия цеха литейно-арматурного завода, произошедшее в 1989 г. в г. Пензе [2–4].

- Особенно уязвимы и опасны железобетонные консоли колонн П-образных рам ТЭЦ, на края которых ошибочно опирают подкрановые балки с большими эксцентриситетами, в результате чего изгибающие моменты в рамах максимально возрастают, а металлоемкость увеличивается на 33...35 % [5]. Коррозия арматуры в консолях приводит к разрушению защитного слоя бетона, что ликвидирует ее сцепление с бетоном. Каждая из П-образных рам каркаса ТЭЦ содержит пару колонн с консолями. Демонтаж старых и монтаж новых турбин общей массой до 100 т выполняют двумя мостовыми кранами, поэтому высока вероятность обрушения аварийных консолей вместе с подкрановыми балками.

- В настоящее время существующие жесткие узлы крепления баз колонн к фундаментам металлоемки, громоздки, трудоемки. Базы колонн заглублены ниже отметки 0,000 от поверхности пола, как правило, на глубину 1,8...1,6 м (и даже до 3 м). Толщины стальных опорных плит баз достигают 60 мм, диаметры анкерных болтов – 60...100 мм. Металлоемкость баз колонн велика, а восстановление проектных отметок фундаментов сложно выполнимо.

- Подкрановые балки применяют однопролетные, их надежность низка, а рихтовка по высоте сложна. Очевидно, что целесообразным является использование двухпролетных подкрановых балок, которые надежнее однопролетных более чем в два раза.

- Рыхлое грунтовое основание под фундаментами провоцирует неравномерные просадки грунта. Возникают крен и просадки фундаментов вместе с колоннами. Неравномерные просадки колонн П-образных рам искажают отметки рельсовых путей, нарушают их прямолинейность, создают опасные изгибающие моменты в рамах [5], искривляют П-образные рамы в целом и нарушают работоспособность мостовых кранов. Колонны отклоняются от вертикали, возрастает опасность схода мостовых кранов с рельсов. Управление осадками колонн и их креном в действующих каркасах старых ТЭЦ не предусмотрено.

- Мостовые краны лишены рессор, что является технической ошибкой, в результате максимально увеличивается динамика воздействий колес на рамы ТЭЦ. Надежность подкрановых балок и каркасов в целом падает.

Методика повышения надежности и долговечности П-образных рам каркасов ТЭЦ

Во избежание лавинообразных обрушений покрытий и для повышения срока эксплуатации каркасов ТЭЦ (до 100 лет) предлагается:

- заменить существующие тяжелые покрытия из железобетонных плит по стальным фермам легкими из сэндвич-панелей (с минераловатным негорючим утеплителем)

из базальтовых волокон), опирающихся на стальные надежные ригели овального профиля;

- повысить надежность, долговечность и обеспечить автоматизацию восстановления проектных отметок рельсовых путей, заменив разрезные подкрановые балки двухпролетными [5]. Двухпролетные подкрановые балки надежнее однопролетных более чем в два раза, а восстановление проектных отметок окажется в два-три раза проще. Для обеспечения высокой надежности подкрановых балок и снижения трудоемкости их изготовления целесообразно применять балки из более технологичных при изготовлении овальных или двутавровых прокатных профилей, а не сварные, т.к. они увеличивают трудоемкость изготовления и снижают надежность. Подкрановые балки из овальных профилей обладают высокой амортизирующей способностью, гасят динамику воздействий и имеют минимальную (более чем в два раза) трудоемкость изготовления по сравнению с традиционными балками [5];

- повысить надежность П-образных рам, применив двухпролетные и двухконсольные подкрановые балки [5], с опиранием на уступы колонн без эксцентриситетов (при этом пролеты кранов принимаются равными пролетам здания). Двухконсольные балки и колонны объединяют в единую жесткую конструкцию, причем жесткие соединения с каждой из колонн выполняют посредством технологичных фрикционных шпилек из высокопрочной легированной стали «40X Селект»;

- использовать для колонн овальные прокатные профили (с соотношением $h/b = 3$), являющиеся амортизаторами, гасящими динамику воздействий лишенных рессор колес мостовых кранов [5]. Подкрановые балки соединяют с нижней частью каждой из колонн посредством амортизирующих оголовков овального профиля. Регулируя отношение моментов инерции двухпролетных подкрановых балок в пролете и над опорами, управляют величинами изгибающих моментов в подкрановых балках. Трудоемкость изготовления и металлоемкость П-образных рам снижаются, долговечность повышается, и становится возможной рихтовка каркасов ТЭЦ;

- жестко соединять базы колонн с фундаментами зубчатыми рейками, а ригели – с оголовками колонн, что превращает их в трижды статически неопределимые системы. В результате этого надежность каркасов повышается более чем в три раза и появляется возможность восстановления проектных отметок П-образных рам ТЭЦ [5].

При выполнении мероприятий согласно разработанной методике гарантируются высокая работоспособность и длительная безопасная эксплуатация каркасов ТЭЦ.

Выводы

1. Для гарантирования безопасной эксплуатации и долговечности П-образных рам каркасов ТЭЦ основные несущие конструкции – ступенчатые колонны и ригели покрытия – предложено выполнить из эффективных овальных прокатных профилей, а железобетонные плиты покрытия заменить на сэндвич-панели с минераловатным негорючим утеплителем из базальтовых волокон.

2. Для повышения надежности и обеспечения автоматизации восстановления проектных отметок рельсовых путей разрезные однопролетные подкрановые балки целесообразно заменить двухпролетными также из овальных прокатных профилей, обладающих высокой амортизирующей способностью.

3. Для восстановления проектного положения каркасов ТЭЦ предложены разработанные эффективные жесткие соединения баз колонн с фундаментами с помощью зубчатых реек.

Список литературы

1. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. – М.: Стандартинформ, 2015.
2. Нежданов, К.К. Предотвращение лавинообразного обрушения покрытий зданий из ребристых железобетонных плит / К.К. Нежданов, Д.В. Артюшин // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – №2. – С. 109–113.

3. Способ недопущения зарождения прогрессирующей лавины обвала покрытия, содержащего ребристые железобетонные плиты: патент RU №2449092 МПК E04B 1/00 / К.К. Нежданов, А.К. Нежданов, Д.В. Артюшин; патентообладатель: ГОУ ВПО Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. – №2009142385/03; заявл. 17.11.2009; опублик. 27.04.2012. Бюл. №12. – 10 с.

4. Муленкова, В.И. Расчет и конструирование усиления железобетонных и каменных конструкций / В.И. Муленкова, Д.В. Артюшин. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 118 с.

5. Нежданов, К.К. Новые принципы конструирования П-образной рамы здания / К.К. Нежданов, А.А. Кузьмишкин, А.К. Нежданов, П.В. Куничкин. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 255 с.

References

1. GOST 27751–2014. Reliability of building structures and bases. – М.: Standardinform, 2015.

2. Nezhdanov, K.K. Preventing an avalanche-like caving of building coatings made of ribbed reinforced concrete slabs / K.K. Nezhdanov, D.V. Artyushin // Regional architecture and construction. – 2011. – №2. – P. 109–113.

3. The way to prevent the emergence of a progressive avalanche collapse of coating containing ribbed reinforced concrete slabs: patent RU №2449092 IPC E04B 1/00 / K.K. Nezhdanov, A.K. Nezhdanov, D.V. Artyushin; patent holder: PGUAS. – №2009142385 / 03; declare 11/17/2009; publ. 04/27/2012 Bull. №12. – 10 p.

4. Mulenkova, V.I. Calculation and design of strengthening reinforced concrete and masonry structures / V.I. Mulenkova, D.V. Artyushin. – Penza: PGUAS, 2014. – 118 p.

5. Nezhdanov, K.K. New design principles for U-shaped building frame / K.K. Nezhdanov, A.A. Kuzmishkin, A.K. Nezhdanov, P.V. Kunichkin. – Penza: PGUAS, 2012. – 255 p.

УДК 624.072.22

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

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

Penza State University of Architecture
and Construction

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

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

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

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СТАЛЬНЫХ РАМ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПО ДЕФОРМИРОВАННОЙ СХЕМЕ

В.В. Зернов, М.Б. Зайцев

Представлена методика расчета стальных рам промышленных зданий с учетом схемы деформаций при различных формах потери устойчивости. Предлагаемый подход к расчету рам со ступенчатыми стойками дает возможность численно оценить учет высших форм потери устойчивости на значения изгибающих моментов в различных сечениях стоек. Полученные результаты показывают, что учет деформированной схемы приводит к увеличению $M_{расч}$ не более чем на 2 % и, соответственно, экономии материала до 10-12 %.

Ключевые слова: стальная рама, сочетание нагрузок, формы потери устойчивости, критическая нагрузка, принцип независимости действия сил, деформированная схема

CALCULATION METHODS OF STEEL FRAMES OF INDUSTRIAL BUILDINGS USING A VARIETY OF BUCKLING MODES ON THE DEFORMED SCHEME

V.V. Zernov, M.B. Zaytsev

The method of calculation of steel frames of industrial buildings taking into account the scheme of deformations at various forms of loss of stability is presented. The proposed approach to the calculation of frames with step racks makes it possible to numerically estimate the account of the highest forms of buckling on the values of bending moments in different sections of the racks. The results show that taking into account the deformed scheme leads to an increase of no more than 2 % and accordingly, the material savings up to 10-12 %.

Keywords: steel frame, combination of loads, forms of buckling, critical load, principle of independence of forces, deformed scheme

Рамный каркас промышленных зданий по СНиП II-23-81* "Стальные конструкции" рассчитывается приближенно: расчетные усилия в сечениях определяются по недеформированной схеме, а деформативность колонн учитывается с помощью расчетных длин и гибкостей, определяемых для первой формы потери устойчивости. Как показывают сравнительные расчеты, это приводит к перерасходу материала (в особенности для надкрановой части колонн) порядка 14 %. Поставим задачу учета

деформированной схемы без точного деформационного расчета, при котором усложняется определение наиболее невыгодного сочетания внешних нагрузок.

Известно [1], что для приближенного деформационного расчета рам промышленных зданий (рис. 1) можно использовать как первую, так и высшие формы потери устойчивости.

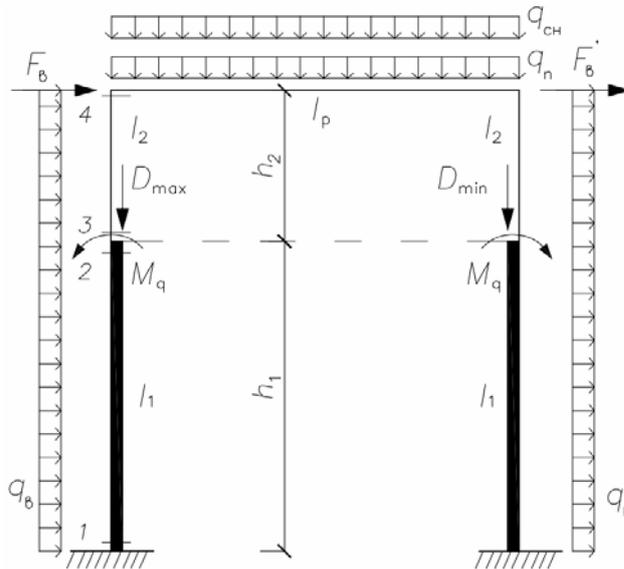


Рис. 1. Расчетная схема рамы

Однако при определении суммарных усилий от различных комбинаций нагрузок, продольные силы должны быть найдены заранее при возможном суммарном воздействии всех изгибающих факторов. Иначе при гибкостях для отдельных ветвей колонн $\lambda \geq (70 - 80)$ неверное определение суммарного эффекта учета деформированной схемы рамы при различных комбинациях действующих нагрузок может привести к ошибкам в величине суммарного момента в сечении M_k более 10 %.

Ниже представлена методика расчета рамных каркасов промышленных зданий со ступенчатыми колоннами по деформированной схеме. При этом для нахождения расчетных суммарных изгибающих моментов используются различные формы потери устойчивости. В дальнейшем составную часть заданной нагрузки, которая вызывает схему деформации, совпадающей с одной из форм потери устойчивости рассматриваемой рамы, будем называть собственной нагрузкой. Суммарные изгибающие моменты в расчетных сечениях от расчетной комбинации действующих нагрузок могут быть представлены в виде:

$$M_k = \sum \bar{M}_k^{(i)} \cdot \left[1 / (1 - \gamma_k^i) \right], \quad (1)$$

где $\bar{M}_k^{(i)}$ – изгибающие моменты в расчетных сечениях стойки рамы от действия i -й собственной нагрузки, найденные по недеформированной схеме.

Отношение

$$\gamma_k^{(i)} = N_k / N_{k,кр}^{(i)} \quad (2)$$

учитывает влияние продольной силы в k -м сечении стойки на искомое усилие M_k от действия i -й собственной нагрузки. Здесь N_k – продольная сила в сечении k от суммарного воздействия всех видов собственных нагрузок; $N_{k,кр}^{(i)}$ – критическое значение продольной силы в k -м сечении стойки при i -й форме потери устойчивости рамы.

Характер действия внешних нагрузок показывает, что достаточно использовать первые 3 формы потери устойчивости для учета деформированной схемы рамы. Тогда

различные нагрузки на поперечную раму можно представить в виде суммы из 3-х собственных нагрузок:

$$(\vec{F}, \vec{w}, \vec{q}) = (\vec{w}^{(1)} + \vec{T}^{(1)} + \vec{D}_{k-c}^{(1)}) + (\vec{q}_{cn}^{(2)} + \vec{q}_n^{(2)}) + (\vec{D}_c^{(3)} + \vec{M}_q^{(3)}). \quad (3)$$

Проанализируем подробнее эти нагрузки.

Ветровая нагрузка по характеру действия вызывает деформацию, полностью совпадающую с первой формой потери устойчивости. Тормозная горизонтальная сила T от мостового крана вызывает деформацию рамы, близко совпадающую с 1-й формой потери устойчивости (рис. 2). Кососимметричная составляющая от давления мостовых кранов на подкрановые балки, равная $D_{k-c} = 0,5(D_{\max} - D_{\min})$, вызывает деформацию рамы, совпадающую с 1-й формой потери устойчивости.

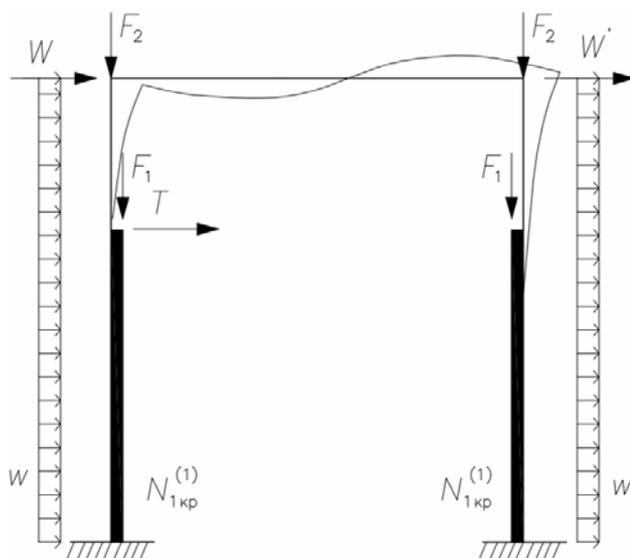


Рис. 2. Первая форма потери устойчивости

Вертикальные постоянная и снеговая нагрузки $(q_n + q_{cn})$ вызывают симметричную форму деформации рамы, которая полностью совпадает со 2-й формой потери устойчивости (рис. 3).

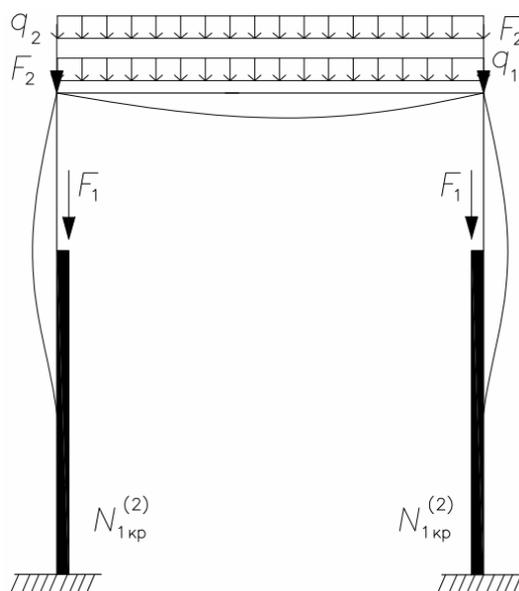


Рис. 3. Вторая форма потери устойчивости

Симметричная составляющая от давления мостовых кранов на ступени колонн, равная $D_c = 0,5(D_{\max} + D_{\min})$, вызывает деформацию рамы, совпадающую с 3-й формой потери устойчивости (рис. 4).

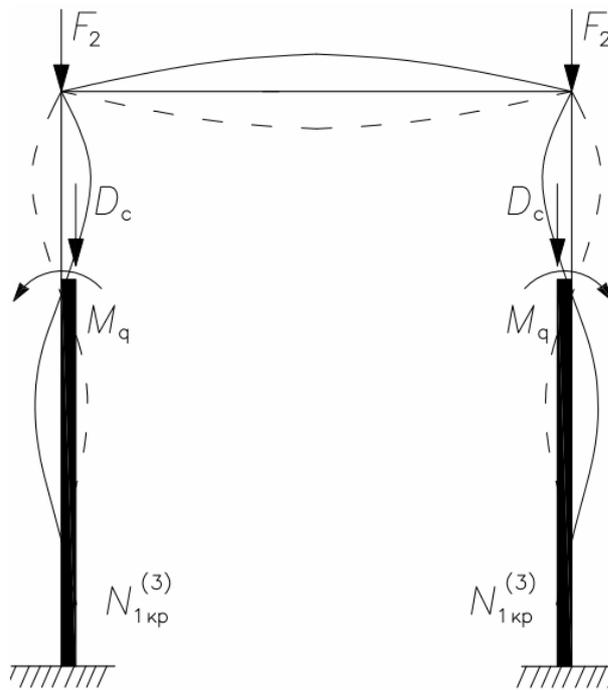


Рис. 4. Третья форма потери устойчивости

К этой группе собственных нагрузок относится также действие сосредоточенных моментов на уровне ступени M_q от вертикальных нагрузок q_n и $q_{сн}$ на ригели. Эти моменты возникают вследствие несовпадения осей колонн в нижней и верхней частях колонн на уровне ступеней.

Правомерность использования формулы (1) основана на принципе независимости действия сил при различных вариантах загрузки рамы. Этот принцип, а соответственно и формула (1), применимы только в том случае, когда действия изгибающих нагрузок будут складываться при равновесном состоянии всех элементов.

Использование собственных нагрузок и правильное определение отношения γ_k по (2) при различных формах потери устойчивости (до трех) будет давать результаты по (1), практически совпадающие с точным деформационным расчетом.

В качестве примера приведем анализ учета деформированной схемы на величины изгибающих моментов в расчетных сечениях от различных видов нагрузки для поперечной металлической рамы одноэтажного промышленного здания, показанной на рис. 1.

Исходные данные:

$$h_2 = 4,98 \text{ м}; h_1 = 12,45 \text{ м}; L = 24 \text{ м}; I_1 = 26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4; I_2 = 4,45 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4;$$

$$i_1 = 2,35; i_2 = 1; i_{\text{риг}} = 4,56.$$

Зависимость (1) имеет вид:

$$M_k = \bar{M}_k^{(1)} \cdot \eta_k^{(1)} + \bar{M}_k^{(2)} \cdot \eta_k^{(2)} + \bar{M}_k^{(3)} \cdot \eta_k^{(3)},$$

где коэффициенты $\eta_k^{(i)}$ с учетом (2)

$$\eta_k^{(i)} = 1 / (1 - \gamma_r^{(i)}) = 1 / (1 - N_k / N_{k,кр}^{(i)}) = 1 / \left[1 - (v_k / v_{k,кр}^{(i)})^2 \right],$$

$$v_k = \sqrt{N_k \cdot l_k^2 / EI_k} \quad [2-4]. \quad (4)$$

Примем допущение относительно форм потери устойчивости, рассматривая эти формы при одинаковых продольных силах в левой и правой колоннах рамы.

Для рассматриваемой рамы при $D_{\max} = 798,58$ кН и $D_{\min} = 206,38$ кН получим $D_{\text{ср}} = 502,48$ кН и $D_{\max} - D_{\min} = 592,2$ кН.

При этом для нижних ступеней колонн

$$N_{1\text{ср}} = 0,5 [1302,9 + (1302,9 - 592,2)] = 1006,8 \text{ кН.}$$

С помощью программно-вычислительного комплекса «Лира» находим первые три формы потери устойчивости и соответствующие им критические значения параметров продольных сил:

$$v_{1\text{кр}}^{(1)} = 1,73; \quad v_{2\text{кр}}^{(2)} = 4,16; \quad v_{2\text{кр}}^{(3)} = 4,82.$$

При вычислении коэффициентов $\eta_k^{(i)}$ по (4) значения N_k определим от суммарного воздействия всех нагрузок в таком сочетании, чтобы в одной из колонн продольная сила N_k имела наибольшее значение. Это будет при D_{\max} вблизи одной из колонн и составит $\max N_1 = 1302,9$ кН.

При этом расчетные значения параметров v для нижней и верхней ступеней по (4) равны:

$$\begin{aligned} \max v_1 &= \sqrt{N_1 \cdot l_1^2 / EI_1} = \sqrt{1302,9 \cdot 12,45^2 / (2,1 \cdot 10^8 \cdot 26 \cdot 10^{-4})} = 0,608; \\ \max v_2 &= 0,265 = 0,469 \max v_1. \end{aligned}$$

Тогда коэффициенты $\eta_k^{(i)}$ по (4) будут иметь наибольшие значения для всех (трех) форм потери устойчивости. С учетом этих положений и принятого допущения для левой (более загруженной) стойки по этой формуле получим:

$$\begin{aligned} \eta_1^{(1)} &= \frac{1}{1 - (v_1 / v_{1\text{кр}}^{(1)})^2} = \frac{1}{1 - (0,608 / 1,73)^2} = 1,14; \\ \eta_1^{(2)} &= \frac{1}{1 - (v_1 / v_{1\text{кр}}^{(2)})^2} = 1,021; \quad \eta_1^{(3)} = 1,015. \end{aligned}$$

Полученные результаты говорят о том, что наибольшее влияние деформации стоек рамы на значения изгибающих моментов в расчетных сечениях (до 14 %) отмечается при 1-й (основной) форме потери устойчивости, которая совпадает со схемой деформации от ветровой нагрузки и поперечного торможения крана. От действия крановой нагрузки на уровне ступеней (при $D_{\text{ср}}$) это влияние совсем мало (около 1,5 %), и им можно пренебречь.

Выводы

1. Предлагаемый подход к расчету рам со ступенчатыми стойками дает возможность численно оценить учет высших форм потери устойчивости на значения изгибающих моментов в различных сечениях стоек.

2. Рекомендации П-23-81* «Стальные конструкции» приводят к перерасходу металла до 10 %.

3. Расчет рам по деформированной схеме согласно предлагаемой методике приводит к увеличению $M_{\text{расч}}$ не более чем на 2 %.

Список литературы

1. Зернов, В.В. Алгоритм итерационного метода деформационного расчета плоских рам одноэтажных промышленных зданий на различные нагрузки и проверка их общей устойчивости / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2018. – №7. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no7/stroitel'naya-mehanika/7.9/at_download/file
2. Ласьков, Н.Н. Определение критической нагрузки для стропильных ферм в упругой и упругопластической стадиях работы / Н.Н. Ласьков, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 4.
3. Монахов, В.А. Методы численного расчета сжатых стержней на устойчивость / В.А. Монахов, М.Б. Зайцев, Д.А. Бураева // Моделирование и механика конструкций. – 2016. – №4. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no4/stroitel'naya-mehanika/4.5/at_download/file
4. 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/stroitel'naya-mehanika/6.4/at_download/file
5. Зернов, В.В. Определение рациональной жесткости стержней металлических ферм из условия равноустойчивости / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, Ю.В. Анурьева // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 1 (36). – С. 106–110.

References

1. Zernov, V.V. Algorithm of the iterative method of de-formational calculation of flat frames of one-storey industrial buildings for different loads and verification of their general stability / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2018. – No. 7. – Systems'. requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no7/stroitel'naya-mehanika/7.9/at_download/file
2. Laskov, N.N. Determination of the critical load for roof trusses in elastic and elastic-plastic stages of work/ N.N. Laskov, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Regional architecture and engineering. – 2014. – No. 4.
3. Monakhov, V.A. Methods of numerical calculation of compressed rods for stability / V.A. Monakhov, M.B. Zaytsev, D.A. Buraeva // Modeling and mechanics of structures. – 2016. – No. 4. – Systems. requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no4/stroitel'naya-mehanika/4.5/at_download/file
4. Zernov, V.V. Stability analysis of rod systems in the elastic-plastic stage / V.V. Zernov, M.B. Zaytsev, I.V. Anur'eva // Modeling and mechanics of structures. – 2017. – No. 6. – Systems. requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no6/stroitel'naya-mehanika/6.4/at_download/file
5. Zernov, V.V. Determination of rational rigidity of metal truss rods from the condition of equal stability / V.V. Zernov, M.B. Zaytsev, I.V. Anur'eva // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 1 (36). – P. 106–110.

УДК 69.009 +37.07+331.108.4

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

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

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

Penza State University of Architecture
and Construction

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

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

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

УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПОДКРАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

М.В. Арискин, И.Н. Гарькин

Рассматривается усиление железобетонной тавровой подкрановой балки по разработанной модели с использованием вычислительного комплекса SCAD 11.5; реализовано на одном из промышленных предприятий г.Пензы.

Ключевые слова: строительные конструкции, подкрановая балка, усиление, метод конечных элементов, вычислительный комплекс SCAD

STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE OVERHEAD- CRANE STRUCTURES

M.V. Ariskin, I.N. Garkin

An example of strengthening of reinforced concrete crane runway T-beam according to the developed model using the computing complex SCAD 11.5 is given. The given type of the strengthening is realized on one of the industrial enterprises of Penza.

Keywords: building structures, crane cranway beam, strengthening of structures, finite elements method, SCAD computing complex, engineering problem

В настоящее время как отечественная, так и зарубежная промышленная архитектура переживает кризис. Промышленные здания, возведенные в 50-70-х годах XX века, как физически, так и морально устаревают, а строительство новых производственных зданий почти не ведётся. Именно поэтому в современных условиях при всём многообразии технических решений по усилению строительных конструкций осталась актуальной разработка новых, возможно более экономичных и простых в реализации методов усиления.

Еще совсем недавно большая часть производственных зданий была оснащена мостовыми кранами, подкрановые балки под которые (из соображений экономии металла) часто выполнялись из железобетона. Однако, как показал опыт, железобетонные подкрановые балки обладают очень низкими эксплуатационными характеристиками. Неполный перечень наиболее часто встречающихся дефектов, возникающих в железобетонных подкрановых балках [4], приводится в табл. 1.

Рациональное решение этой проблемы – массовая замена железобетонных подкрановых балок на более качественные, стальные, что по экономическим соображениям не может быть реализовано. Это обуславливает безальтернативность разработки методов усиления в случае ремонта железобетонных подкрановых конструкций.

Типичные дефекты железобетонных подкрановых балок

| Дефект | Причины и последствия |
|--|--|
| Образование сквозных вертикальных трещин | Возникающие боковые усилия превышают нормативные значения в 4-7 раз, как следствие, возникают трещины, ширина которых превышает допустимую |
| Откол полок в местах крепления болтов | Уменьшение первоначальной полезной высоты полки в горизонтальной плоскости |
| Образование около опоры балки косых трещин нисходящего направления | Разрушение нижнего пояса подкрановой балки |
| Дефекты, возникающие от температурных воздействий на подкрановые балки, установленные на колонны крайнего ряда | Уменьшение несущей способности |

Приведем пример усиления железобетонной подкрановой балки таврового сечения на одном из промышленных предприятий города Пензы. При проведении экспертизы промышленной безопасности здания были выявлены такие дефекты подкрановой балки, которые делают дальнейшую безопасную эксплуатацию здания цеха невозможной [1]. Балка располагается в зоне отгрузки готовых изделий; на неё оказываются повышенные циклические воздействия мостовых кранов (работают два мостовых крана грузоподъемностью по 50 тонн каждый). В ходе эксплуатации в середине пролета балки (рис. 1) начала развиваться трещина, возникла опасность обрушения подкрановых конструкций.

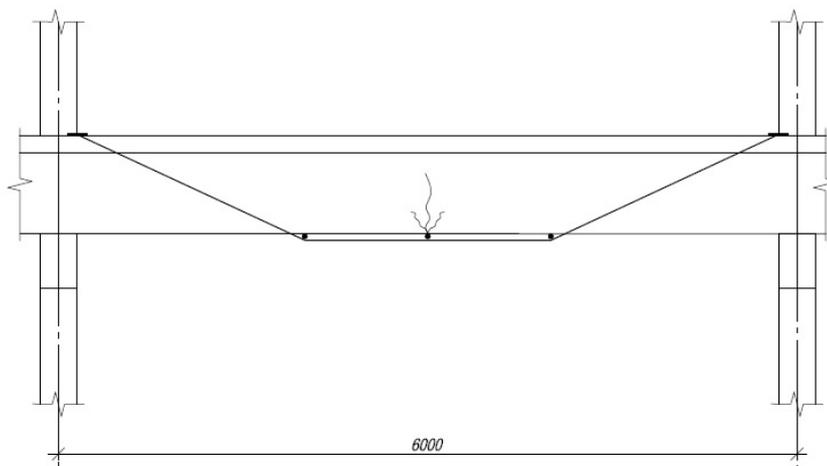


Рис. 1. Схема появления трещины в балке

Реализация усиления подкрановой балки осуществлялась в три этапа:

- разработка проекта усиления;
- построение модели усиленной подкрановой балки (в расчетно-графическом комплексе SCAD 11.5) [2];
- монтаж конструкций усиления.

Тавровая подкрановая конструкция имеет следующие характеристики: длина – 6 м; высота – 1,2 м; ширина верхнего пояса – 0,6 м; на балке установлен рельс марки Р65.

Для восстановления работоспособности подкрановой конструкции вводится стальной каркас (рис. 2, а,б), закрепленный на высокопрочных шпильках (длина – 850 мм, диаметр – 24 мм; спецификация элементов приведена в табл. 2).

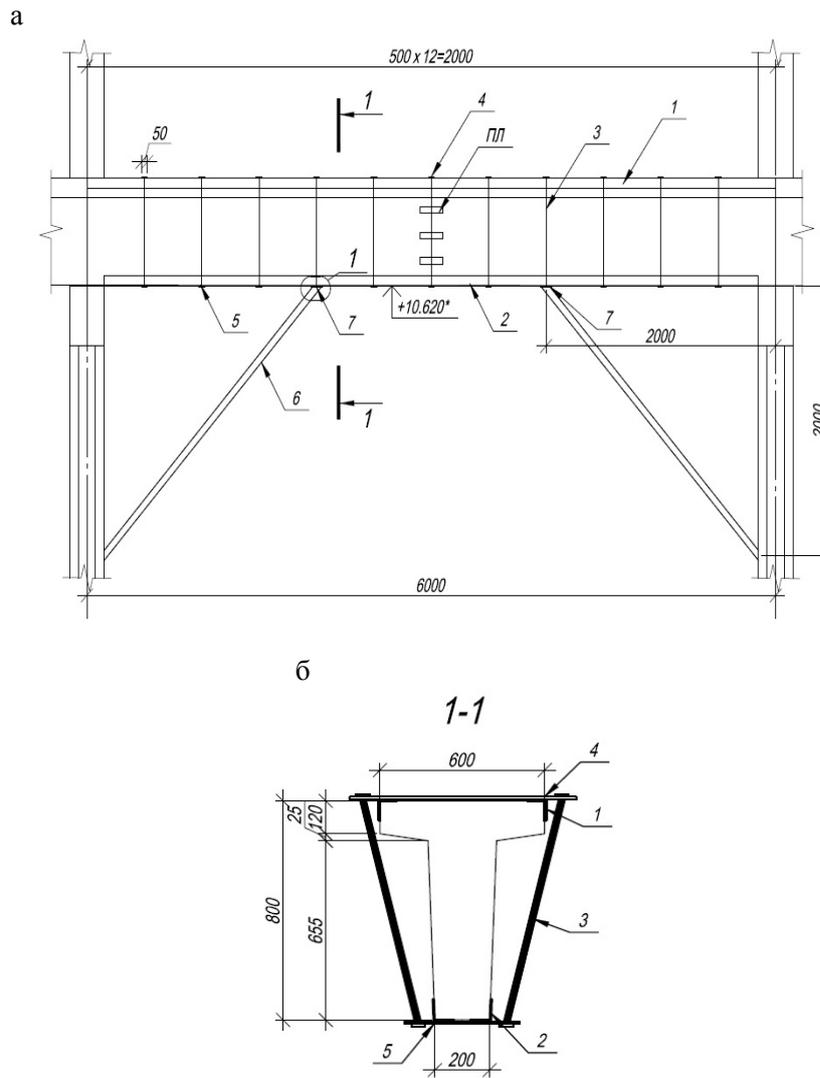


Рис.2

Таблица 2

Спецификация элементов усиления

| Поз. | Обозначение | Наименование | | Кол. | Масса, ед., кг | Примечание |
|------|-----------------|--------------|---------|------|----------------|------------|
| 1 | ГОСТ 8509-93 | L75x5 | L= 6000 | 2 | 34,8 | 69,6 |
| 2 | ГОСТ 8509-93 | L75x5 | L= 5700 | 2 | 33,06 | 66,12 |
| 3 | ТУ14-4-157-2000 | Шпилька Ø 24 | L= 850 | 36 | 2,56 | 92,16 |
| 4 | ГОСТ 19903-74 | 10x50 | L= 820 | 18 | 3,22 | 57,96 |
| 5 | ГОСТ 19903-74 | 10x50 | L= 420 | 16 | 1,65 | 26,4 |
| 6 | ГОСТ 8278-83 | [22 | L= 2830 | 8 | 59,43 | 475,44 |
| 7 | ГОСТ 19903-74 | 10x150 | L= 420 | 2 | 4,94 | 9,88 |

По параметрам каркаса усиления (и подкрановой конструкции), характеристикам кранового оборудования, характеру нагрузок была создана и обработана модель в программном комплексе SCAD 11.5 (рис. 3–5).

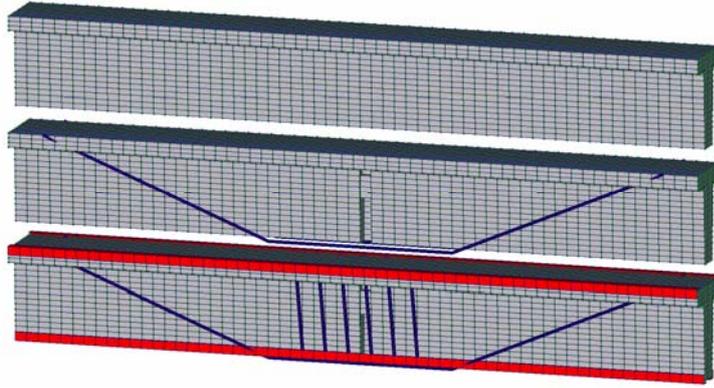


Рис. 3. Модель усиления подкрановой балки

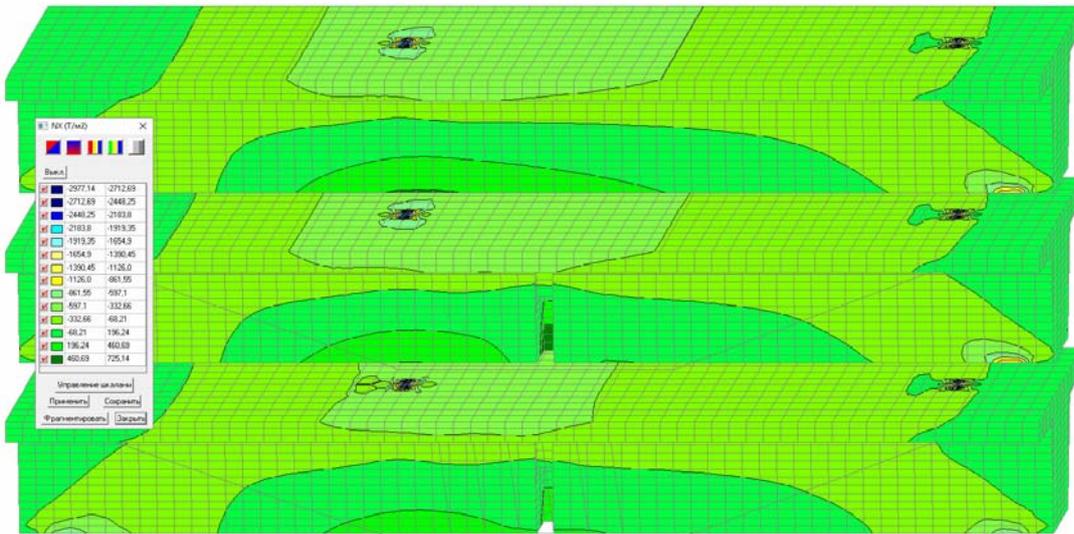


Рис. 4. Изополя напряжений

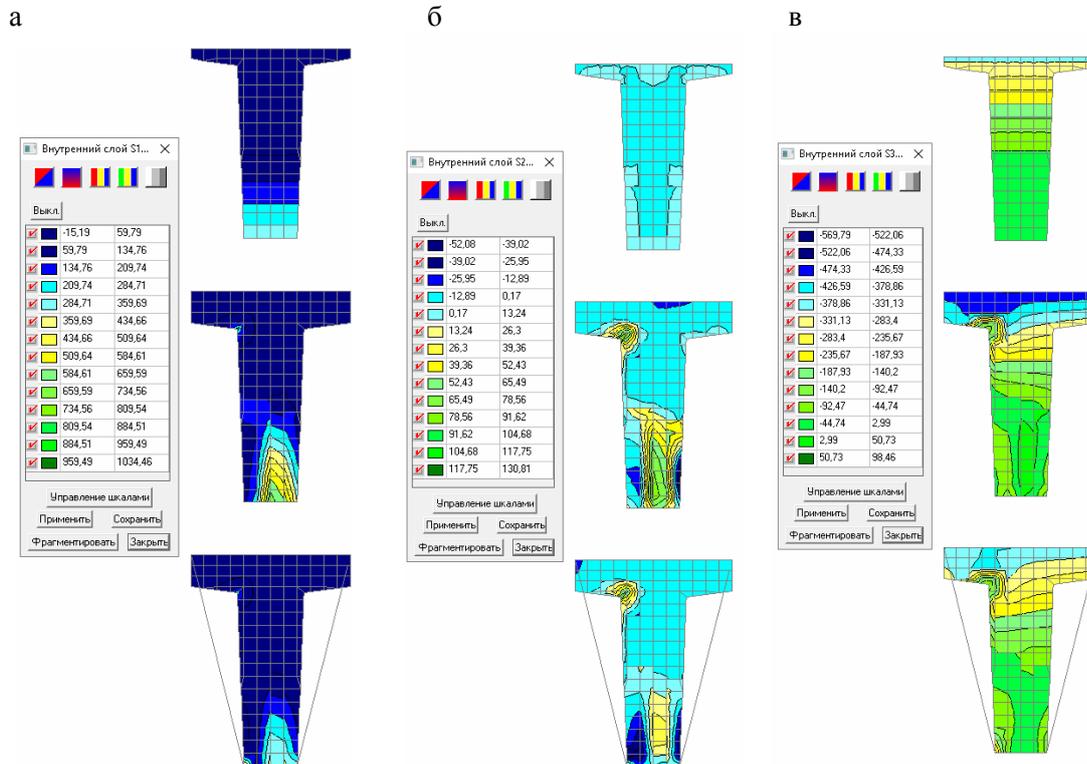


Рис. 5. Напряжения в дефектном сечении

Результаты моделирования на действующие нагрузки в расчетно-графическом комплексе SCAD показали:

- усиленная конструкция по характеру распределения напряжений соответствует цельной балке;
- во всех сечениях удовлетворяются условия прочности и деформативности;
- максимальные прогибы (0,87 мм) не превышают предельно допустимых значений ($6000/400=15$ мм).

Приведенные конструктивные решения оказались верными: их реализация помогла остановить развитие трещин, возникших от длительных силовых воздействий в середине пролёта; удалось стабилизировать состояние конструкции рассматриваемой подкрановой балки и продлить срок её безопасной эксплуатации.

Список литературы

1. Гарькин, И.Н. Экспертиза промышленной безопасности: обследование зданий с крановыми нагрузками / И.Н. Гарькин, И.А. Гарькина // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 5. – С. 41–45.
2. Арискин, М.В. Анализ причин падения башенного крана на основе построения модели в SCAD 11.5 / М.В. Арискин, И.Н. Гарькин // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 10. – Ч. 2. – С.243–247.
3. Гарькина, И.А. Многоцелевые системы: формализация целей, оптимизация / И.А. Гарькина // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2017. – № 1 (4). – С. 92–95.
4. Анализ аварий и повреждений железобетонных конструкций: сб. науч. тр. / под ред. канд. техн. наук Б. Н. Мизернюка. – М.: Стройиздат, 1981.

References

1. Garkin, I.N. Expertise of the industrial buildings: engineering survey of the buildings with crane forces / I.N. Garkin, I.A. Garkina // Modern science-intensive technologies. – 2018. – № 5. – P. 41–45.
2. Ariskin, M.V. Analysis of the causes of the failure of the tower crane on the basis of the model in SCAD 11.5 / M.V. Ariskin, I.N. Garkin // Fundamental study. – 2016. – № 10. – Part 2. – P. 243–247.
3. Garkina, I.A. Multipurpose systems: goal formalization, optimization/ I.A. Garkina // Bulletin of PGWS: construction, science and education. – 2017. – № 1 (4). – P. 92–95.
4. Analysis of accidents and damages of reinforced concrete structures: collection of scientific works / under the editorship of cand. of sciences B.N. Mizernyika. – M.: Stroiizdat, 1981.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 697.957

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

Орлова Наталья Александровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: nataor23@yandex.ru

Фильчакина Ирина Николаевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: filchakina80@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Eremkin Alexander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Heat, gas supply
and ventilation»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Orlova Natalia Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Heat, gas supply and
ventilation»
E-mail: filchakina80@mail.ru

Filchakina Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Heat, gas supply and
ventilation»
E-mail: filchakina80@mail.ru

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ВДОЛЬ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ С РАВНОМЕРНОЙ РАЗДАЧЕЙ ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА

А.И. Ерёмкин, Н.А.Орлова, И.Н. Фильчакина

Рассмотрены проблемы создания воздухораспределителей с равномерной раздачей и интенсивным гашением приточных струй. Изучены закономерности движения воздуха по длине воздухораспределителя с постоянным линейно уменьшающимся поперечным сечением и с постоянным статическим давлением.

Предложена методика определения закономерности изменения параметров потока вдоль воздухораспределителя с равномерной раздачей приточного воздуха через плоские оппозитные щелевидные насадки, определена область их применения на предприятиях текстильной промышленности.

*Ключевые слова: предприятия текстильной промышленности, кондиционирование, воздухо-
хораспределитель, плоские оппозитные щелевидные насадки, закономерности движения
воздуха по длине*

METHOD OF DETERMINING REGULARITIES OF CHANGES IN PARAMETERS OF FLOW ALONG DIFFUSER WITH UNIFORM DISTRIBUTION OF SUPPLY AIR

A.I. Yermukin, N.A.Orlova, I.N. Filchakina

The creation of diffusers with uniform distribution and intensive damping of the supply jets is described. The regularities of air movement along the length of the air distributor with a constant linearly decreasing cross-section and with a constant static pressure are studied.

The method of determination of regularity of change of parameters of air along the air distributor with uniform distribution of supply air through flat oppositional slit-like nozzles is offered and the field of their application at the enterprises of textile industry is shown.

Keywords: textile industry, air-conditioning, diffuser, flat boxer slit-like nozzles, patterns of air movement on the length

Для обеспечения равномерности параметров – температуры, относительной влажности, скорости воздуха в рабочей и технологической зонах помещения – используются различные конструкции воздухораспределительных устройств [1...3].

При разработке конструкции воздухораспределителя для равномерной подачи приточного воздуха необходимо было решить следующие задачи:

– изменение площади поперечного сечения по определенному закону для поддержания постоянного статического давления внутри канала (воздухораспределители постоянного статического давления);

– гашение приточных струй воздуха, вытекающих с высокой скоростью из отверстий сравнительно малого поперечного сечения.

Для решения поставленных задач рассмотрим воздухораспределитель длиной l с изменяющейся площадью поперечного сечения $F(Z)$ вдоль канала (рис. 1). На входе в канал при $Z = 0$ площадь его поперечного сечения F_0 , продольная скорость потока W_0 , объемный расход воздуха $L_0 = W_0 F_0$. Далее объемный расход воздуха вследствие равномерной раздачи вдоль канала линейно уменьшается:

$$L(Z) = W(Z) \cdot F(Z) = L_0 - \frac{L_0 Z}{l} = L_0 \left(1 - \frac{Z}{l}\right), \quad (1)$$

где L_0/l – объемный расход воздуха, вытекающего из канала на каждом погонном метре, остается постоянным вдоль канала.

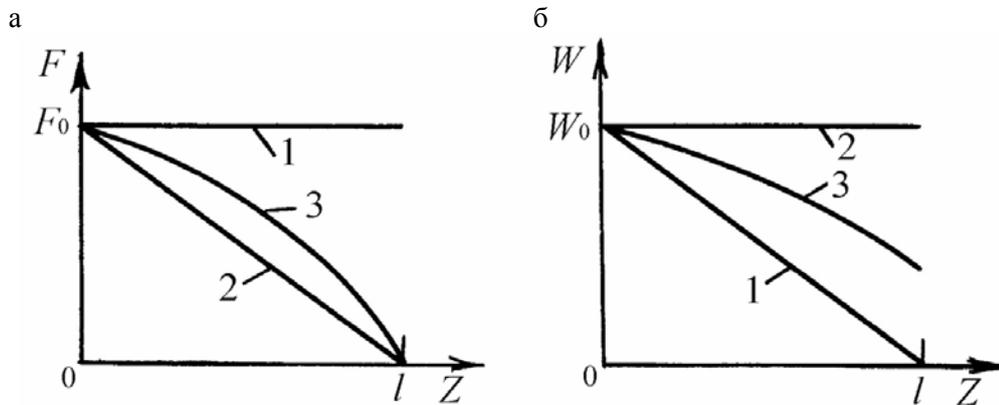


Рис. 1. Изменение площади F поперечного сечения (а) и продольной скорости потока W (б) вдоль воздухораспределителей для равномерной раздачи воздуха:

1 – канал постоянного поперечного сечения; 2 – канал с линейно уменьшающейся площадью поперечного сечения; 3 – канал с постоянным статическим давлением

В конце канала при $Z = l$ объемный расход $L(Z = l) = WF$ равен нулю, т.е. здесь или площадь поперечного сечения $F(l)$ равна нулю, или продольная скорость потока $W(l)$ равна нулю.

Для исследования изменения параметров потока вдоль воздухораспределителя используем уравнение движения воздуха в проекции на ось Z :

$$\rho W \frac{dW}{dZ} = -\frac{dP}{dZ} - R_l. \quad (2)$$

Слагаемое R_l учитывает потери давления на трение на произвольном участке канала длиной 1 м. Если известны форма, размеры $F(Z)$ поперечного сечения и скорость потока $W(Z)$, то величину R_l можно найти из справочной литературы или с помощью соответствующего критериального уравнения для коэффициента сопротивления трения, т.е. считаем, что $R_l = R_l[F(Z), W(Z)] = R_l(Z)$ – известная зависимость.

Выполним интегрирование уравнения (2) от входного $Z = 0$ до произвольного сечения канала с координатой Z :

$$\int_0^Z \rho W \frac{dW}{dZ} dZ = - \int_0^Z \frac{dP}{dZ} dZ - \int_0^Z R_l(Z) dZ. \quad (3)$$

Проведя ряд преобразований

$$\frac{\rho W^2}{2} \Big|_0^Z = -P \Big|_0^Z - \int_0^Z R_l(Z) dZ; \quad \frac{\rho W^2(Z)}{2} - \frac{\rho W_0^2}{2} = P_0 - P(Z) - \int_0^Z R_l(Z) dZ,$$

окончательно запишем полученный результат в виде

$$P(Z) = P_0 + \left[\frac{\rho W_0^2}{2} - \frac{\rho W^2(Z)}{2} \right] - \int_0^Z R_l(Z) dZ, \quad (4)$$

позволяющем определить изменение статического давления $P(Z)$ вдоль канала, начиная от его величины P_0 на входе.

Слагаемое в правой части

$$\frac{\rho W_0^2}{2} - \frac{\rho W^2(Z)}{2} = \Delta P_{\text{дин}}(Z) \quad (5)$$

характеризует повышение статического давления вдоль канала вследствие вызванного торможением потока изменения его динамического напора $\Delta P_{\text{дин}}(Z)$. Для входного сечения $\Delta P_{\text{дин}}(0) = 0$.

Слагаемое

$$- \int_0^Z R_l(Z) dZ = -\Delta P_{\text{тр}}(Z) \quad (6)$$

определяет величину понижения (потерь) статического давления вдоль канала от его входа $Z = 0$ вследствие трения. При этом $-\Delta P_{\text{тр}}(Z) < 0$, т.е. за счет затрат на преодоление трения статическое давление всегда падает. Величина $\Delta P_{\text{тр}}(Z)$ всегда монотонно возрастает от нулевого значения на входе. Конкретный вид этой зависимости определяется численным интегрированием предварительно рассчитанной функции $R_l(Z)$.

Приведение соотношения (4) к виду

$$P(Z) = P_0 + \Delta P_{\text{дин}}(Z) - \Delta P_{\text{тр}}(Z) \quad (7)$$

придает ему отчетливый физический смысл: статическое давление вдоль канала возрастает за счет изменения динамического напора при торможении потока и убывает вследствие потерь на преодоление трения.

Далее рассмотрим вариант воздухораспределителя постоянного поперечного сечения $F(Z) = F_0 = \text{const}$.

В случае постоянства поперечного сечения $F(Z) = F_0 = \text{const}$ из условия линейного снижения расхода (1) следует, что в таком воздухораспределителе продольная скорость линейно падает вдоль канала

$$W(Z) = W_0(1 - Z/l) \quad (8)$$

и в его окончании приобретает нулевое значение $W(l) = 0$.

Поток равномерно тормозится, и повышение статического давления вдоль канала за счет изменения динамического напора является максимально возможным. Для окончания канала $Z = l$, где $W = 0$, в соответствии с выражением (5) получаем:

$$\Delta P_{\text{дин}}(Z = l) = \frac{\rho W_0^2}{2}.$$

Примерный вид изменения статического давления в таком воздухораспределителе показан на рис. 2. Кривая 1 соответствует повышению статического давления в канале за счет торможения потока, а кривая 2 – снижению давления вследствие потерь на трение. Кривая 3 свидетельствует о монотонном увеличении статического давления в потоке вдоль канала (является максимально возможным).

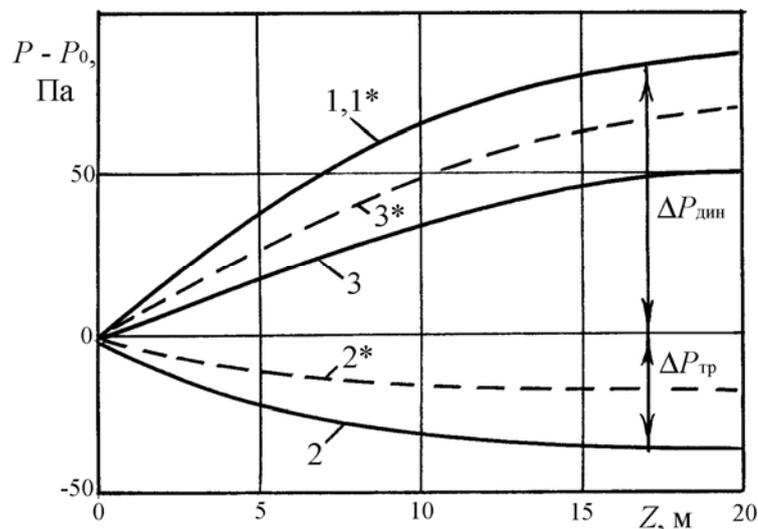


Рис. 2. Изменение статического давления вдоль воздухораспределителя постоянного поперечного сечения:

1 – повышение давления за счет изменения динамического напора при торможении потока; 2 – понижение давления вследствие потерь на преодоление трения; 3 – результирующая кривая изменения статического давления в потоке вдоль канала; 1*, 2*, 3* – соответственно то же для воздухораспределителя постоянного поперечного сечения площадью $3F_0$ с трехсторонней раздачей

Изучим случай воздухораспределителя с линейно уменьшающимся поперечным сечением $F(Z) = F_0(1 - Z/l)$.

Для линейно сужающегося канала $F(Z) = F_0(1 - Z/l)$ с равномерной раздачей из условия (1) следует постоянство продольной скорости вдоль канала $W(Z) = W_0 = \text{const}$. Следовательно, в этом воздухораспределителе и динамический напор $\rho W_0^2/2$ остается постоянным. Изменение статического давления за счет изменения динамического напора при торможении потока согласно (5) также равно нулю $\Delta P_{\text{дин}}(Z) = 0$.

В итоге для такого канала в соответствии с (7) получаем:

$$P(Z) = P_0 - \Delta P_{\text{тр}}(Z). \quad (9)$$

Отсюда следует, что статическое давление в линейно сужающемся воздухораспределителе всегда монотонно понижается в точном соответствии с потерями на трение.

Исследуем вариант воздухораспределителя с постоянным статическим давлением $P(Z) = P_0 = \text{const}$.

В воздухораспределителе постоянного поперечного сечения продольная скорость линейно уменьшается, а статическое давление монотонно возрастает $P(Z) > P_0$, тогда как в линейно сужающемся воздухораспределителе скорость потока и его динамический напор остаются постоянными, а статическое давление монотонно снижается $P(Z) < P_0$.

Существует промежуточный вариант между этими предельными случаями, в котором статическое давление вдоль канала может оставаться постоянным $P(Z) = P_0 = \text{const}$. В соответствии с выражением (7) это возможно, когда точно выполняется соотношение $\Delta P_{\text{дин}}(Z) = \Delta P_{\text{тр}}(Z)$, т.е. когда повышение статического давления в канале за счет изменения динамического напора при торможении потока в точности затрачивается на преодоление трения, в результате чего итоговая величина статического давления вдоль канала остается постоянной и равной P_0 .

В воздухораспределителе с постоянным статическим давлением необходимо определить изменение $F(Z)$ площади поперечного сечения и изменение $W(Z)$ скорости потока вдоль канала. Поток в таком канале тормозится, но не полностью, т.е. не до нулевой скорости: $W(l) \neq 0$ (кривая 3 на рис. 1, б). Поэтому для выполнения условия равенства нулю объемного расхода в конце канала $L(l) = W(l)F(l) = 0$ необходимо, чтобы площадь поперечного сечения в его конце была равна нулю $F(l) = 0$. Такой канал полностью сужается, но остается по площади поперечного сечения всегда больше линейно сужающегося, и только в конце оба они полностью сходят на нет (кривые 2, 3 на рис. 1, а).

Результаты полученных исследований позволили разработать воздухораспределитель равномерной раздачи приточного воздуха через плоские оппозитные щели (рис. 3).

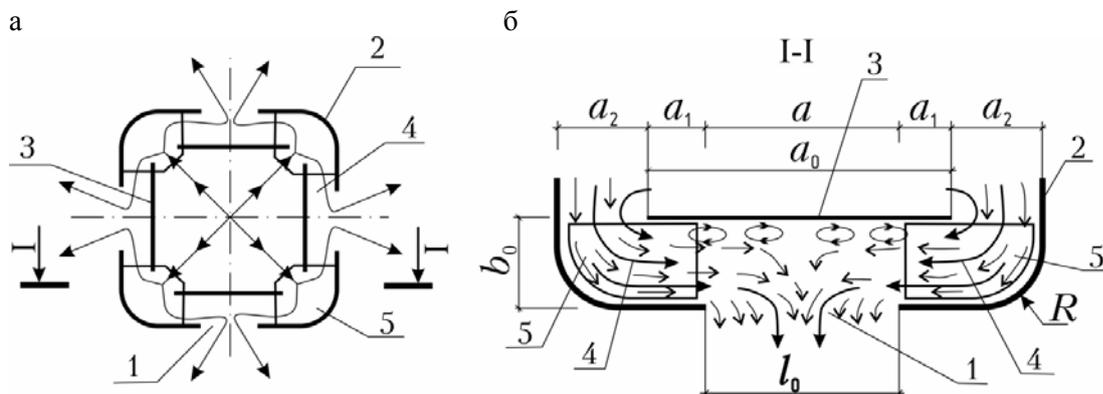


Рис. 3. Элементы конструкции воздухораспределительного устройства с оппозитными щелевидными насадками:

- а – поперечное сечение воздухораспределителя с четырёхсторонней воздухоподачей;
- б – исследуемый фрагмент воздухораспределителя;
- 1 – результирующая щель; 2 – стенка воздухопровода; 3 – плоский экран; 4 – оппозитные щелевидные насадки; 5 – разделитель потока

Данное устройство состоит из прямоугольной щели 1, в которой формируется результирующая струя и которая расположена в стенке воздуховода 2, плоского экрана 3 и оппозитных щелевидных насадок 4. Стенки воздуховода соединены между собой под прямым углом с радиусом $R = b_0$. Экран 3 расположен параллельно движению потока в воздуховоде и перпендикулярно направлению движения воздуха к оппозитным щелевидным насадкам, которые образуют под экраном две встречные соосные полуограниченные настилающиеся плоские струи, после соударений которых образуется результирующий поток.

Разработанный воздухораспределитель (рис. 3, а) позволяет раздавать приточный воздух через оппозитные щелевидные насадки, устроенные в одной или нескольких боковых стенках воздуховода (рис. 3, б).

В качестве определяющих геометрических параметров приняты расстояние l_0 между оппозитными щелевидными насадками, высота щелевидного насадка b_0 и относительный параметр $l_n = l_0/b_0$. Испытание разработанного устройства проводилось при следующих постоянных конструктивных размерах: $a_1 = a_2 = b_0$ и $R = b_0$. Размер плоского экрана составляет a_0 и превышает значение l_0 на величину $2a_1$. При таких размерах экран 3 и стенки воздуховода 2 образуют оппозитный щелевидный насадок 4 длиной a_1 , обеспечивающий максимальный угол соударения встречных плоских струй.

Варианты воздухораспределителей постоянного статического давления представлены на рис. 4.

Для равномерной подачи по длине воздухораспределителя приточного воздуха разработанные конструкции являются устройствами постоянного статического давления. Это достигается уменьшением поперечного сечения воздухораспределителя по ходу движения воздуха, пропорционально выходу воздуха из результирующей щели постоянной ширины.

Изменение поперечного сечения производится по одной или двум сторонам воздухораспределительного устройства (см. рис. 4), при этом условия и характер движения воздушного потока внутри устройства сохраняются, а внутренние геометрические размеры каналов и щелей (кроме результирующей) изменяются пропорционально изменению количества истекающего через них воздуха.

Разработанные воздухораспределительные устройства могут быть выполнены в виде насадка (рис. 5). В зависимости от различных условий они могут применяться при организации воздухообмена в производственных помещениях комбинированным способом, когда одна часть приточного воздуха локальными системами технологического кондиционирования подается в технологическое оборудование, а другая часть – в нижнюю зону на уровне одного метра от пола равномерно через приточные насадки, установленные вдоль наружных стен или в объеме помещения вдоль несущих строительных колонн, или свободно в виде опусков. Данное решение применяется в том случае, если не представляется возможным подать весь приточный воздух локально в технологическое оборудование и рабочую зону.

Приточные насадки (рис. 5) с оппозитными щелями имеют укороченную форму и те же конструктивные решения, что и воздухораспределители удлиненного типа (см. рис. 4). Варианты конструкций в виде насадка с четырех-, трех-, двух- и односторонней воздухоподачей приведены на рис. 5.

Возможны варианты конструкции приточного насадка без изменения сечения, когда внутри устройства устанавливается конус 1 (см. рис. 5), обеспечивающий полное заполнение внутреннего пространства воздухом и поддержание постоянного статического давления.

Конструктивные размеры предлагаемых воздухораспределительных устройств определяются расчетом в зависимости от объема подаваемого приточного воздуха, его температуры и скорости истечения струи, начальных размеров, места установки в производственных помещениях.

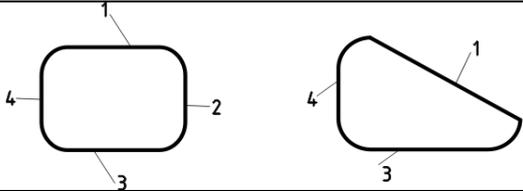
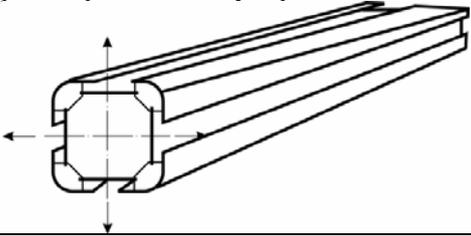
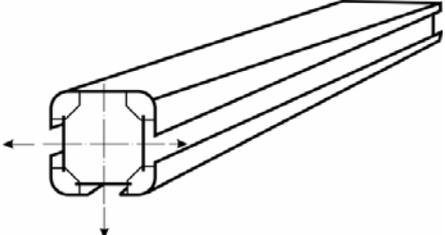
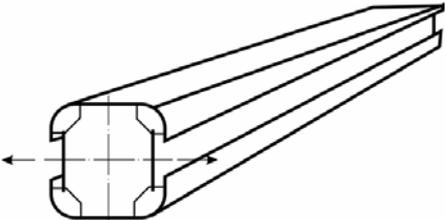
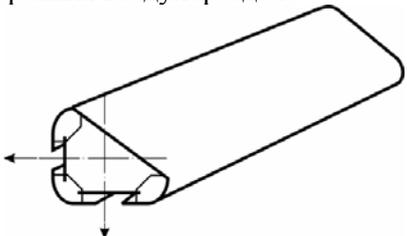
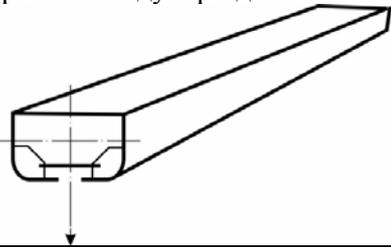
| | |
|--|---|
|  | <p>Схема расположения сторон воздухораспределительного устройства</p> |
| <p>четырёхсторонняя воздухораздача</p>  | <p>изменение сечения по стороне 1 или 2 и 4</p> |
| <p>трехсторонняя воздухораздача</p>  | <p>изменение сечения по стороне 1 или 2 и 4</p> |
| <p>двухсторонняя воздухораздача</p>  | <p>изменение сечения по стороне 1 или 2 и 4</p> |
| <p>двухсторонняя воздухораздача</p>  | <p>изменение сечения по стороне 1</p> |
| <p>односторонняя воздухораздача</p>  | <p>изменение сечения по стороне 1</p> |

Рис. 4. Воздухораспределительное устройство с различными вариантами изменения сечения

Разработанные воздухораспределители рекомендуется использовать в чесальных, прядильных и ткацких цехах текстильных предприятий для создания в рабочей и технологической зонах равномерных параметров температуры, относительной влажности и подвижности воздуха, требуемых по технологии производства.

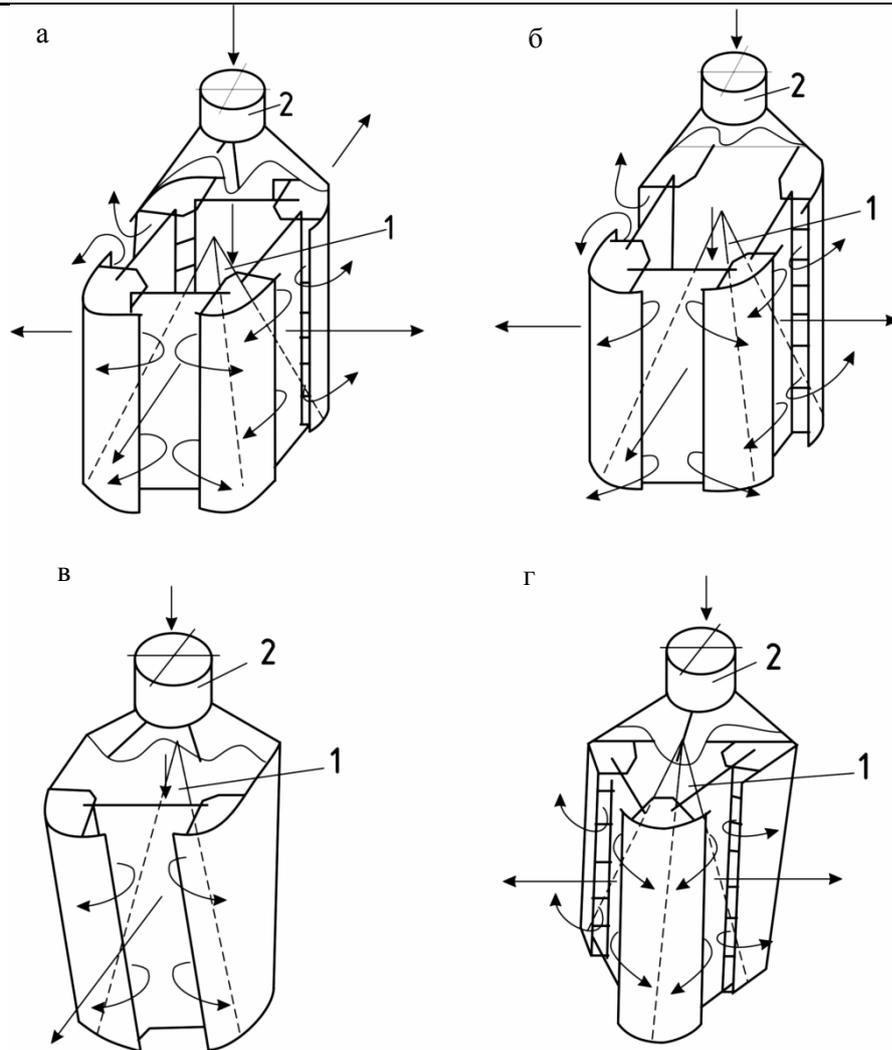


Рис. 5. Воздухораспределительные насадки с оппозитными щелями:
 а – с четырехсторонней воздухораздачей; б – с трехсторонней воздухораздачей;
 в – с односторонней воздухораздачей; г – с двухсторонней воздухораздачей;
 1 – конус; 2 – патрубок

В прядильном отделе (рис. 6) воздухораздачу предлагается осуществлять с использованием разработанного воздухораспределителя (патенты № 2128253; № 1664901; № 2166152) [4...6] с оппозитными щелевидными насадками для интенсивного гашения приточных струй. Данные воздухораспределители позволяют подавать приточный воздух непосредственно в нижнюю зону к местам обработки текстильных материалов (ровницы в бобинах).

Воздухораспределитель 3, установленный на рамке прядильной машины 1 (см. рис. 6, 7), позволяет подавать сравнительно большие массы приточного воздуха и обеспечивает достаточно малые скорости воздуха в рабочей зоне. При этом осуществляется трехсторонняя подача воздуха через воздуховыпускные щели 4, сделанные снизу справа и слева в стенках воздухораспределителя.

Воздухораспределитель (рис.7) необходимо установить на ровничной рамке по длине прядильной машины 1 так, чтобы не затруднять работу прядильщицы при замене пустых бобин полными, а воздуховыпускные щели (отверстия) в воздухораспределителе разместить таким образом, чтобы выходящий воздушный поток омывал бобины с ровницей 3 и 4. При таком способе воздухораздачи будет осуществляться кондиционирование ровницы 3 непосредственно в период прядения.

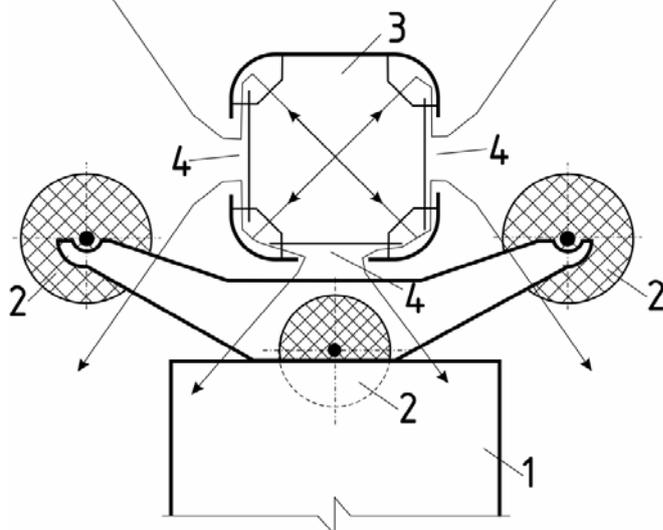


Рис. 6. Схема установки воздухораспределителя на раме прядильной машины:
1 – прядильная машина; 2 – бобины с ровницей; 3 – воздухораспределитель с трехсторонней подачей и оппозитными щелями; 4 – наружная воздуховыпускающая щель



Рис. 7. Установка воздухораспределителя на раме прядильной машины в зоне ровницы:
1 – прядильная машина; 2 – воздухораспределитель;
3 – обрабатываемая бобина с ровницей; 4 – запасные бобины с ровницей

В чесальном отделе предлагается осуществить микроклиматизацию зоны каретки, используя для этого тот же принцип, что и на прядильной машине, и воздухораспределитель предусматривается установить справа и слева у каретки в виде «воздушных завес». Здесь ровница будет наматываться на бобины и одновременно увлажняться, и в дальнейшем в толще бобины может сохраниться приобретенная влага, что обеспечит лучшие условия для кондиционирования ровницы на прядильной машине. В ткацком производстве воздухораспределитель рекомендуется устанавливать под ткацкий станок в зоне свободно развернутых нитей, которые будут поглощать влагу из кондиционированного воздуха в процессе производства ткани.

В предлагаемых случаях приточный воздух кратчайшим путем поступает в рабочую зону, не загрязняясь вредностями в помещении, и делает более благоприятной гигиеническую обстановку в этой зоне. Кроме того, при данном способе не нужно переувлажнять и переохлаждать приточный воздух, а также требуется ассимилировать

не все тепло, поступающее в помещение, а только то, которое попадает в рабочую и технологическую зоны, что является предпосылкой для существенного сокращения воздухообменов и мощности самих систем технологического кондиционирования воздуха. Для этого важно установить количественные показатели теплопоступлений в рабочую зону и удаляемого воздуха из верхней части помещения.

Подача приточного воздуха с помощью разработанного воздухораспределителя в нижнюю и технологическую зоны позволяет использовать более эффективную схему воздухообмена «снизу вверх» по типу вытесняющей вентиляции, которая по воздухообмену будет наиболее рациональной. Значение критерия эффективности может достигать 4,5–5. Снизится теплопоступление в рабочую зону, и повысится коэффициент использования приточного воздуха.

Список литературы

1. Еремкин, А.И. Локальное кондиционирование вытесняющего типа текстильных предприятий / А.И. Еремкин. – Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2006. – 390 с.
2. Патент РФ № 2128253. Устройство локальной раздачи воздуха / А.И. Ерёмкин, О.А. Базорова; заявитель и патентообладатель Пензенский архит.-строит. ин-т 96123359//2; заявл. 10.12.96; Опубл. 20.08.2002. Бюл. №9.
3. Фильчакина, И.Н. Технологическое кондиционирование воздуха локальным способом по типу вытесняющей вентиляции текстильных предприятий / И.Н. Фильчакина, А.И. Еремкин. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 203 с.
4. Оценка эффективности локальной системы технологического кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции / А.И. Еремкин [и др.] // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №1.
5. Денисихина, Д.М. Методология построения математических моделей для задач вентиляции и кондиционирования воздуха / Д.М. Денисихина // VI Международная конференция «Воздух-2010». – СПб., 2010. – С. 54–56.
6. Леманов, В.В. Экспериментальное исследование микроструй / В.В. Леманов, В.И. Терехов, К.А. Шаров, А.А. Шумейко // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (5). – С. 2305–2307.

References

1. Eremkin, A.I. Local conditioning of the displacing type of textile enterprises / A.I. Eremkin. – Saratov: Saratov State Technical University, 2006. – 390 p.
2. Patent of the Russian Federation No. 2128253. Air distributor / A. I. Eremkin, O.A. Bazorova; Published on 20.08.2002. Newsletter №9.
3. Filchakina, I.N. Technological conditioning of air by a local method as a type of displacement ventilation of textile enterprises / I.N. Filchakina, A.I. Eremkin. – Penza: PGUAS, 2012. – 203 p.
4. Evaluation of the effectiveness of the local system of technological air conditioning by the type of displacement ventilation / A.I. Eremkin [etc.] // Regional architecture and engineering. – 2018. – No.1.
5. Denisixina, D.M. Methodology of constructing mathematical models for the problems of ventilation and conditioning of air / D. M. Denisixina // VI international conference «Air-2010». – SPb., 2010. – P. 54–56.
6. Lemanom? V.V. Experimental study of microjets / V.V. Lemanom, V.I. Terekhov, K.A. Sharov, A.A. Shumeiko // Vestnik Novgorod University named after N.I. Lobachevsky. – 2011. – № 4 (5). – P. 2305–2307.

УДК 677.027.12:519.87

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

Ерёмкин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Баканова Светлана Викторовна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: SvBakanova@mail.ru

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

Eremkin Alexander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Heat, gas supply
and ventilation»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Bakanova Svetlana Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Heat, gas supply and
ventilation»
E-mail: SvBakanova@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УВЛАЖНЕНИЯ КОНДИЦИОНИРОВАННЫМ ВОЗДУХОМ ТЕКСТИЛЬНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.И. Еремкин, С.В. Баканова

Представлен компактно сформированный текстильный материал в виде объемно-пористой среды с усредненными физико-химическими и технологическими параметрами. Предлагаемая математическая модель позволяет проводить теоретические и численные исследования закономерностей процесса увлажнения текстильного материала. Модель представляет собой краевую задачу, решение которой дает возможность рассчитывать распределение относительной влажности кондиционированного воздушного потока в толще пористой среды. Это позволяет определить оптимальные параметры процесса увлажнения текстильных волокон.

Установлено, что на предприятиях текстильной промышленности на разных стадиях производства пряжи требуется определенная влажность переработанных волокон. Требуемую влажность предлагается обеспечить путем подачи кондиционированного воздуха с помощью разработанного воздухораспределителя, непосредственно в технологическом оборудовании. Параметры температуры и относительной влажности подаваемого воздуха определяются на основе математического моделирования процесса увлажнения текстильных волокон при взаимодействии с кондиционированным воздухом.

Ключевые слова: текстильный материал, пористая среда, кондиционирование воздуха, увлажнение, математическое моделирование

STUDY OF HYDRATION PROCESSES OF AIR CONDITIONING OF TEXTILE SEMI-FINISHED PRODUCTS ON THE BASIS OF MATHEMATICAL MODELING

A.I. Eremkin, S.V. Bakanova

A compact textile material in the form of volume-porous medium with averaged physical, chemical and technological parameters is presented. A mathematical model for theoretical and numerical studies of the laws of the process of moistening of a textile material is proposed. The mathematical model is a boundary value problem, the solution of which makes it possible to calculate the distribution of relative humidity of the conditioned air flow in the thickness of porous medium. This will determine the optimal parameters of the process of moisture textile fibers.

It is established that an enterprises of the textile industry in the production of yarn at different stages of production requires a certain moisture content of recycled fibers. It is proposed to provide the required humidity by supplying air-conditioned air with the help of the developed air distributor, directly in the process equipment. The parameters of temperature and relative humidity of the supplied air are proposed to be determined on the basis of mathematical modeling of the process of humidification of textile fibers in interaction with conditioned air.

Keywords: textile material, humidification, air conditioning, mathematical modeling

В работе представлена разработанная математическая модель процессов увлажнения текстильных материалов кондиционированным воздушным потоком с использованием математических описаний закономерностей процессов увлажнения.

Известно, что в ходе технологического процесса производства пряжи на разных его стадиях требуется различная влажность перерабатываемых волокон W [1, 2]. Необходимую влажность предлагается обеспечивать непосредственно на производстве за счет подачи приточного воздуха на перерабатываемые текстильные материалы через разработанный авторами воздухораспределитель, установленный в технологическом оборудовании. При математическом моделировании процесса увлажнения материал представлен в виде пористой среды, в каждой точке которой происходит адсорбция влаги, имеющая свои закономерности [3]. Механизмами проникновения влажного воздуха к внутренним участкам пористого материала являются принудительный поток воздуха и диффузия влаги. Кинетические параметры: коэффициент диффузии, коэффициент влагообмена, скорость переноса влаги и др. – определяются как эффективно усредненные значения.

Математическое моделирование процесса увлажнения пористой среды – прядильного полуфабриката – проведено на примере ровницы, намотанной на бобину, с учетом того, что увлажняющий воздух подается непосредственно на бобину и в технологическую зону прядильной машины (рис. 1). По закону сохранения вещества, в каждой точке рассматриваемой среды изменение влажности во времени подчиняется уравнению

$$\partial\varphi / \partial t = -\operatorname{div}(j_{\text{прин}} + j_{\text{дифф}}) + j_{\text{ист}}, \quad (1)$$

где $\operatorname{div} = \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}\right)$ – оператор дивергенции вектора; $j_{\text{прин}}$ – принудительный поток воздуха, соответствующий начальной скорости подачи воздуха в пористую среду; $j_{\text{дифф}}$ – поток, обусловленный диффузией влаги; $j_{\text{ист}}$ – отрицательный источник, вызванный потерей влаги подаваемого влажного воздуха за счет адсорбции влаги в каждой точке в толще среды.

Рассматривая выражения для каждого из потоков в отдельности, получим уравнение

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} = -\left(w_1 \frac{\partial\varphi}{\partial x} + w_2 \frac{\partial\varphi}{\partial y} + w_3 \frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) + D \cdot \left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right) - k \cdot F_{\text{пс}} \cdot f(\varphi), \quad (2)$$

где $w = (w_1, w_2, w_3)$ – вектор скорости движения кондиционированного воздуха сквозь пористую среду, а плотность источника поглощения влаги из увлажняющего воздуха выражается соотношением $j_{\text{ист}} = -k \cdot F_{\text{пс}} \cdot f(\varphi)$. Здесь k – константа скорости адсорбции на единицу поверхности, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; $F_{\text{пс}}$ – удельная поверхность единицы объема пористой среды, $\text{м}^2/\text{кг}$; $f(\varphi)$ – функция, соответствующая экспериментально определенной зависимости.

Результаты математического моделирования зависимости $W_p = f(\varphi)_t$ представлены в виде аналитической функции, характеризующейся набором параметров,

численные значения которых определяются механизмом конкретного процесса адсорбции влаги.

Анализируя вид кривых сорбции, мы заметили, что для математического описания экспериментальной зависимости (рис. 2) целесообразно выделить два участка на каждой кривой: при $0 < \varphi(x) < \varphi_c$ – участок выпуклостью вверх к оси W_p , %, и при $\varphi_c < \varphi(x) < 100\%$ – прямолинейный участок, переходящий в участок выпуклостью вниз к оси W_p , %. Здесь φ_c – некоторый усредненный параметр, имеющий определенное значение для каждого вида текстильного материала. На обоих выделенных участках установлены аналитические зависимости на основе следующих рассуждений.

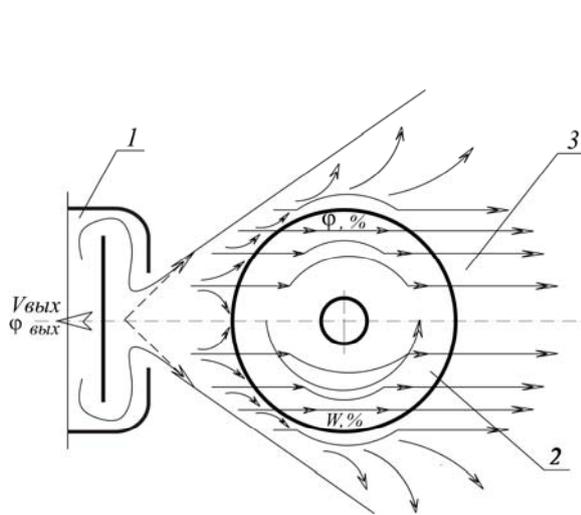


Рис.1. Схема подачи приточного воздуха на бобину:
1 – воздухораспределитель; 2 – ровница;
3 – предполагаемая схема эпюры скоростей воздуха

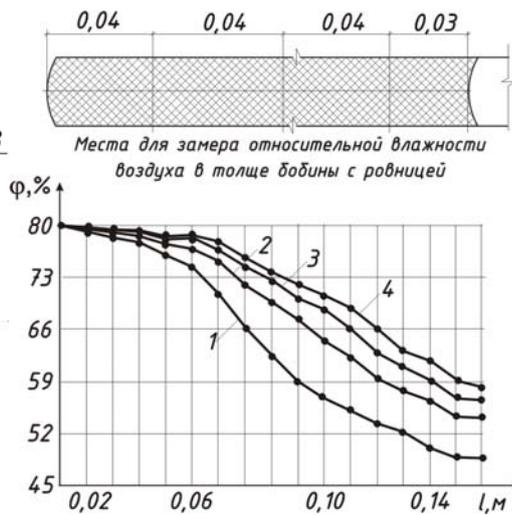


Рис.2. Экспериментальные кривые изменения относительной влажности воздуха в толще среды от скорости потока (м/с): 1 – $w=2$; 2 – $w=4$; 3 – $w=6$; 4 – $w=8$

На первом участке кривой адсорбции при $0 < \varphi(x) < \varphi_c$ логично предположить, что скорость роста объема адсорбированной влаги пропорциональна, во-первых, ее значению при данной влажности воздуха φ , т.к. осажденные на материал молекулы влаги создают дополнительные центры адсорбции; величина $dW_p / d\varphi$ должна быть пропорциональна разности $W_m - W_p$, где W_m – константа, характеризующая предельное влагосодержание пористого материала. Эта величина отражает потенциальную возможность роста равновесной влажности W_p . Исходя из вышесказанного, получаем: $dW_p / d\varphi = k \cdot W_p \cdot (W_m - W_p)$, где k – коэффициент пропорциональности. Решение этого уравнения зависит от некоторой константы W_n , характеризующей начальную равновесную влажность волокон:

$$W_p = W_n / (1 + (W_n / W_m - 1) e^{-k\varphi}). \quad (3)$$

Из уравнения (3), в частности, следует, что максимальная скорость изменения W_p будет наблюдаться при $\varphi = (1 / W_m) \cdot \ln (W_m / W_n - 1)$.

На втором участке изменения φ при $\varphi \geq \varphi_c$ включается другой механизм влагонаполнения капиллярно-пористой среды, который имеет полимолекулярный, а

затем и капиллярный характер. Естественно предположить, что возрастание W_p с ростом φ имеет экспоненциальный характер:

$$W_p = k_2 \cdot e^{k_1(\varphi - \varphi_c)}, \quad (4)$$

где k_1 , k_2 и φ_c – некоторые константы. Значения этих и других, необходимых для расчетов параметров и констант определялись методами аналитической обработки экспериментальных данных.

Суммируя рассмотренные случаи (3) и (4), получаем общее выражение зависимости W_p от φ :

$$W_p = k_2 \cdot e^{k_1(\varphi - \varphi_c)} + W_H / (1 + (W_H / W_M - 1)e^{-k\varphi}). \quad (5)$$

На рис. 3 представлены экспериментальные 1 и теоретические 2 изотермы сорбции влаги для различных капиллярно-пористых материалов (вискоза, капрон). Приведенные расчетные данные позволяют сделать вывод, что математическая зависимость (5) достаточно точно отображает равновесный процесс взаимодействия текстильных волокон с кондиционированным воздухом при максимальном отклонении (5-9 %) рассчитанных значений от экспериментальных и может быть использована для практических вычислений.

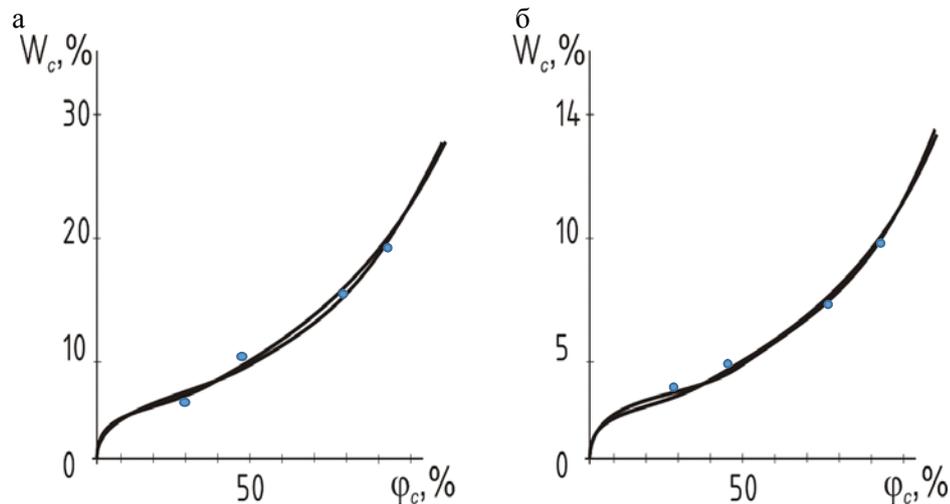


Рис 3. Экспериментальная (1) и теоретическая (2) зависимости влагосодержания $W_p(x)$, %, от относительной влажности воздуха $\varphi(x)$, %:
а – вискоза; б – капрон

Вернемся к уравнению (2). В первом приближении считалось, что в течение коротких промежутков времени влагосодержание воздуха, подаваемого в рабочую и технологическую зоны прядильной машины, постоянно и для таких промежутков можно принять условие $\partial\varphi / \partial t = 0$ как вне, так и внутри пористой среды. Кроме того, будем считать, что все участки поверхности бобины с ровницей равнодоступны для подаваемого воздуха и имеют одинаковые поверхностные характеристики. Такое представление возможно, например, когда линейные размеры бобины достаточно велики по отношению к диаметру струи подаваемого воздуха.

В рамках таких предположений уравнение (2) упрощается до одномерного стационарного уравнения:

$$D \frac{d^2\varphi}{dx^2} - w \frac{d\varphi}{dx} = k \cdot F_{nc} \cdot f(\varphi). \quad (6)$$

Принятое позволяет получить картину распределения относительной влажности воздуха внутри пористой среды для некоторого периода времени и определить влияние различных факторов на такое распределение.

Для численного решения уравнения (6) нами определены граничные условия:

$$\varphi(0) = \varphi_0; \quad \frac{d\varphi}{dx}(0) = -\frac{(1-\varepsilon) \cdot \rho}{\varepsilon \cdot Q_{\max}} (f(\varphi(x)) - W_0); \quad \left. \frac{d\varphi(x)}{dx} \right|_{x \geq \delta} = 0. \quad (7)$$

Здесь Q_{\max} – максимальное количество водяного пара в единице объема влажного воздуха; ρ – плотность пористого материала.

Последнее условие в выражении (7) соответствует предположению, что на некотором расстоянии от границы пористой среды влажность воздуха можно принять постоянной величиной, не зависящей от координаты; оно использовалось нами для контроля численного решения.

Установлена классическая неустойчивость уравнения (6), однако, как показали численные расчеты, для решения уравнений (6)-(7) можно использовать конечно-разностный метод Рунге–Кутты с автоматическим выбором шага интегрирования.

Анализ произведенных по модели (6)-(7) расчетов позволяет сделать вывод, что величина φ монотонно уменьшается с удалением от поверхности до некоторого предельного значения. Увеличение удельной поверхности псевдооднородной среды приводит к более интенсивному падению относительной влажности кондиционированного воздуха φ в воздушном потоке по мере удаления от внешней границы текстильного материала. Расчеты показали, что более интенсивное уменьшение φ происходит также при снижении скорости движения потока, а также при меньшем коэффициенте диффузии.

Проведено численное исследование влияния скорости воздушного потока на распределение относительной влажности воздуха внутри компактно сформированного текстильного полуфабриката.

Установлено влияние величины эффективного коэффициента диффузии влаги на процесс увлажнения пористой среды. Пористая среда является хорошим перемешивателем потока влажного воздуха, вследствие чего возникает явление конвективной диффузии. Реальный эффективный коэффициент диффузии D может на несколько порядков отличаться от истинного. При расчете D был использован поправочный коэффициент, зависящий от скорости потока воздуха. Совпадение результатов расчетов и экспериментов обеспечила формула $D = D_{\text{ист}} \cdot q \cdot w^p$, где p, q – некоторые безразмерные константы. В нашем случае получены значения $p = 0,3, q = 71$.

Для повышения точности расчетов скорректирована математическая модель распределения относительной влажности кондиционированного воздуха в пористой среде с учетом возможного падения скорости потока воздуха за счет сопротивления его движению внутри среды. Получено уравнение

$$D \frac{d^2\varphi}{dx^2} - w \frac{d\varphi}{dx} - \varphi \frac{dw}{dx} = F_{\text{ис}} \cdot f(\varphi), \quad (8)$$

при решении которого использованы два вида зависимости скорости движения влажного воздуха от координаты по глубине пористой среды. В первом случае считали, что $w(x) = \gamma x + \mu$, во втором – считали закон падения скорости экспоненциальным $w(x) = \gamma \cdot \exp(-\mu \cdot x)$, при этом $\mu = w(0) = w$, а величина μ регулирует скорость падения $w(x)$, где x – координата по толщине пористой среды.

Из результатов численных расчетов, представленных на рис. 4, следует, что с ростом скорости потока кондиционированного воздуха увеличивается глубина проникновения влаги в объем пористой среды. Следовательно, для оптимизации процесса увлажнения надо выбирать такую скорость потока воздуха, чтобы увлажнение

материала было достаточно интенсивным при глубоком проникновении влаги в объем пористой среды.

Выполненные численные расчеты и экспериментальные исследования показали хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных при использовании математической модели (6)-(8) (принято экспоненциальное падение скорости потока кондиционированного воздуха в толще пористой среды).

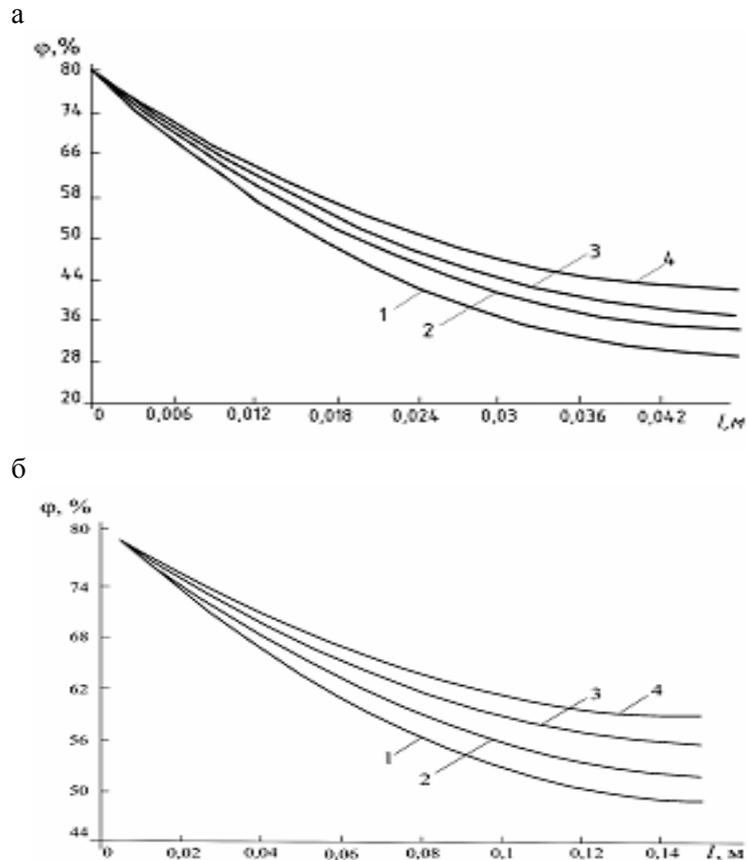


Рис. 4. Влияние начальной скорости потока воздуха w на распределение относительной влажности воздуха в объеме пористой среды с учетом экспоненциального падения скорости ($\gamma=0.1$):
а – при $w=0,2$ м/с – кривая (1); $0,5$ м/с – кривая (2); $0,75$ м/с – кривая (3);
1 м/с – кривая (4); б – при $w = 2$ м/с – кривая (1); 4 м/с – (2); 6 м/с – (3); 8 м/с – (4)

Наблюдается хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных при использовании математической модели (7), (8), построенной с учетом экспоненциального падения скорости потока кондиционированного воздуха в толще пористой среды (компактно сформированный текстильный полуфабрикат).

Разработанная математическая модель при заданных значениях параметров адекватно описывает распределение относительной влажности воздуха в рассматриваемой пористой среде и может быть использована для определения закономерностей процесса увлажнения компактно сформированного текстильного материала, а также для расчета оптимальных параметров процесса увлажнения.

Список литературы

1. Еремкин, А.И. О некоторых закономерностях адсорбции влаги в капиллярно-пористых коллоидных материалах при увлажнении кондиционированным воздухом / А.И. Еремкин // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. – Новосибирск, 2005. – № 1.

2. Еремкин, А.И. Математическая модель процесса увлажнения текстильных волокон при взаимодействии с кондиционированным воздухом / А.И. Еремкин // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. – Новосибирск, 2004. – № 12.
3. Еремкин, А.И. Математическая модель увлажнения текстильного материала / А.И. Еремкин, С.В. Баканова, А.Н. Кошев, Ю.В. Родионов, О.В. Тараканов // Региональная архитектура и строительство. – Пенза, 2017. – № 4.

References

1. Eremkin, A.I. Some regularities of adsorption of moisture in capillary-porous colloidal materials with moisture air conditioning / A.I. Eremkin // News of universities. Construction and architecture. – Novosibirsk, 2005. – № 1.
2. Eremkin, A.I. Mathematical model of the process of moistening of textile fibers in interaction with conditioned air / A.I. Eremkin // News of universities. Construction and architecture. – Novosibirsk, 2004. – № 12.
3. Eremkin, A.I. Mathematical model of moisture textile material / A.I. Eremkin, S.V. Bakanova, A.N. Koshev, Yu.V. Rodionov, O.V. Tarakanov // Regional architecture and engineering. – Penza, 2017. – № 4.

УДК 621.6.036

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

410054, Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77,
тел.: (8452) 51-50-18

Усачев Александр Прокофьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Теплогазоснабжение,
вентиляция, водообеспечение и прикладная
газодинамика»

E-mail: usachev-ap@mail.ru

АО "Гипрониигаз".

410012, Россия, г. Саратов,
проспект им. Кирова С.М., д. 54,
тел.: (845-2) 74-94-95

Шурайц Александр Лазаревич,
доктор технических наук, генеральный
директор АО «Гипрониигаз»

E-mail: Shurait@niigaz.ru

Бирюков Александр Валерьевич,
кандидат технических наук, директор
научно-исследовательского центра
АО «Гипрониигаз»

E-mail: Biryukov@niigaz.ru

Усуев Заур Мухтарович,
заместитель директора
научно-производственного центра
АО «Гипрониигаз»

*Saratov State Technical University named
after Gagarin Yu.A.*

410054, Russia, Saratov,
77, Politechnicheskaya St.,
tel.: (8452) 51-50-18

Usachev Alexander Prokofievich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Heat and Gas Supply,
Ventilation, Water Supply and Applied
Hydrogasodynamics»

E-mail: usachev-ap@mail.ru

Joint Stock Company "Giproniigas"

410012, Russia, Saratov,
54, Kirov Avenue,
tel.: (845-2) 74-94-95

Shurayts Alexander Lazarevich,
Doctor of Sciences, General Director of JSC
«Gipronigas»

E-mail: Shurait@niigaz.ru

Biryukov Alexander Valeryevich,
Candidate of Sciences, Director of the
research center of Giproniigaz PLC

E-mail: Biryukov@niigaz.ru

Usuev Zaur Mukhtarovich,
Deputy Director of scientific production
center of Giproniigaz PLC

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УЗЛА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ БЫСТРОСЪЕМНОЙ КРЫШКИ ГАЗОВОГО ФИЛЬТРА

А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, А.В. Бирюков, З.М. Усуев

Предложена модель узла обеспечения герметичности быстросъемной крышки газового фильтра. На основе предложенной модели разработана конструкция, включающая камеру между рабочим и резервным уплотнительными элементами, заполненную инертным газом под избыточным давлением с организацией контроля герметичности.

Ключевые слова: узел обеспечения герметичности, уплотнительные элементы, быстросъемная крышка, газовый фильтр, инертный газ

DEVELOPMENT OF A MODEL NODE TO ENSURE A LEAK-PROOF QUICK-RELEASE LID GAS FILTER

A.P. Usachev, A.L. Shurait, A.V. Biryukov, Z.M. Usuev

The article proposes a model of the unit to ensure the tightness of the quick-release gas filter cover. On the basis of the proposed model, a design is developed that includes a chamber between the working and reserve sealing elements filled with inert gas under excessive pressure with the organization of tightness control.

Keywords: sealing unit, sealing elements, quick-release cover, gas filter, inert gas

1. Последовательность разработки модели узла обеспечения герметичности быстросъемной крышки с требуемыми характеристиками

1.1. Вводная часть. В настоящее время одной из первоочередных задач по повышению эффективности эксплуатации и уменьшению затрат в обслуживании газовых фильтров высокой пропускной способности, устанавливаемых на рабочих и резервных линиях редуцирования головных пунктов редуцирования газа (ПРГ), является сокращение продолжительности работ по замене фильтрующих картриджей, необходимых для удаления с их поверхностей механических загрязнений. В этих целях АО «ГипроНИИгаз» был предложен принцип устройства быстросъемных крышек, устанавливаемых в ПРГ (патент на полезную модель RU №165142U1) [1], который позволяет сократить продолжительность проведения операций по очистке фильтрующих картриджей в 5,4 раза по сравнению с самым совершенным аналогом. Согласно [2] в ПРГ должно быть предусмотрено не менее одной рабочей и одной резервной линий редуцирования, каждая из которых включает газовый фильтр. Снижение продолжительности операций демонтажа и повторного монтажа достигается путем замены крышек фланцевого типа с большим количеством болтовых соединений на устройство, приводимое в действие одним поворотом рукоятки, передвигающей специальные сегменты, которые фиксируют крышку. Герметизация в этом случае обеспечивается с помощью круглого кольца, уплотняющего боковую поверхность предлагаемой быстросъемной крышки. Однако создание узлов обеспечения герметичности (УОГ), обеспечивающих герметичность в любой момент эксплуатации ПРГ, требует разработки специальных моделей быстросъемных крышек (БСК), реализующих поставленные требования.

Разработка данной модели УОГ БСК осуществлялась на основе системного подхода [3, 4] в последовательности, приведенной ниже.

Согласно основным положениям системного подхода УОГ БСК есть совокупность элементов [2, 5]: уплотнительных колец, уплотнительных деталей, приборов контроля герметичности, объединенных одной общей целью – обеспечение герметичности быстросъемных крышек, установленных в ПРГ, в любой момент эксплуатации. Первоочередным мероприятием является выявление, анализ внешних негативных воздействий на УОГ БСК [5], которые могут создать аварийную ситуацию.

1.2. Выявление последовательности возникновения результатов внешних негативных воздействий на УОГ БСК. В нарушении работы УОГ БСК с утечкой газа в окружающую среду можно выделить несколько стадий [5–7].

На первой стадии происходят частичные повреждения уплотнительных элементов УОГ БСК, не приводящие к образованию сквозных отверстий (п. 1.1 рис. 1).

Вторая стадия нарушения работы УОГ БСК характеризуется частичным нарушением механизма контроля герметичности, затрудняющим выявление утечек газа (п. 1.2 рис. 1).

На третьей стадии происходит образование сквозных повреждений и утечек газа через уплотнительные элементы УОГ БСК и/или нарушение механизма контроля, не позволяющее обнаруживать утечки газа через эти уплотнительные элементы и оповещать об этом пункт управления и технический персонал (п. 1.3 рис. 1).

1.3. Задание и обоснование уровня требований к УОГ, которому должны удовлетворять принципы и технические решения по предотвращению результатов негативных внешних воздействий. Осуществляется с учетом требований международных и отечественных нормативных документов и технической литературы по надежности, безопасности, экологии.

На первой стадии подбираются требования по обеспечению герметичности уплотнительных элементов УОГ БСК, рассмотренных в п. 1.1. В качестве основных требований к УОГ БСК согласно [5–10] принимаются:

1) наличие резервного уплотнительного элемента по направлению возможной утечки газа [10];

2) отсутствие видимых утечек газа через основной и резервный уплотнительные элементы в течение времени испытания, которое визуально должно выражаться в

отсутствии пузырьков воздуха по всей площади уплотнительной поверхности за время проведения испытания, но не менее 10 минут. По ГОСТ 9544-2015 [8] это соответствует самому высокому классу герметичности «А» для затворов. Быстростъемная крышка по принципу действия является дисковым затвором;

3) соответствие условиям прочности, морозостойкости, остаточной деформации, относительного удлинения при разрыве, твердости и температуре согласно требованиям ГОСТ 18829-2017 [9], перечисленным в п. 2.1 рис. 1.

На второй стадии с целью предотвращения нарушений, отмеченных в п. 1.2 рис. 1, устанавливается требование [10] по созданию механизма постоянного автоматического контроля герметичности уплотнительных элементов УОГ БСК (п. 2.2 рис. 1).

На третьей стадии с целью предотвращения нарушений, отмеченных в п. 1.3 рис. 1, устанавливаются следующие требования: предотвращение утечек газа через основной и резервный уплотнительные элементы в течение всего срока их эксплуатации; создание механизма автоматического отключения подачи газа на рабочую линию редуцирования и автоматическое переключение на резервную линию [10].



Рис. 1. Алгоритм создания модели узла обеспечения герметичности быстростъемной крышки с предотвращением утечек газа в окружающую среду

1.4. Формулирование предложений, удовлетворяющих поставленным требованиям, осуществляется исходя из анализа уровня требований, показанных в п. 2.1 и 2.2 на рис. 1. Разработка указанных предложений производится на основе собственных идей, на базе подборок технических решений, полученных различными изобретателями, а также применения морфологического метода [11] с возможностью автоматического поиска необходимых технических решений.

На первой стадии выполнения требований, рассмотренных в п. 2.1 рис. 1, предлагается установить за рабочим уплотнительным элементом аналогичный резервный уплотнительный элемент, выполненный согласно требованиям [9], по направлению возможной утечки газа и образовать между ними герметичную камеру. Такое предложение позволяет локализовать утечку газа через рабочий уплотнительный элемент при его неисправности в объеме образованной камеры и предотвратить ее дальнейшее распространение в окружающую среду. При этом оба уплотнительных элемента не должны иметь видимых утечек газа согласно [8] (п.3.1 рис.1).

На второй стадии с целью предотвращения нарушений, отмеченных в п. 2.2 рис. 1, предлагается заполнять образованную камеру инертным газом, например газообразным азотом, организовать постоянный автоматический контроль его избыточного

давления, позволяющий обнаруживать утечку газа как через рабочий, так и через резервный уплотнительные элементы, и осуществлять автоматическое отключение действующей БСК с автоматическим переключением на резервную линию (п. 3.2 рис. 1).

2. Разработка модели узла обеспечения герметичности быстросъемной крышки с требуемыми характеристиками

На третьей стадии на основе заданных требований (колонка 2 рис.1) предложена модель обеспечения герметичности БСК, включающая: герметичную камеру, образованную между рабочим и резервным уплотнительными элементами, заполненную инертным газом под избыточным расчетным давлением P_p , с организацией в ней автоматического контроля давления с помощью управляющего прибора, подающего по беспроводной связи сигналы в пункт управления обслуживающему техническому персоналу. Это происходит как при повышении давления инертного газа до допустимого верхнего значения $P_p + \Delta P_v$, связанного с утечкой газа через рабочий уплотнительный элемент, так и при понижении давления инертного газа до допустимого нижнего значения $P_p - \Delta P_n$, обусловленного утечкой газа через резервный уплотнительный элемент.

В полном соответствии с предложенной моделью (п.3.3 рис.1) разработана схема УОГ БСК, приведенная на рис. 2.

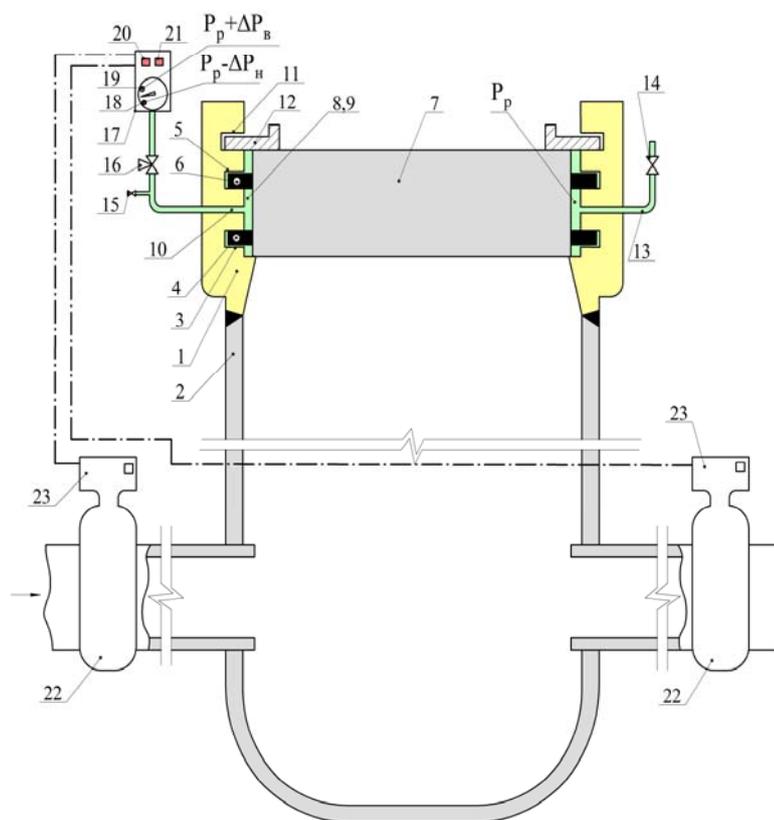


Рис. 2. Разработка новых технических решений системы обеспечения герметичности быстросъемной крышки:

- 1 – цилиндрический корпус; 2 – люк газового фильтра; 3 – первый кольцевой паз; 4 – первое уплотнительное кольцо; 5 – второй кольцевой паз; 6 – второе уплотнительное кольцо;
- 7 – круглая съемная крышка; 8 – кольцевая камера в виде зазора между стенкой корпуса 1 и крышкой 7; 9 – инертный газ; 10 – трубка в стенке корпуса 1; 11 – кольцевой паз для фиксирующих пластин; 12 – фиксирующие пластины; 13 и 14 – трубка и кран для заполнения пространства 8 инертным газом 9; 15 – кран для продувки пространства 8 инертным газом 9; 16 – трехходовой кран для присоединения прибора 17; 17 – прибор контроля давления, оснащенный световым 20 и звуковым 21 сигнализаторами; 18, 19 – нижняя и верхняя предельные отметки снижения и повышения давления инертного газа 9; 22 – отключающий кран; 23 – электрический привод отключающего крана 22

Узел обеспечения герметичности быстросъемных крышек, выполненный согласно модели, приведенной в п.3.3 рис. 1, включает кольцевую камеру 8, образованную между металлической стенкой корпуса 1 и съемной крышкой 7, герметично закрытой с обеих сторон рабочим 4 и резервным 6 уплотнительными кольцами. Внутреннее пространство камеры 8 заполняется инертным газом 9 до значения расчетного избыточного давления P_p , то есть организуется постоянный контроль герметичности соединений уплотнительного кольца 4 с кольцевым пазом 3 и уплотнительного кольца 6 с кольцевым пазом 5.

Кольцевая камера 8 в боковой своей части имеет отверстие с присоединенной к нему трубкой 10, к которой через трехходовой кран 16 присоединен автоматический двухпозиционный прибор 17, настроенный на срабатывание с возможностью сигнализации в следующих случаях:

1) при увеличении давления в камере 8 в размере $P_p + \Delta P_v$ выше расчетного P_p на величину его допустимого повышения ΔP_v за счет утечек природного газа из корпуса 2 фильтра в кольцевую камеру 8 при разгерметизации рабочего уплотнительного кольца 4;

2) при уменьшении давления в камере 8 в размере $P_p - \Delta P_n$ ниже расчетного P_p на величину его допустимого понижения ΔP_n за счет утечек инертного газа 9 из кольцевой камеры 8 в окружающую среду при разгерметизации резервного уплотнительного кольца 6.

При уменьшении давления ниже $P_p - \Delta P_n$ до отметки 18 или при увеличении давления в размере $P_p + \Delta P_v$ до отметки 19 двухпозиционный прибор 17 включает световой 20 и звуковой 21 сигнализаторы, а также передает по беспроводной связи сигналы в пункт управления обслуживающему техническому персоналу на отключение подачи газа на рабочий фильтр и БСК с помощью отключающих кранов 22 и электрических приводов 23 на входе и выходе рабочей линии редуцирования с одновременным переключением на резервную линию редуцирования.

Расчетная величина давления инертного газа в камере 8 выбирается вблизи минимального значения, при котором обеспечивается нормальная работа прибора контроля 17, равная $P_p = 0,035 \div 0,04$ МПа. Следует отметить, что имеется вероятность возникновения непрогнозируемых утечек газа как от фильтра, так и от другого газового оборудования вследствие других возможных причин. Для их обнаружения согласно [2, 10] в помещении головного ПРГ установлены сигнализаторы загазованности, предупреждающие об утечке газа технический персонал и пункт управления, которые при необходимости отключают подачу газа на ПРГ.

Таким образом, конструкция предложенной УОГ БСК полностью соответствует модели, приведенной в п. 3.3, а также удовлетворяет всем требованиям, приведенным в п.2.1–2.3 рис. 1.

Выводы

1. На базе системного подхода предложена модель по созданию узла обеспечения герметичности быстросъемной крышки газового фильтра, реализуемая в следующей последовательности (см. рис. 1): 1) выявление результатов негативных воздействий на УОГ БСК (колонка 1 рис. 1); 2) задание уровня требований по предотвращению негативных воздействий на УОГ (колонка 2 рис. 1); 3) формулирование предложений, удовлетворяющих поставленным требованиям, и разработка модели УОГ БСК (колонка 3 рис. 1).

2. На основе заданных требований (колонка 2 рис. 1) предложена модель обеспечения герметичности БСК, включающая: герметичную камеру, образованную между рабочим и резервным уплотнительными элементами, заполненную инертным газом под избыточным расчетным давлением P_p с организацией в ней автоматического контроля с помощью управляющего прибора. При повышении давления инертного газа до допустимого верхнего значения $P_p + \Delta P_v$, связанного с утечкой газа через рабочий уплотнительный элемент, или при понижении давления инертного газа до допустимого нижнего значения $P_p - \Delta P_n$, обусловленного утечкой газа через резервный уплотнительный элемент, управляющий прибор подает по беспроводной связи сигналы в пункт управления и обслуживающему техническому персоналу на отключение подачи газа на фильтр, установленный на рабочей линии редуцирования, с одновременным переключением подачи газа на резервную линию редуцирования.

1. Патент на полезную модель RU №165142U1. Узел перекрытия люка газового оборудования высокого давления / А.Л. Шурайц, А.П. Усачев, А.В. Рулев, З.М. Усуев // Опубликовано 10.10.2016. – Бюл. № 28. Дата подачи заявки: 19.01. 2016.
2. ГОСТ 34011–2016. Межгосударственный стандарт. Системы газораспределительные. Пункты газорегуляторные блочные. Пункты редуцирования газа шкафные. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2017. – 21 с.
3. Спицнадель, В.Н. Основы системного анализа / В.Н. Спицнадель.– СПб.: Изд. дом «Бизнес-пресса», 2000. – 204 с.
4. Системные исследования в энергетике в новых социально-экономических условиях / В.П. Булатов, Н.И. Воропай, А.З. Гамм [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1995. – 189 с.
5. Свидетельство № 13356 от 27.02.2008. Метод разработки новых технических устройств, способов, веществ с заданным уровнем требований на основе системного подхода / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, А.А. Феоктистов, А.Ю. Фролов, А.В. Рулев. – М.: Российское авторское общество, 2008. – 10 с.
6. Mokhatab, S. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing / S. Mokhatab, W.A.. Poe – Second Edition. – Elsevier Inc., 2012. – 802 p.
7. Guo, B. Natural Gas Engineering Handbook / B. Guo, A. Ghalambor. – 2nd edition.— Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 2012. XX. – 472 p.
8. ГОСТ 9544–2015. Межгосударственный стандарт. Арматура трубопроводная. Нормы герметичности затворов. – М.: Стандартинформ, 2015. – 51 с.
9. ГОСТ 18829–2017. Межгосударственный стандарт. Кольца резиновые уплотнительные круглого сечения для гидравлических и пневматических устройств. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2017. – 20 с.
10. ГОСТ Р 12.3.04–2012. Пожарная безопасность технологических процессов. – М.: Стандартинформ, 2014. – 62 с.
11. Половинкин, А.И. Основы инженерного творчества / А.И. Половинкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.

References

1. The patent for utility model RU No. 165142 U1. High pressure gas equipment hatch overlap unit / A.L. Shurait, A.P. Usachev, A.V. Rulev, Z.M. Usuev // Published on 10.10.2016. – Bull. No. 28. Date of application 19.01. 2016.
2. GOST 34011–2016. Interstate standard. Gas distribution systems. Points gas control block. Gas reduction points are rack-mounted. General technical requirements. – M: STANDARTINFORM, 2017. – 21 p.
3. Spitsnadel, V.N. Basics of system analysis / V.N. Spitsnadel. – SPb.: Ed. house «Business press», 2000. – 204 p.
4. System researches in power engineering in new social and economic conditions / V.P. Bulatov, N.I. Voropay, A. Z. Gamm [etc.]. – Novosibirsk: Nauka, 1995. – 189 p.
5. Certificate No. 13356 from 27.02.2008. Method of development of new technical devices, methods, substances with the given level of requirements based on a systemic approach / A.P. Usachev, A.L.Shurait, A.A. Feoktistov, A.U. Frolov, A.V. Rulev. – M.: Russian copyright society, 2008. – 10 p.
6. Mokhatab, S. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing / S. Mokhatab, W.A.. Poe – Second Edition. – Elsevier Inc., 2012. – 802 p.
7. Guo, B. Natural Gas Engineering Handbook / B. Guo, A. Ghalambor. – 2nd edition.— Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 2012. XX. – 472 p.
8. GOST 9544–2015. Interstate standard. Pipe fittings. Norms of tightness of the valve. – M.: Standartinform, 2015. – 51 p.
9. GOST 18829–2017. Interstate standard. Round rubber sealing rings for hydraulic and pneumatic devices. Technical conditions. – M.: STANDARTINFORM, 2017. – 20 p.
10. GOST R 12.3.04–2012. Fire safety of technological processes. – M.: STANDARTINFORM, 2014. – 62 p.
11. Polovinkin, A.I. Fundamentals of engineering / A.I. Polovinkin. – M: Mechanical Engineering, 1988. – 368 p.

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

Королева Тамара Ивановна,
кандидат экономических наук,
профессор кафедры «Теплогасоснабжение
и вентиляция»
E-mail: korolevatamara@gmail.ru

Аржаева Наталья Владимировна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогасоснабжение
и вентиляция»
summer981@yandex.ru

Мельников Илья Евгеньевич,
студент
E-mail: farvater335@gmail.com

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

Koroleva Tamara Ivanovna,
Candidate of Economic Sciences,
Professor of the department «Heat, gas supply
and ventilation»
E-mail: korolevatamara@gmail.ru

Arzhaeva Natalia Vladimirovna,
Candidate of Sciences,
Associate Professor of the department «Heat,
gas supply and ventilation»
E-mail: summer981@yandex.ru

Melnikov Ilya Evgenievich,
Student
E-mail: farvater335@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛАЖНОСТНЫХ ПОЛЕЙ В ТОЛЩЕ ОБЛЕГЧЕННОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Т.И. Королева, Н.В. Аржаева, И.Е. Мельников

Рассмотрена возможность использования методики расчета влажностного состояния для неоднородных ограждающих конструкций. Проведено исследование влажностного состояния неоднородной ограждающей конструкции из обыкновенного глиняного кирпича на цементно-песчаном растворе. Выполнен сравнительный анализ результатов различных методов расчета.

Ключевые слова: неоднородная ограждающая конструкция, упругость водяных паров, паропроницаемость, влажностные поля, влага в ограждающих конструкциях

THE STUDY ON MOISTURE FIELDS IN THICKNESS OF LIGHTWEIGHT ENCLOSING STRUCTURE

T.I. Koroleva, N.V. Arzhaeva, I.E. Melnikov

Possibility of use of methods of calculation of humidity condition for inhomogeneous walling is considered. The study of humidity state of heterogeneous enclosing structure load-bearing design of ordinary clay bricks on cement-sandy solution is carried out. Comparative analysis of the results of different methods of calculation is performed.

Keywords: heterogeneous envelope, enclosing structure, water vapor elasticity, steam penetration, humidity field, moisture in enclosing structures

С повышением влажности строительных материалов растет и их теплопроводность, то есть при прочих равных условиях сырые ограждения имеют пониженные теплозащитные качества по сравнению с сухими ограждениями, иными словами, при увеличении влажности материалов уменьшается их термическое сопротивление и соответственно сопротивление теплопередаче всего ограждения, а это, в свою очередь, влечет понижение температуры внутренней поверхности ограждения и увеличивает возможность выпадения на ней конденсата. При проектировании необходимо принимать меры для предотвращения возможного увлажнения материалов наружных ограждений и учитывать их влажностный режим.

В настоящее время выбор варианта ограждающей конструкции стены в большинстве случаев базируется на теплотехническом расчете стены. Расчет влажностного

состояния ограждающей конструкции производят нечасто, однако неблагоприятный влажностный режим может сильно повлиять на теплотехнические и прочностные качества ограждающей конструкции.

Современные методики расчета теплотехнических и влажностных характеристик ограждающей конструкции предназначены в основном для расчета однородных конструкций. Для более точного теплотехнического расчета неоднородных конструкций можно воспользоваться методикой построения температурных полей, однако данный расчет не отражает влажностного состояния конструкции. В данной статье представлен расчет влажностного состояния неоднородной ограждающей конструкции стены облегченной кирпичной кладки с определением значений действительной упругости водяных паров в толще неоднородной ограждающей конструкции. Проведен сравнительный анализ результатов расчета.

Для примера была выбрана стена облегченной кирпичной кладки «тип А» согласно «Пособию по проектированию каменных и армокаменных конструкций» к СНиП II-22-81 (далее – Пособие). Данная конструкция стены была выбрана как наиболее яркий и простой пример неоднородной ограждающей конструкции.

Кирпичная кладка выполнена из обыкновенного глиняного кирпича на цементно-песчаном растворе, в качестве минеральной засыпки принят щебень из вспученного перлита. Характеристики материалов взяты согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» и СТО 00044807-001-2006 «Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий».

Параметры наружного воздуха приняты согласно СП 131.13330.2012 «Строительная климатология» для города Пензы (условия эксплуатации – А; $t_{\text{ХП}}^{0,92} = -27^{\circ}\text{C}$; $\varphi_{\text{н}} = 83\%$). Параметры внутреннего воздуха: $t_{\text{в}} = 18^{\circ}\text{C}$; $\varphi_{\text{в}} = 60\%$.

Общий вид конструкции стены приведен на рис. 1.

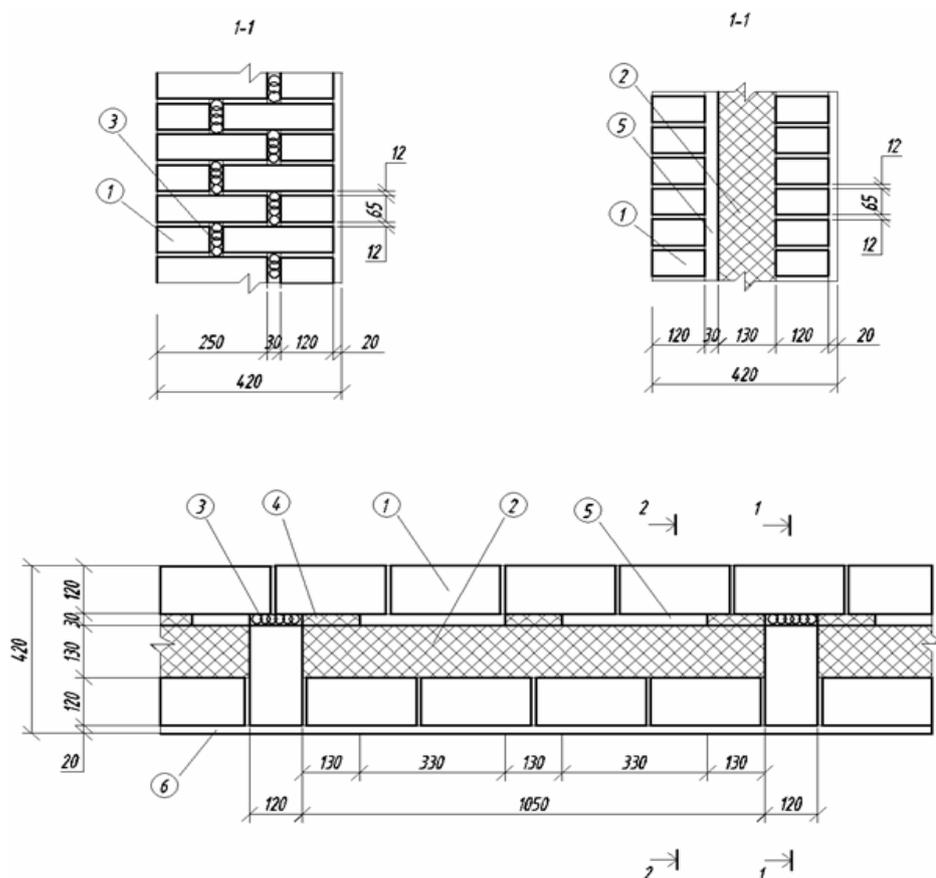


Рис. 1. Конструкция стены облегченной кирпичной кладки:

- 1 – кирпич; 2 – плитный утеплитель; 3 – монтажная пена; 4 – полосы из плитного утеплителя; 5 – воздушная прослойка; 6 – внутренняя штукатурка

Согласно Пособию, для уменьшения влияния «мостиков холода» в перемышках имеются воздушные прослойки, расположенные в шахматном порядке. Для увеличения теплотехнических качеств конструкции данные полости заделаны монтажной пеной.

Состав ограждающей конструкции:

1) Кирпичная кладка из сплошного обыкновенного глиняного кирпича; $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,7 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$; $\mu = 0,11 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

2) Базальтовая вата «ТехноНИКОЛЬ» Техновент Н ПРОФ; $\rho = 45 (\pm 5) \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,04 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$; $\mu = 0,3 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

3) Монтажная пена PENOSIL GoldGun 65; $\rho = 20\text{-}25 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,034 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$; $\mu = 0,05 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

4) Известково-песчаный раствор; $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,7 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$; $\mu = 0,12 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

5) Воздушная прослойка; $\delta = 0,03 \text{ м}$; $R_{\text{вп}} = 0,16 \text{ м}^2\cdot\text{°C/Вт}$; $\mu = 0,135 \text{ г/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{мм}\cdot\text{рт.ст.)}$ = $1,01 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

Для расчета влажностного поля необходимо найти распределение величины максимальной упругости водяного пара в толще конструкции. Для этого выполним расчет плоского температурного поля по методике профессора К.Ф. Фокина.

Выбираем участок стены от перемышки до перемышки, выделяем в нем зону между двумя поперечными осями симметрии и разбиваем ее сеткой координат на узлы. Далее определяем температуру каждого узла в зависимости от 4 смежных с ним.

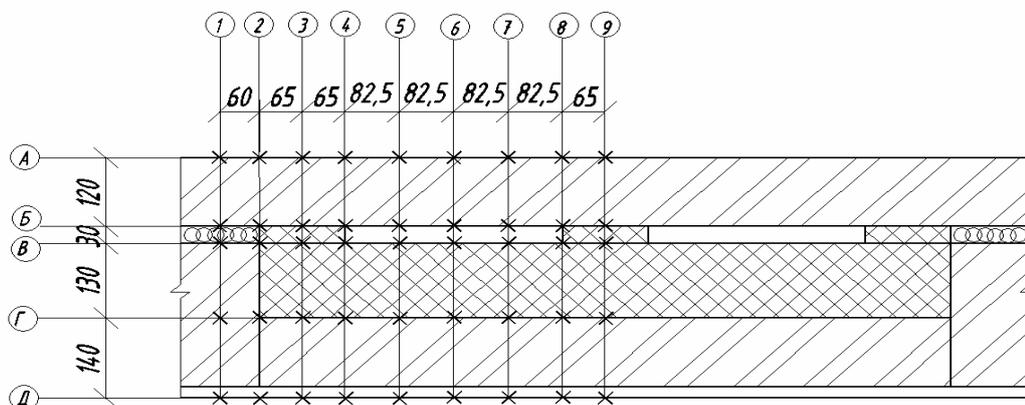


Рис. 2. Схема разбивки на узлы

Допущения при расчете:

- Так как коэффициенты теплопроводности кирпичной кладки и известково-песчаного раствора равны, при расчете для удобства считаем их как один материал.
- Воздушную прослойку в расчете принимаем как твердый или сыпучий материал, следовательно, для расчета воздушной прослойки в направлении, перпендикулярном оси стены, находим эквивалентный коэффициент теплопередачи и используем его в расчетах:

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\delta_{\text{вп}}}{R_{\text{вп}}} = \frac{0,03}{0,16} = 0,1875 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}. \quad (4.1)$$

- В воздушной прослойке передача тепла осуществляется в основном с помощью конвекции и излучения. Перемещение воздуха в прослойке происходит в сечении, перпендикулярном продольной оси стены, так как разница температур между двумя точками на противоположных стенках воздушной прослойки больше, чем между двумя точками на одной и той же стороне воздушной прослойки. Теплопередача излучением также происходит в большей мере между двумя противоположными точками с большей разницей температур.

Исходя из этого, теплопередача в воздушной прослойке в перпендикулярном стене направлении идет в разы интенсивнее, чем в продольном, поэтому теплопередачей в воздушной прослойке по направлению продольной оси стены пренебрегаем.

Результат расчета приведен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Итоговые значения температур в узлах, °С

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| А | -26,00 | -26,03 | -26,13 | -26,29 | -26,38 | -26,42 | -26,46 | -26,51 | -26,57 |
| Б | -21,92 | -22,14 | -23,04 | -23,67 | -24,13 | -24,37 | -24,46 | -24,55 | -24,63 |
| В | 2,91 | 2,07 | -12,00 | -17,14 | -19,37 | -19,76 | -19,75 | -18,75 | -17,84 |
| Г | 12,40 | 12,87 | 14,46 | 15,24 | 15,79 | 16,05 | 16,21 | 16,29 | 16,34 |
| Д | 17,42 | 17,57 | 17,88 | 18,18 | 18,40 | 18,53 | 18,59 | 18,62 | 18,61 |

Расчет влажностного поля сводится к определению величины упругости водяных паров в каждом из узлов. Величина упругости водяных паров в узле будет зависеть от величины упругости водяных паров в соседних узлах, расстояния до этих узлов, площади паропередачи и материала между узлами.

Методика расчета влажностного поля ограждающей конструкции разработана на базе методики расчета плоского температурного поля профессора К.Ф. Фокина. Методика основывается на том, что между процессами диффузии газов и процессами теплопроводности имеется полная аналогия. Следовательно, все положения, на которых построены законы теплопроводности, вполне приемлемы и к явлениям диффузии водяного пара. Исходя из этого, можно определить значения действительной упругости водяного пара в узле, составляя уравнение, идентичное тому, что и при нахождении температуры в узле. Вместо коэффициента теплопередачи в уравнении будет иметь место коэффициент паропередачи, а вместо количества передаваемой теплоты – количество диффундируемого водяного пара.

В итоге получим систему уравнений, решив которую методом итерации, можно найти значения действительной упругости водяных паров в характерных точках.

В расчетах были приняты следующие допущения:

- ввиду того, что при расчете температурного поля кирпичную кладку и известково-песчаный раствор условно приняли как один материал, в данном расчете также считаем их как один материал. При этом необходимо рассчитать среднее значение коэффициента паропроницаемости;

- при расчете воздушной прослойки принимаем, что пароперенос происходит только в направлении поперечной оси стены. Объясняется это тем, что в воздушной прослойке пароперенос осуществляется в основном с помощью конвективных токов воздуха, а конвективные токи имеют наибольшую интенсивность в направлении поперечной оси стены.

Схему разбивки на узлы возьмем из расчета плоского температурного поля.

Подробный расчет приведен для узла «А1». Остальные узлы рассчитываются аналогичным образом.

Узел А1:

- К узлу А2 паропередача происходит по кирпичной кладке: расстояние между узлами $\Delta = 0,06$ м; площадь, по которой происходит паропередача, $F = \frac{0,12}{2} = 0,06$ м²; коэффициент теплопроводности материала между узлами $\mu = 0,11$ мг/(м·ч·Па).

Найдем коэффициент паропередачи, мг/(ч·Па), от узла А1 к узлу А2 с учетом площади паропередачи:

$$M_{A1-A2} = \frac{\mu}{\Delta} \cdot F = \frac{0,11}{0,06} \cdot 0,06 = 0,11 \text{ мг/(ч·Па)}. \quad (1)$$

Определим количество диффундируемого водяного пара, мг/ч, к узлу А2:

$$G_{A1-A2} = (e_{A1} - e_{A2}) M_{A1-A2} \quad (2)$$

• К узлу Б1 паропередача происходит по кирпичной кладке: расстояние между узлами $\Delta = 0,12$ м; площадь, по которой происходит паропередача, $F = \frac{0,06 + 0,06}{2} = 0,06$ м²; паропроводность материала между узлами $\mu = 0,11$ мг/(м·ч·Па).

Найдем коэффициент паропередачи, мг/(ч·Па), от узла А1 к узлу Б1 с учетом площади паропередачи:

$$M_{A1-B1} = \frac{0,11}{0,12} \cdot 0,06 = 0,055 \text{ мг/(ч·Па)}.$$

Определим количество диффундируемого водяного пара, мг/ч, к узлу Б1:

$$G_{A1-B1} = (e_{A1} - e_{B1}) M_{A1-B1}.$$

• К наружному воздуху паропередача происходит по площади $F = 0,06$ м² при

$$M_n = \frac{1}{R_{нн}} = \frac{1}{0,0133} = 75,2 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч·Па)}.$$

Найдем коэффициент передачи водяного пара, мг/(ч·Па), от узла А1 к наружному воздуху:

$$M_{A1-n} = M_n \cdot F = 75,2 \cdot 0,06 = 4,512 \text{ мг/(ч·Па)}.$$

Определим количество передаваемого водяного пара, мг/ч, от узла к наружному воздуху:

$$G_{A1-n} = (e_{A1} - e_n) M_{A1-n}.$$

Составим уравнение материального баланса по количеству водяного пара для данного узла:

$$2G_{A1-A2} + G_{A1-B1} + G_{A1-n} = 0.$$

Узел А2 в расчете взят дважды, так как узел А1 находится на оси симметрии ограждающей конструкции и с противоположной стороны оси находится симметричный узлу А2.

Подставим значения количества водяного пара:

$$2 \cdot (e_{A1} - e_{A2}) M_{A1-A2} + (e_{A1} - e_{B1}) M_{A1-B1} + (e_{A1} - e_n) M_{A1-n} = 0.$$

Выразим из уравнения парциальное давление водяных паров в узле А1:

$$e_{A1} = \frac{2M_{A1-A2}e_{A2} + M_{A1-B1}e_{B1} + M_{A1-n}e_n}{2M_{A1-A2} + M_{A1-B1} + M_{A1-n}}. \quad (3)$$

Подставив значения коэффициентов паропередачи, получим:

$$e_{A1} = \frac{2 \cdot 0,11e_{A2} + 0,055e_{B1} + 4,512e_n}{2 \cdot 0,11 + 0,055 + 4,512} = 0,046e_{A2} + 0,011e_{B1} + 0,942e_n.$$

В конечном счете мы получаем следующую систему уравнений:

$$e_{A1} = 0,046e_{A2} + 0,011e_{B1} + 0,942e_n$$

$$\dots$$

$$e_{A9} = 0,04e_{A8} + 0,011e_{B9} + 0,948e_n$$

$$e_{B1} = 0,138e_{A1} + 0,61e_{B2} + 0,251e_{B1}$$

$$\dots$$

$$e_{B9} = 0,056e_{A9} + 0,326e_{B8} + 0,618e_{B9}$$

$$e_{B1} = 0,241e_{B1} + 0,636e_{B2} + 0,123e_{Г1}$$

...

$$e_{B9} = 0,423e_{B9} + 0,48e_{B8} + 0,097e_{Г9}$$

$$e_{Г1} = 0,086e_{B1} + 0,834e_{Г2} + 0,079e_{Д1}$$

...

$$e_{Г9} = 0,144e_{B9} + 0,806e_{Г8} + 0,049e_{Д9}$$

$$e_{Д1} = 0,02e_{Г1} + 0,102e_{Д2} + 0,878e_{н}$$

...

$$e_{Д9} = 0,019e_{Г9} + 0,088e_{Д8} + 0,892e_{н}$$

Решение ведется методом итерации. Для первого приближения значения действительного давления водяных паров в точках найдем с помощью уравнения теплопередачи через плоскую стенку. Для этого рассчитаем поперечные сечения стены по осям координат 1, 3 и 6.

Для расчетов предварительно необходимо определить действительные парциальные давления водяных паров по формуле

$$e_n = e_b - (e_b - e_n) \frac{R_b + \sum R}{R_\phi}, \quad (4)$$

где e_b – упругость водяных паров во внутреннем воздухе помещения, Па; e_n – упругость водяных паров в наружном воздухе, Па; R_ϕ – фактическое сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции в направлении поперечной оси, $m^2 \cdot ч \cdot Па/мг$; R_b – сопротивление паропроницанию внутренней поверхности ограждающей конструкции, $m^2 \cdot ^\circ C/Вт$; $\sum R$ – сумма сопротивлений паропроницанию слоев ограждающей конструкции в направлении поперечной оси от внутренней поверхности до расчетного узла, $m^2 \cdot ч \cdot Па/мг$.

Для определения упругости водяных паров e_b и e_n воспользуемся следующей формулой:

$$e = \frac{E\phi}{100}, \quad (5)$$

где E – максимальная упругость водяных паров при данной температуре, Па; ϕ – относительная влажность воздуха, принимаем для внутреннего воздуха равной 60 %; для наружного воздуха (согласно СП 133.13330.2012 «Строительная климатология») – 83 %.

$$e_b = \frac{2339 \cdot 60}{100} = 1403 \text{ Па.}$$

$$e_n = \frac{51 \cdot 83}{100} = 42,3 \text{ Па.}$$

Полученные значения приведены в табл. 2.

Дальнейший расчет сводим в табличную форму. Процесс расчета останавливаем на приближении, в котором упругости водяных паров от предыдущего приближения различаются не более чем на 1 Па.

Итоги расчета приведены в табл. 3.

Для определения эффективности используемой методики воспользуемся двумя методами.

Исходные значения действительной упругости водяных паров в узлах, Па

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| А | 46,7 | 47,6 | 48,5 | 48,6 | 48,6 | 48,6 | 48,6 | 48,6 | 48,5 |
| Б | 402,3 | 479,4 | 556,5 | 562,9 | 569,2 | 569,2 | 569,2 | 562,9 | 556,5 |
| В | 597,5 | 599,5 | 601,5 | 592,5 | 583,4 | 583,4 | 583,4 | 592,5 | 601,5 |
| Г | 984 | 893,7 | 803,4 | 796,1 | 788,7 | 788,7 | 788,7 | 796,1 | 803,4 |
| Д | 1394,3 | 1392,5 | 1390,6 | 1390,5 | 1390,3 | 1390,3 | 1390,3 | 1390,5 | 1390,6 |

Т а б л и ц а 3

Расчетные значения действительной упругости водяных паров в узлах, Па

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| А | 46,95 | 47,39 | 47,70 | 48,39 | 48,37 | 48,35 | 48,34 | 48,36 | 47,78 |
| Б | 447,18 | 489,88 | 515,60 | 534,90 | 538,35 | 537,85 | 536,09 | 532,22 | 521,20 |
| В | 565,18 | 558,22 | 561,32 | 555,24 | 552,21 | 550,72 | 549,74 | 551,66 | 557,99 |
| Г | 825,76 | 800,15 | 774,28 | 751,67 | 756,13 | 755,83 | 749,57 | 734,74 | 740,70 |
| Д | 1390,09 | 1389,44 | 1388,42 | 1388,15 | 1387,06 | 1387,00 | 1386,92 | 1387,79 | 1387,69 |

Суть первого состоит в сравнении площадей полей возможной конденсации, построенных по исходным данным и по полученным расчетным.

По значениям температур из табл. 1, используя справочные таблицы, найдем значения максимальной упругости водяных паров для каждого из узлов.

Т а б л и ц а 4

Значения максимальной упругости водяных паров в характерных точках

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| А | 56,00 | 56,00 | 55,50 | 54,50 | 54,00 | 54,00 | 53,75 | 53,50 | 53,00 |
| Б | 85,80 | 84,20 | 77,00 | 71,90 | 68,40 | 66,60 | 66,20 | 65,70 | 65,40 |
| В | 753,60 | 710,40 | 217,00 | 135,20 | 109,30 | 105,40 | 105,50 | 116,00 | 126,90 |
| Г | 1440,00 | 1488,00 | 1651,00 | 1733,00 | 1795,00 | 1823,00 | 1841,00 | 1853,00 | 1859,00 |
| Д | 1987,00 | 2012,00 | 2051,00 | 2089,00 | 2116,00 | 2129,00 | 2143,00 | 2143,00 | 2143,00 |

Для определения зоны возможной конденсации воспользуемся графическим методом, для этого построим графики распределения максимальной и действительной упругости водяных паров в продольном сечении по всем расчетным осям (оси 1-9). Затем по полученным данным построим в горизонтальной плоскости стены зону возможной конденсации.

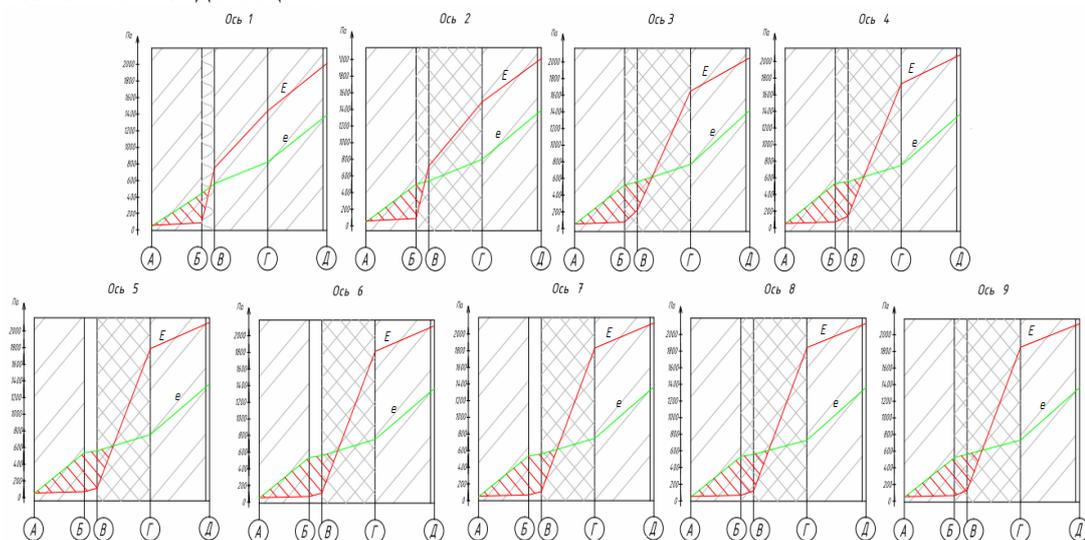


Рис. 3. Определение зоны возможной конденсации по расчетным данным

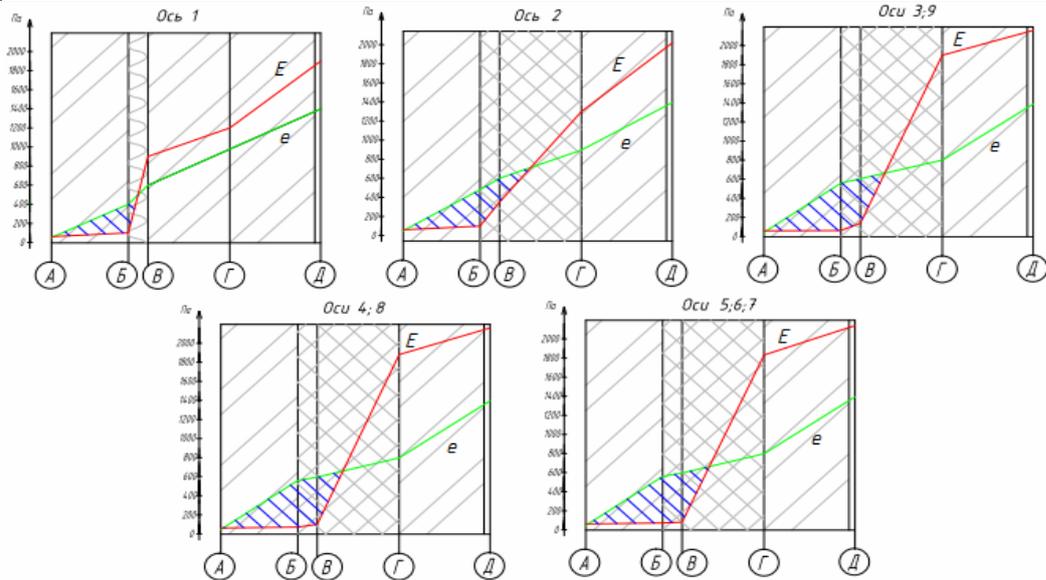


Рис. 4. Определение зоны возможной конденсации по изначальным данным

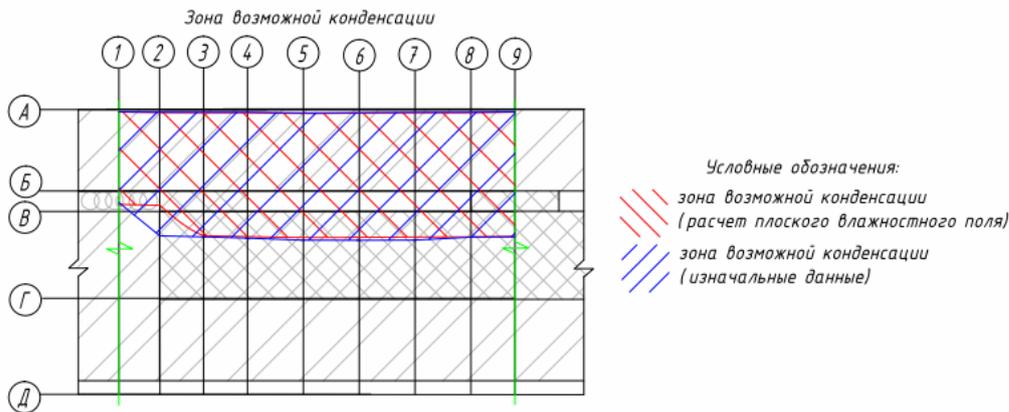


Рис. 5. Сопоставление площадей зон конденсации

Как видно из построений, существенное отличие наблюдается только по оси 2. В остальном зона конденсации практически идентична той, что была получена при расчете влажностного поля.

Площадь зоны возможной конденсации при расчете влажностного поля равна 1030,00 см².

Площадь зоны возможной конденсации при расчете изначальных данных 1075,00 см².

Невязка площадей составляет 0,4 %

Площади различаются крайне незначительно, из этого следует, что расчет плоского влажностного поля нерационален для определения зоны возможной конденсации для данной конструкции вследствие большой трудоемкости.

Суть второго метода состоит в определении невязок значений в каждом из узлов. Величина невязки определяется между данными табл. 3 (итог расчета влажностного поля) и данными табл. 2 (изначальные данные для расчета).

Т а б л и ц а 5

Невязка значений действительной упругости водяных паров в узлах, %

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| А | 0,5 | 0,4 | 1,7 | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 1,5 |
| Б | 11,2 | 2,2 | 7,3 | 5,0 | 5,4 | 5,5 | 5,8 | 5,4 | 6,3 |
| В | 5,4 | 6,9 | 6,7 | 6,3 | 5,3 | 5,6 | 5,8 | 6,9 | 7,2 |
| Г | 16,1 | 10,5 | 3,6 | 5,6 | 4,1 | 4,2 | 5,0 | 7,7 | 7,8 |
| Д | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |

Как видно из табл. 5, невязка на поверхности ограждающей конструкции несущественна. В толще она варьируется от 2,2 до 16,1 %, а невязка в толще конструкции составляет около 6,4 %.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что использование метода влажностных полей для данной конструкции рационально при определении значения действительной упругости водяных паров с погрешностью не более 5-10 %.

Список литературы

1. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
2. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика / В.Н. Богословский. – М.: Стройиздат, 1982.
3. Корниенко, С.В. Оценка влажностного режима многослойной стеновой конструкции в годовом цикле / С.В. Корниенко, Н.И. Ватин, М.Р. Петриченко, А.С. Горшков // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – №6.
4. Королева, Т.И. Исследование влажностного состояния неоднородных конструкций наружных ограждений / Т.И. Королева, Н.В. Аржаева, И.Е. Мельников // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 4 (35). – С. 159–166.
5. Королева, Т.И. Исследование возможности конденсации водяного пара в толще многослойной конструкции наружного ограждения / Т.И. Королева, Н.В. Аржаева // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 2 (35). – С. 152–158.
6. Королева, Т.И. Исследование условий возникновения конденсата в толще ограждений и его влияние на внутренний микроклимат помещений / Т.И. Королева, Грейсх Г.И., Н.В. Аржаева, Е.Г. Ежов // Internation Jorurnal of Applied Engineering Reseach (IJAER). – Paper Code 49434. – Delhi, INDIA, 2016. – Vol. 11, N 21. – P. 10402–10407.
7. Королева, Т.И. Определение комплекса энергосберегающих мероприятий для оптимизации теплового режима здания / Т.И. Королева // Региональная архитектура и строительство. – 2006. – № 1. – С. 104–106.
8. Гагарин, В.Г. Теплозащита наружных стен здания с облицовкой из кирпичной кладки / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов, С.И. Крышов, О.И. Пономарев // АВОК. – 2009. – №9.
9. Корниенко, С.В. Совершенствование российских норм по влагозащите ограждающих конструкций / С.В. Корниенко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. – 2017. – Вып. 47 (66).
10. Фролов, М.В. Выявление причин возникновения влаги в ограждающей конструкции стены / М.В. Фролов // Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: сб. тр. XVIII Международной научно-практической конференции / под ред. Т.И. Королёвой. – Пенза, 2017.

References

1. Fokin, K.F. Construction heat engineering of enclosing parts of buildings / K.F. Fokin. – 4th ed., rew. and add. – M.: Stroiizdat, 1973. – 287 p.
2. Bogoslovski, V.N. Construction thermophysics / V.N. Bogoslovski. – M.: Stroiizdat, 1982.
3. Kornienko, S.V. Evaluation of the moisture regime of a multi-layer wall structure in the annual cycle / S.V. Kornienko, N.I. Vatin, M.R. Petrichenko, A.S. Gorshkov // Construction of unique buildings and structures. – 2015. – №6.
4. Koroleva, T.I. Investigation of the moisture state of heterogeneous structures of external fences / T.I. Koroleva, N.V. Arzhayeva, I.E. Melnikov //Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 4 (35). – P. 159–166.

5. Koroleva, T.I. Study of the possibility of condensation of water vapor in the thickness of the multi-layered structure of the outer fence / T.I. Koroleva, N.V. Arzhayeva // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 2 (35). – P. 152–158.
6. Koroleva, T.I. Investigation of conditions for the occurrence of condensate in the thickness of fences and its impact on the indoor indoor climate / T.I. Koroleva, Graysukh G.I., N.V. Arzhayeva, E.G. Yezhov // Internation Jorurnal of Applied Engineering Reseach (IJAER). – Paper Code 49434. – Delhi, INDIA, 2016. – Vol. 11, No. 21. – P. 10402–10407.
7. Koroleva, T.I. Definition of a set of energy-saving measures to optimize the thermal regime of a building / T.I. Koroleva // Regional Architecture and engineering. – 2006. – No. 1. – P. 104–106.
8. Gagarin, V.G. Thermal protection of the exterior walls of the building with brickwork cladding / V.G. Gagarin, V.V. Kozlov, S.I. Kryshov, O.I. Ponomarev // AVOK. – 2009. – №9.
9. Kornienko, S.V. Improvement of Russian norms on moisture protection of enclosing structures / S.V. Kornienko // Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and Architecture. – 2017. – Vol. 47 (66).
10. Frolov, M.V. Identification of the causes of moisture in the walling / M.V. Frolov // Problems of energy saving in the industrial and housing complexes. Collection of works of the XVIII International Scientific and Practical Conference / edited by T.I. Koroleva. – Penza, 2017.

УДК 628.33

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

Бикунова Марина Викторовна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»

Шейн Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Механика»
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина
Россия, 410054, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77,
тел.: (8452) 99-88-11; факс: (8452) 99-88-10

Осипова Наталия Николаевна,
доктор технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение,
вентиляция, водообеспечение и прикладная
гидрогазодинамика»
E-mail: osnat75@mail.ru

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.

Bikunova Marina Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Water supply, sewerage
and hydraulic engineering»

Shein Alexander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Mechanics»
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
Russia, 410054, Saratov, 77,
Polytechnicheskaya St.
tel.: (8452) 99-88-11; факс: (8452) 99-88-10

Osipova Natalya Nikolaevna,
Doctor of Science, Associate Professor,
Head of Department «Heat and Gas Supply,
Ventilation, Water Supply and Applied
Hydroaerodynamics»
E-mail: osnat75@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБРАБОТАННОГО В ЭЛЕКТРОЛИЗЁРЕ АКТИВНОГО ИЛА АЭРОТЕНКА

Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, А.И. Шейн, Н.Н. Осипова

Определён иловый индекс активного ила, используемого для биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод в лабораторном аэротенке. Дан сравнительный анализ седиментационных характеристик активного ила при его различных дозах в аэрационном сооружении без предварительной обработки и с предварительной обработкой в электролизёре и без него. Показано, что обработка возвратного активного ила в электрическом поле с аэрацией позволила существенно снизить величину илового индекса при повышенных дозах ила в аэротенке, а также улучшить качество осветленной воды после отстаивания.

Ключевые слова: хозяйственно-бытовые сточные воды, биологическая очистка, активный ил, аэротенк, электрообработка, аэрация, отстаивание, иловый индекс, мутность

THE STUDY OF SEDIMENTATION CHARACTERISTICS OF PRE-TREATED IN THE ELECTROLYZER ACTIVE SLUDGE AERATION TANK

B.M. Grishin, M.V. Bikunova, A.I. Shein, N.N. Osipova

The article deals with the issues related to the determination of the sludge index of activated sludge used for biological treatment of domestic wastewater in the laboratory aeration tank. A comparison of the sedimentation characteristics of the activated sludge at different doses of the

aeration facility without pre-treatment and pre-treatment in the cell is given. It is shown that the treatment of return activated sludge in an electric field with aeration can significantly reduce the value of the sludge index at higher doses of sludge in the aeration tank, as well as improve the quality of clarified water after settling.

Keywords: domestic waste water, biological treatment, activated sludge, aeration tank, electrical treatment, aeration, sedimentation, sludge index, turbidity

ВВЕДЕНИЕ

Удельная скорость окисления примесей хозяйственно-бытовых сточных вод в аэротенке существенно зависит от дозы присутствующего в аэрационном сооружении активного ила. Однако доза ила при биологической очистке не может назначаться произвольно и, в свою очередь, зависит от способности активного ила к осаждению, характеризуемой понятием илового индекса.

На большинстве канализационных очистных сооружений с аэротенками процесс отделения активного ила от биологически очищенных сточных вод осуществляется путем отстаивания, после чего он возвращается в начало аэрационного сооружения. Если ил будет обладать плохими седиментационными свойствами, то его остаточные концентрации в очищенной воде будут ухудшать её качество, кроме того, в аэротенке нельзя будет установить требуемую для глубокой биологической очистки стоков дозу активного ила. Хорошо оседающий активный ил имеет иловый индекс от 60 до 150 мг/г, в зависимости от состава очищенных сточных вод и режима работы аэротенка. Как слишком малая, так и слишком большая нагрузка на активный ил по органическим загрязнениям приводит к резкому повышению илового индекса (или «вспуханию» ила) и увеличению его выноса с очищенной водой из вторичных отстойников. Известно также, что окислительная мощность аэротенка возрастает прямо пропорционально увеличению концентрации активного ила в данном сооружении. Таким образом, повышение дозы ила в аэротенке и, соответственно, улучшение биологической очистки напрямую зависят от того, насколько хорошо будет проходить процесс осаждения активного ила из его смеси с очищенной водой. Для улучшения седиментационных характеристик и окислительных свойств ила используются различные методы. Одним из наиболее перспективных методов оптимизации работы системы «аэротенк – вторичный отстойник» является предварительная обработка возвратного активного ила в электрическом поле [1, 2]. Однако к настоящему времени вопрос о связи величин илового индекса с дозами активного ила при его электрообработке изучен недостаточно и является одним из наиболее актуальных в исследованиях, связанных с биологической очисткой сточных вод в аэротенках.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперименты проводились на опытной установке, размещенной в лабораторном корпусе канализационных очистных сооружений (КОС) г. Заречного, Пензенской области.

В состав установки входили модели опытного и контрольного аэротенков емкостью по 0,1 м³, цилиндры-отстойники, проточный электролизёр, оснащенный мелкопузырчатым аэратором, компрессоры, насосы и вспомогательные емкости (рис. 1).

В ходе экспериментов в контрольный аэротенк 2 подавалась на очистку смесь хозяйственно-бытовых сточных вод из бака 9 и возвратного активного ила из бака 10, а в опытный аэротенк 1 – смесь стоков и предварительно обработанного в напорном электролизёре 4 возвратного активного ила. Электролизёр имел 4 пары плоских электродов (анод – ОРТА, катод – нержавеющая сталь), напряжение постоянного тока на электродах составляло 12 В при удельных затратах электричества $(0,6-0,7) \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$. Время обработки активного ила в электролизёре – от 5 до 9 с. В некоторых сериях экспериментов обрабатываемый в электролизёре 4 ил аэрировался за счёт подачи воздуха компрессором 5 через мелкопузырчатый аэратор 7, при этом воздушнонасыщение возвратного ила составляло от 8 до 10 %.

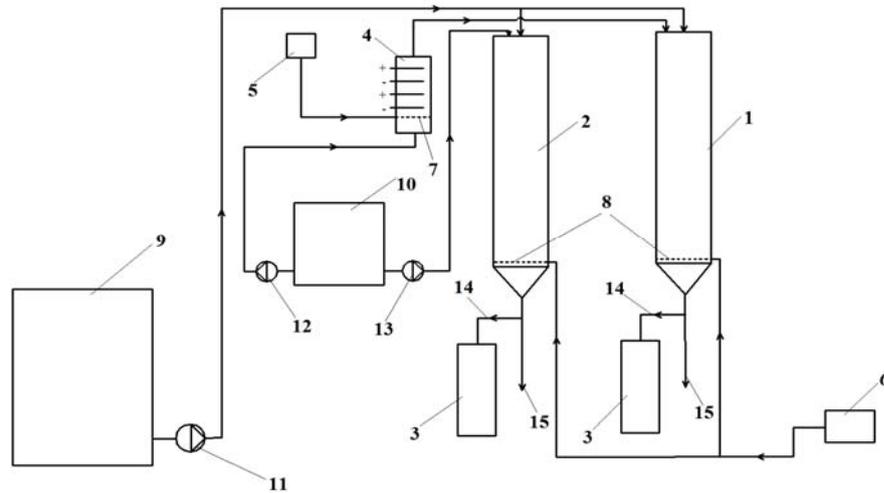


Рис. 1. Схема лабораторной установки:

1, 2 – опытный и контрольный аэротенки; 3 – цилиндры-отстойники; 4 – электролизер; 5, 6 – компрессоры; 7, 8 – мелкопузырчатые аэраторы; 9 – бак хозяйственно-бытовой сточной воды; 10 – бак возвратного ила; 11, 12, 13 – насосы; 14 – отбор проб; 15 – сброс в канализацию

Объектом исследований являлся активный ил, выходящий вместе с биологически очищенными сточными водами из лабораторных опытного и контрольного аэротенков. Зольность ила составляла в среднем 28-32 %, дозы ила в аэротенках варьировались от 1,5 до 3,5 г/л, средняя нагрузка при этом составляла от 0,05 до 0,15 г БПК_{полн} сточной воды на 1 г беззольного сухого вещества ила в сутки.

Программа лабораторных исследований седиментационных характеристик активного ила предусматривала отбор проб смеси биологически очищенных сточных вод с илом после опытного и контрольного аэротенков с последующим их отстаиванием в цилиндре-отстойнике при различных концентрациях активного ила. Объем каждой отбираемой пробы смеси очищенных сточных вод с активным илом составлял 4 литра.

В ходе проведения лабораторных испытаний решались следующие задачи:

1. Нахождение величины илового индекса при 30-минутном отстаивании выходящего в смеси с биологически очищенными стоками из опытного и контрольного аэротенков активного ила с дозами от 1,5 г/л до 3,5 г/л.

2. Определение осредненной концентрации взвешенных веществ в слое осветленного стока после 30-90-минутного отстаивания в цилиндре-отстойнике.

При проведении лабораторных исследований концентрация взвешенных веществ в осветленной воде, иловый индекс и доза активного ила определялись в соответствии с рекомендациями [3, 4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Графики изменения концентраций взвешенных веществ в осветленной воде после 30-90-минутного отстаивания иловой смеси при дозах активного ила 1,5-3,5 г/л показаны на рис. 2-4. Диаграммы изменения иловых индексов после 30-минутного отстаивания иловой смеси при различных дозах активного ила приведены на рис. 5.

При отстаивании хозяйственно-бытовых стоков после биологической очистки активным илом с дозами 1,5 г/л концентрация взвешенных веществ в осветленной воде в течение времени пребывания в цилиндре-отстойнике T от 30 до 90 минут снижалась от 17 до 12 мг/л для проб, взятых из контрольного аэротенка (см. рис. 2, график 1). Для иловой смеси, взятой из опытного аэротенка с предварительной обработкой возвратного ила, за данный промежуток времени отстаивания концентрация взвешенных веществ в осветленной воде снижалась от 12 до 7,5 мг/л (см. рис. 2, график 2). Электрообработка ила с аэрацией позволила снизить остаточную концентрацию взвеси после 1,5-часового отстаивания до 6,5 мг/л (см. рис. 2, график 3).

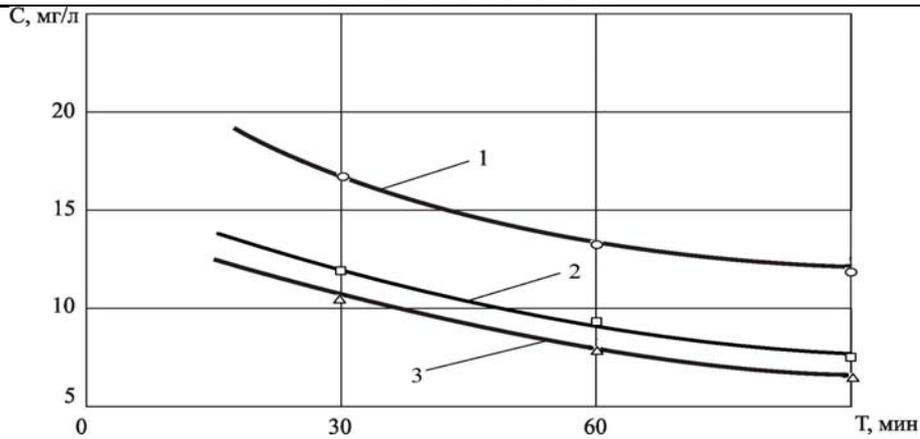


Рис. 2. Графики изменения мутности осветленной воды в процессе отстаивания иловой смеси при дозе ила $a=1,5$ г/л:

1 – после контрольного аэротенка; 2 – после опытного аэротенка с электрообработкой возвратного ила; 3 – после опытного аэротенка с электрообработкой и аэрацией возвратного ила

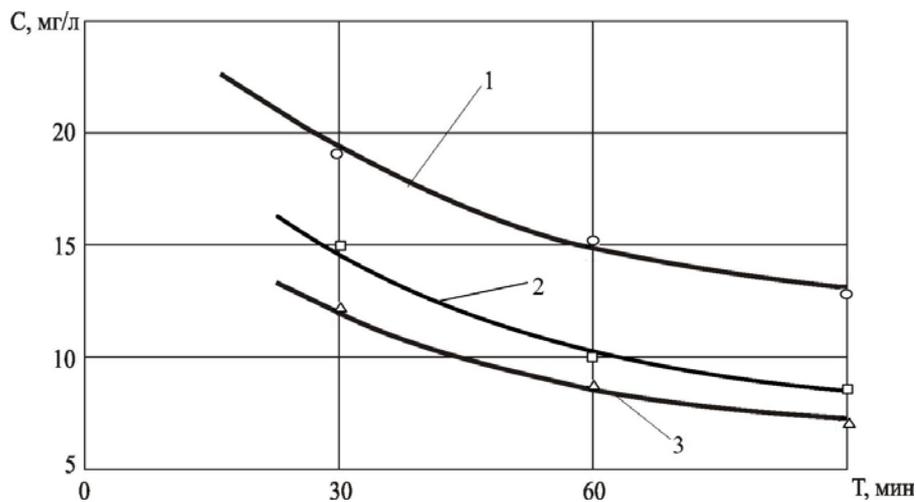


Рис. 3. Графики изменения мутности осветленной воды в процессе отстаивания иловой смеси при дозе ила $a=2,5$ г/л:

1 – после контрольного аэротенка; 2 – после опытного аэротенка с электрообработкой возвратного ила; 3 – после опытного аэротенка с электрообработкой и аэрацией возвратного ила

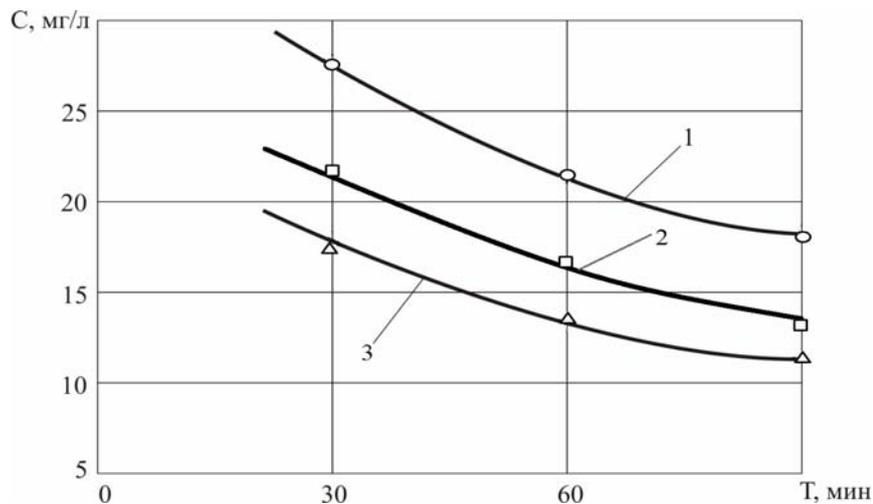


Рис. 4. Графики изменения мутности осветленной воды в процессе отстаивания иловой смеси при дозе ила $a=3,5$ г/л:

1 – после контрольного аэротенка; 2 – после опытного аэротенка с электрообработкой возвратного ила; 3 – после опытного аэротенка с электрообработкой и аэрацией возвратного ила

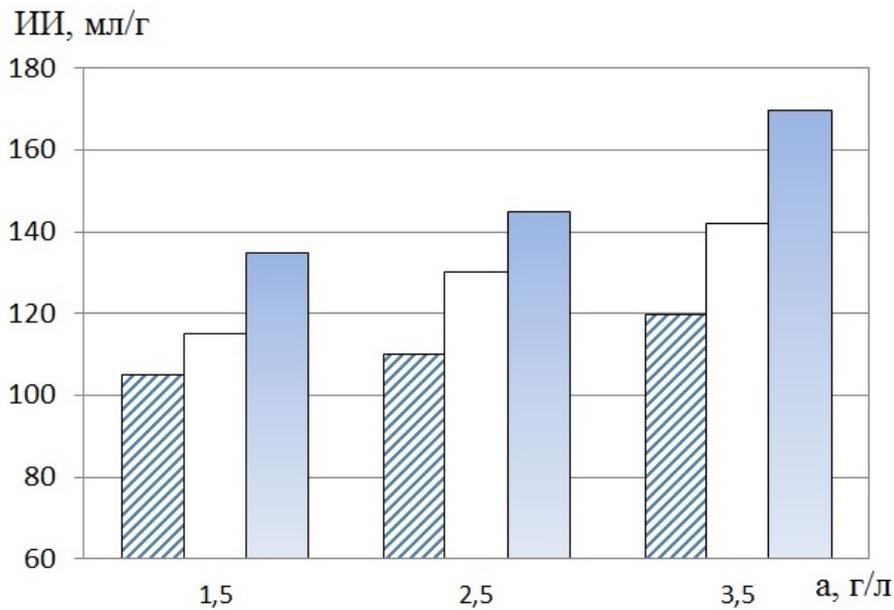
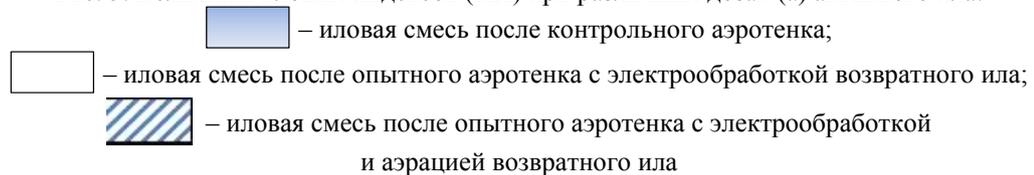


Рис. 5. Величины иловых индексов (ИИ) при различных дозах (а) активного ила:



При отстаивании иловой смеси с дозами активного ила 2,5 г/л для проб, взятых из контрольного аэротенка, концентрация взвешенных веществ в осветленной воде составляла 18,5 мг/л для времени отстаивания $T=30$ мин (см. рис. 3, график 1) и равнялась 13 мг/л при $T=90$ мин. Для проб иловой смеси, взятых из опытного аэротенка при той же дозе предварительно обработанного в электролизёре активного ила, концентрация взвеси в осветленной воде для времени отстаивания $T=30$ мин составляла 14,8 мг/л (см. рис. 3, график 2) и снижалась до 8,5 мг/л при $T=90$ мин.

Предварительная электрообработка ила с аэрацией позволила снизить мутность осветленной воды после 30-минутного отстаивания до 12,2 мг/л, а после 90 минут отстаивания – до 7,5 мг/л (см. рис. 3, график 3).

При отстаивании иловой смеси с дозами активного ила 3,5 г/л для проб, взятых из контрольного аэротенка, осредненная концентрация взвеси в слое осветленной воды цилиндра-отстойника составляла 27,2 мг/л для времени отстаивания $T=30$ мин (см. рис. 4, график 1) и равнялась 18,5 мг/л при $T=90$ мин. Для проб иловой смеси, взятых из опытного аэротенка при той же дозе предварительно электрообработанного активного ила, концентрация взвеси в осветленной воде для времени отстаивания $T=30$ мин составляла 21,8 мг/л (см. рис. 4, график 2) и снижалась до 13,8 мг/л при $T=90$ мин.

При аэрации с электрообработкой возвратного активного ила мутность осветленной воды после 30 минут нахождения в цилиндре-отстойнике составляла 17,7 мг/л, а через 90 минут отстаивания – 11,2 мг/л (см. рис. 4, график 3).

Анализ графиков на рис. 2–4 позволяет сделать вывод о том, что предварительная обработка ила в электролизёре как аэрацией, так и без неё перед опытным аэротенком улучшает флокулирующие свойства хлопков ила в процессе биологической очистки и способствует снижению концентрации взвешенных веществ в осветленной воде при отстаивании иловой смеси. При времени отстаивания $T=90$ мин остаточная концентрация взвеси в осветленной воде для иловой смеси с дозами активного ила 3,5 г/л после опытного аэротенка была приблизительно на том же уровне, что и концентрация взвеси в осветленной воде после контрольного аэротенка для иловой смеси с дозами активного ила 1,5 г/л. Анализ диаграмм на рис. 5 также позволяет сделать вывод о

лучших седиментационных свойствах активного ила, предварительно обработанного в электролизёре. При увеличении доз активного ила с 1,5 до 3,5 г/л в иловой смеси, взятой после контрольного аэротенка, иловый индекс увеличивался с 135 мл/г до 170 мл/г, тогда как для этого же интервала доз активного ила в иловой смеси, взятой после опытного аэротенка, иловый индекс изменялся от 115 до 142 мл/г для ила, предварительно обработанного в электролизёре без аэрации, и от 104 до 120 мл/г для возвратного ила, предварительно обработанного в электролизёре с аэрацией, что находилось в пределах, характерных для хорошо оседающего ила ($60 < \text{ИИ} < 150$ мл/г).

Таким образом, предварительная обработка активного ила в электролизёре позволила осуществить процесс биологической очистки с увеличенными дозами ила без ухудшения седиментационных свойств иловой смеси.

ВЫВОДЫ

1. Предварительная обработка активного ила в электролизёре позволяет реализовать процесс биологической очистки сточных вод в аэротенке с повышенными (до 3,5 г/л) дозами ила, сохраняя при этом низкие значения илового индекса (менее 150 мл/г). Кислородонасыщение активного ила во время электрообработки улучшает его седиментационные свойства, снижая иловый индекс до значений 120 мл/г и менее.

2. При одинаковых дозах активного ила в лабораторных аэротенках концентрация взвеси в осветленной воде, полученной после отстаивания иловой смеси, прошедшей биологическую очистку в опытном аэротенке, была в среднем на 5-6 мг/л ниже, чем концентрации взвеси в осветленной воде, полученной в результате отстаивания иловой смеси, выходящей из контрольного аэротенка. Наиболее высокий эффект осветления был достигнут при отстаивании смеси очищенного стока с активным илом, обработанным в электролизёре с аэрацией, что свидетельствует о положительном влиянии предварительного кислородонасыщения ила на его флокулирующие свойства по отношению к взвешенным веществам, присутствующим в очищаемой сточной воде.

Список литературы

1. Гришин, Б.М. Биологическая очистка хозяйственно-бытовых сточных вод с использованием вихревых смесительных устройств / Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, В.Г. Камбург, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 3 (28). – С. 143-148.
2. Андреев, С.Ю. Новая технология интенсификации работы городских канализационных очистных сооружений с применением вихревых гидродинамических устройств / С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин, Н.Г. Вилкова, А.Н. Кошев, Н.Н. Ласьков // Водоочистка. – 2012. – № 6. – С. 46-56.
3. Новиков, Ю.В. Методы исследования качества воды водоёмов / Ю.В. Новиков, К.О. Ласточкина, З.Н. Болдина. – М.: Медицина, 1990.
4. Методика выполнения измерений дозы ила по объёму и расчет илового индекса. ФР 1.31.2008. 04398. – М.: Акварос, 2008.

References

1. Grishin, B.M. Biological purification of domestic waste water using vortex mixing devices / B.M. Grishin, M.V. Bikunova, V.G. Kamburg, A.N. Koshev // Regional architecture and engineering. – 2016. – № 3 (28). – P. 143–148.
2. Andreev, S.Yu. New technology of intensifying the work of urban sewage treatment plants with the application of vortex hydrodynamic devices / S. Y. Andreev, B. M. Grishin, N.G. Vilkova, A.N. Koshev, N.N. Laskov // Water Purification – 2012. – № 6. – P. 46–56.
3. Novikov, Yu.V. Methods of study the water quality of water bodies / Y.V. Novikov, K.O. Lastochkina, Z.N. Boldina. – M.: Medicine, 1990.
4. The method of measurement of the dose of sludge volume and sludge index calculation. FR 1.31.2008. 04398. – M.: Akvaros, 2008.

УДК 628.3

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

Андреев Сергей Юрьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Водоснабжение, водоотведение
и гидротехника»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

*Пензенский государственный
технологический университет*

Россия, 440039, г. Пенза,
проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а / 11,
тел. (8412) 49-54-41; факс (8412) 49-60-86

Яхкин Михаил Ильич,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник отдела
научных исследований
E-mail: yah@sura.ru

*Акционерное общество «Научно-
производственное предприятие «Рубин»*
440000, Россия, Пенза, Байдукова, 2,
тел.: +7-8412-20-48-08

Князев Владимир Александрович,
кандидат технических наук,
инженер 1 категории

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Andreev Sergey Yuryevich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Water supply, sewerage and
hydraulic engineering»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Penza State Technological University

Russia, 440039, Penza,
1A / 11 Baidukova / Gagarin St.,
tel. (8412) 49-54-41; fax (8412) 49-60-86

Yakhkind Michael Il'ich,
Candidate of Sciences, Senior Scientific
Officer of the Scientific Research department
E-mail: yah@sura.ru

*Joint Stock Company «Research And
Production Enterprise "Rubin»*
440000, Russia, Penza, 2, Baidukova,
tel: + 7-8412-20-48-08

Knyazev Vladimir Aleksandrovich,
Candidate of Sciences,
1st Category Engineer

УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСРЕДНЕННЫХ МЕСТНЫХ СКОРОСТЕЙ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В ГИДРАВЛИЧЕСКИ ГЛАДКИХ И ВПОЛНЕ ШЕРОХОВАТЫХ ТРУБАХ

С.Ю. Андреев, М.И. Яхкин, В.А. Князев

Приведены результаты исследований гидродинамических закономерностей распределения осредненных местных скоростей турбулентного потока жидкости в гидравлически гладких и вполне шероховатых трубах. Определено расстояние $u_{сб}$ от стенки трубы до слоя, где местная скорость u_r равна средней скорости u как в ламинарном, так и в турбулентном потоке жидкости. Уточнены значения констант турбулентности в логарифмическом уравнении Кармана – Прандтля. Предложены формулы для расчета профиля осредненных местных скоростей в поперечных сечениях напорных трубопроводов, работающих в режиме гидравлически гладких и вполне шероховатых русел. Использование уточненной методики расчета позволит оптимизировать процессы проектирования и эксплуатации напорных технологических трубопроводов.

Ключевые слова: напорный трубопровод, динамическая скорость, градиент скорости, кинематический коэффициент вязкости, логарифмический закон распределения, гидравлическое подобие, эквивалентная шероховатость

SPECIFIED TECHNIQUE FOR DETERMINING MEDIUM AREA LOCAL FLOW RATE SPEEDS IN HYDRAULIC SMOOTH AND QUITE ROUGH PIPES

S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, V.A. Knyazev

The results of theoretical studies of the hydrodynamic characteristics of the distribution of the averaged local velocities of turbulent fluid flow in hydraulically smooth and quite rough pipes are presented. The distance y_{av} from the pipe wall to the layer where the local velocity u_r is equal to the mean velocity v is determined both in the laminar and in the turbulent fluid flow. The values of the turbulence constants in the log Karman – Prandtl equation are specified. Formulas for calculating the profile of the averaged local velocities in cross sections of pressure pipelines operating in the mode of hydraulically smooth and quite rough channels are proposed. The use of the specified calculation method allows to optimize the processes of designing and operation of pressure technological pipelines.

Keywords: pressure pipe; dynamic speed, speed gradient, kinematic viscosity coefficient, logarithmic distribution law, hydraulic similarity, equivalent roughness

В настоящее время для описания профиля местных скоростей турбулентных потоков жидкостей широко используется логарифмический закон Кармана – Прандтля, считающийся одним из фундаментальных соотношений инженерной науки [1]:

$$\bar{u}_r = v_* \left(\frac{1}{\chi} \ln \frac{v_* y}{\nu} + B \right) \quad (\text{м/с}), \quad (1)$$

где \bar{u}_r – осредненная местная скорость потока на расстоянии $r = r_0 - y$ (м) от его оси (м/с); v_* – динамическая скорость (скорость касательного напряжения силы трения) (м/с); ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости ($\text{м}^2/\text{с}$); χ и B – постоянные величины.

Логарифмический закон распределения местных скоростей по текущему радиусу был выведен на основе полуэмпирической теории турбулентности, разработанной исходя из критериев гидравлического подобия.

Одним из постулатов полуэмпирической теории турбулентности является представление Л. Прандтля о том, что турбулентный поток жидкости необходимо разделить на две радикально различающиеся по своим свойствам области: пристеночный «ламинарный пограничный слой» – область, где течение формируется под действием сил вязкого трения, и остальную часть (ядро потока) – область, где определяющее значение имеют турбулентные пульсации местных скоростей потока, а силы вязкого трения играют незначительную роль [1].

Пристеночный подслой имеет толщину δ_* (м), и градиент скорости G_* (м/с) в этом подслое сохраняет постоянное значение, поскольку величина сил вязкого трения превышает величину сил инерции, действующих на элементарные струйки [1].

$$G_* = \frac{du}{dy} = \frac{v_*^2}{\nu_*} = \text{const} \quad (\text{с}^{-1}), \quad (2)$$

где u (м/с) – местная скорость потока на расстоянии y (м) от стенки трубы; ν_* – кинематический коэффициент вязкости жидкости в пристеночном подслое ($\text{м}^2/\text{с}$); v_* – динамическая скорость (м/с), которая определяется по формуле

$$v_* = \sqrt{iRg} \quad (\text{м/с}); \quad (3)$$

здесь i – гидравлический уклон – отношение потерь напора h (м) к длине потока l (м); R – гидравлический радиус (м) – отношение площади поперечного сечения потока ω (м^2) к его смоченному периметру χ (м); g – ускорение свободного падения ($\text{м}/\text{с}^2$).

Символ (*) обозначает здесь и далее, что данная характеристика относится к рассматриваемому пристеночному подслою.

Другой характеристикой потока жидкости в пристеночной области является касательное напряжение силы продольного вязкого трения

$$\tau_{B*} = \frac{F_T}{S} = \mu \frac{du}{dy} = \mu G_* \text{ (Н/м}^2\text{)}, \quad (4)$$

где F_T – сила трения (Н); S – площадь поверхности раздела фаз жидкость – стенка трубы (м²); μ – динамический коэффициент вязкости (Па·с).

В турбулентном потоке полное касательное напряжение в рассматриваемой точке τ_{Π} является суммой касательного напряжения, обусловленного действием сил вязкого трения τ_B , и касательного напряжения, обусловленного турбулентным перемешиванием τ_T . Первый компонент этой суммы выражается через динамический коэффициент вязкости μ по формуле (4).

Буссинеск Ж. предложил выражать турбулентное касательное напряжение τ_T через динамический коэффициент турбулентной вязкости μ_T по подобной формуле [3]. При этом μ_T подобен μ , но зависит в основном от интенсивности перемешивания, а не от свойств жидкости.

Поэтому в турбулентном потоке полное касательное напряжение в рассматриваемой точке τ_{Π} можно определить по формуле

$$\tau_{\Pi} = \tau_B + \tau_T = \mu \frac{d\bar{u}}{dy} + \mu_T \frac{d\bar{u}}{dy} = (\mu + \mu_T) \frac{d\bar{u}}{dy} = (v + v_T) \rho \frac{d\bar{u}}{dy} \text{ (Н/м}^2\text{)}, \quad (5)$$

где $v_T = \mu_T/\rho$ – кинематический коэффициент турбулентной вязкости (м²/с), подобный кинематическому коэффициенту вязкости v .

Как и μ_T , v_T зависит в основном от интенсивности турбулентного перемешивания.

В соответствии с формулой (5) полный динамический коэффициент вязкости представляет собой сумму $\mu + \mu_T$, а полный кинематический коэффициент вязкости сумму $v + v_T$.

Поэтому для условий пристеночного подслоя в турбулентном потоке будет справедливо следующее равенство:

$$v_* = v + v_T = \alpha v \text{ (м}^2\text{/с)}, \quad (6)$$

где
$$\alpha = 1 + \frac{v_T}{v} . \quad (7)$$

При этом формулу (2) можно представить в виде

$$G_* = \frac{v_*^2}{v_*} = \frac{v_*^2}{v + v_T} = \frac{v_*^2}{\alpha v} = \text{const (с}^{-1}\text{)}. \quad (8)$$

Введенный коэффициент $\alpha = 1 + v_T/v$ представляет собой множитель, который учитывает увеличение кинематического коэффициента вязкости в пристеночном подслое жидкости вследствие появления турбулентной составляющей движения жидкости (v_T), а также увеличение коэффициента гидравлического трения в турбулентном режиме движения жидкости λ .

Повышение гидравлического сопротивления в потоке жидкости при возникновении турбулентного режима (увеличение коэффициента гидравлического трения λ) может быть учтено формулой, предложенной нами [2]:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \alpha , \quad (9)$$

где $\text{Re} = vd/v$ – критерий Рейнольдса; d – диаметр трубы (м); v – средняя скорость потока жидкости (м/с).

Из формулы (8) следует, что непосредственно к стенке русла потока жидкости прилегает тонкая прослойка (пристеночный подслои), в которой местная скорость u_y (м/с) меняется по линейному закону

$$u_y = G_* y = \frac{v_*^2}{v_*} y = \frac{v_*^2}{\alpha v} y \quad (\text{м/с}). \quad (10)$$

Местная скорость u_y в пристеночном подслое меняется от значения $u_0 = 0$ на самой стенке до значения $u_{\delta_*} = v_*$ на расстоянии $y = \delta_*$ от стенки потока.

Градиент скорости в пристеночном подслое G_* также может быть определен по формуле, выведенной нами [2]:

$$G_* = \frac{2v}{R} = \text{const}. \quad (11)$$

Поскольку градиент скорости в пристеночном подслое имеет постоянное значение и местная скорость изменяется от $u_0 = 0$ до $u_{\delta_*} = v_*$, то в соответствии с формулой (10) толщина пристеночного подслоя при $y = \delta_*$ может быть определена как

$$\delta_* = \frac{u_{\delta_*}}{G_*} = \frac{v_*}{G_*} \quad (\text{м}). \quad (12)$$

Подставляя G_* из формулы (11) и учитывая, что $v_* = v \sqrt{\frac{\lambda}{8}}$, имеем

$$\delta_* = v \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \cdot \frac{R}{2v} = R \sqrt{\frac{\lambda}{32}} \quad (\text{м}). \quad (13)$$

Пристеночный подслои граничит с переходным подслоем, имеющим толщину $\delta_* = \delta_{**}$.

Символ $**$ здесь и далее обозначает, что данная характеристика относится к рассматриваемому переходному подслою.

Пристеночный и переходный подслои вместе образуют вязкий слой, граничащий с ядром потока и имеющий толщину $y = \delta_* + \delta_{**} = 2\delta_*$. Пристеночный подслои является областью потока жидкости, где ее вязкость играет определяющую роль в характере движения. В переходном подслое турбулентного потока жидкости происходит скачкообразное изменение касательного напряжения τ_r и градиента скорости G_r , в результате чего местная скорость на оси потока уменьшается со значения $u_0 = 2v$, характерного для ламинарного режима, до величины $\bar{u}_0 = 2v\beta$ [2].

Величина градиента скорости в переходном подслое уменьшается со значения G_* на одной из его границ до значения $G_{\delta_{**}}$ на границе с ядром потока.

$$G_{**} = G_* (2\beta - 1) \frac{r_0 - 2\delta_*}{r_0} \quad (\text{с}^{-1}). \quad (14)$$

При этом средний градиент скорости в переходном подслое увеличивается по сравнению с пристеночным подслоем до величины

$$G_{\delta_{**}} = \frac{3G_*}{2\beta - 1} \quad (\text{с}^{-1}). \quad (15)$$

Согласно этой формуле местная скорость в переходном подслое увеличивается со значения v_* на границе с пристеночным подслоем до значения на его границе с ядром потока

$$\bar{u}_y = v_* \left(1 + \frac{3}{2\beta - 1} \right) \quad (\text{м/с}). \quad (16)$$

Прандтлем было сделано допущение о том, что величина касательного напряжения по радиусу турбулентного потока имеет постоянное значение, т.е. касательное напряжение на расстоянии y от стенки трубы τ_y равно касательному напряжению на стенке трубы τ_* [1].

$$\tau_y = \tau_* = \nu_*^2 \rho \quad (\text{Н/м}^2). \quad (17)$$

На основе этого допущения было получено уравнение для определения градиента скорости в ядре потока на расстоянии y от стенки

$$G_y = \frac{d\bar{u}_y}{dy} = \frac{\nu_*}{\chi y} \quad (\text{с}^{-1}), \quad (18)$$

где χ – постоянная Кармана (первая константа турбулентности).

При интегрировании уравнения (18) была выведена зависимость для определения осредненной местной скорости \bar{u}_y

$$\frac{\bar{u}_y}{\nu_*} = \frac{1}{\chi} \ln y + C, \quad (19)$$

где C – постоянная интегрирования.

На границе пристеночного подслоя в соответствии с формулой (10) будет выполняться равенство

$$u_{\delta_*} = \frac{\nu_*^2}{\nu} \delta_* \quad (\text{м/с}). \quad (20)$$

Анализируя формулу (20), можно принять одно из следующих двух допущений.

1-е допущение (предложенное нами) предполагает, что местная скорость на границе пристеночного подслоя при $y = \delta_*$ равна динамической скорости $u_{\delta_*} = \nu_*$, а величина кинематического коэффициента вязкости в пристеночном подслое в α раз превышает величину кинематического коэффициента вязкости жидкости в ядре потока $\nu_* = \alpha \nu$. В этом случае формула (20) примет вид

$$\alpha = \frac{\nu_* \delta_*}{\nu}. \quad (21)$$

Значение коэффициента α может быть найдено из формулы (9) с учетом $\text{Re} = \nu d/\nu$ и $d = 4R$

$$\alpha = \frac{\lambda \text{Re}}{64} = \frac{\lambda \nu d}{64 \nu} = \frac{\lambda \nu 4R}{64 \nu} = \frac{\lambda \nu R}{16 \nu}. \quad (22)$$

Также величина α может быть определена из формул (8) и (11)

$$\frac{\nu_*^2}{\alpha \nu} = \frac{2\nu}{R} \quad (\text{с}^{-1}), \quad (23)$$

откуда, учитывая, что $\nu_* = \nu \sqrt{\frac{\lambda}{8}}$, получаем:

$$\alpha = \frac{\nu_*^2 R}{2\nu \nu} = \frac{\nu^2 \frac{\lambda}{8} R}{2\nu \nu} = \frac{\lambda \nu R}{16 \nu}. \quad (24)$$

2-е допущение базируется на представлениях Прандтля, в соответствии с которыми кинематический коэффициент вязкости в пристеночном подслое равен кинематическому коэффициенту вязкости жидкости $\nu_* = \nu$, а местная скорость на границе

пристеночного подслоя не равна динамической скорости $u_{\delta^*} \neq v_*$, причем отношение скоростей $u_{\delta^*}/v_* = N$ (число Никурадзе) является постоянной величиной. Тогда формула (20) примет вид

$$N = \frac{u_{\delta^*}}{v_*} = \frac{v_* \delta^*}{v}, \quad (25)$$

откуда

$$\delta^* = \frac{Nv}{v_*} \text{ (м)}. \quad (26)$$

Формула (19) при условии, что $y = \delta^*$, с учетом (26) может быть представлена в виде

$$N = \frac{u_{\delta^*}}{v_*} = \frac{1}{\chi} \ln N \frac{v}{v_*} + C, \quad (27)$$

откуда

$$C = \frac{u_{\delta^*}}{v_*} - \frac{1}{\chi} \ln N \frac{v}{v_*} = N - \frac{1}{\chi} \ln N \frac{v}{v_*}. \quad (28)$$

Подставив это значение C в формулу (19), получим

$$\frac{\bar{u}_y}{v_*} = \frac{1}{\chi} \ln y + N - \frac{1}{\chi} \ln N \frac{v}{v_*}, \quad (29)$$

откуда может быть выведена формула Кармана – Прандтля (1), в которой постоянная B равна:

$$B = N - \frac{1}{\chi} \ln N. \quad (30)$$

Математическая обработка экспериментальных данных, полученных И. Никурадзе на гидравлически гладких трубах, позволила получить значения констант турбулентности $\chi = 0,4$; $B = 5,5$; в этом случае формула Кармана – Прандтля (1) примет вид [1]

$$\frac{\bar{u}_y}{v_*} = \frac{1}{0,4} \ln \frac{v_* y}{v} + 5,5 = 2,5 \lg \frac{v_* y}{v} + 5,5. \quad (31)$$

Для вполне шероховатых труб была получена математическая зависимость [1]

$$\frac{\bar{u}_y}{v_*} = 5,75 \lg \frac{y}{\Delta} + 8,48, \quad (32)$$

где Δ – шероховатость поверхности русла потока (средняя высота выступов шероховатости) (м).

Прандтлем были получены зависимости коэффициента гидравлического трения при движении жидкости [1]:

в гидравлически гладких трубах

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg(\text{Re} \sqrt{\lambda}) - 0,8, \quad (33)$$

во вполне шероховатых трубах

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{KB}}} = 2 \lg \frac{d}{\Delta} + 1,14 = 2 \lg \frac{d}{\Delta} + 2 \lg 3,7 = 2 \lg 3,7 \frac{d}{\Delta}, \quad (34)$$

откуда следует формула Прандтля – Никурадзе

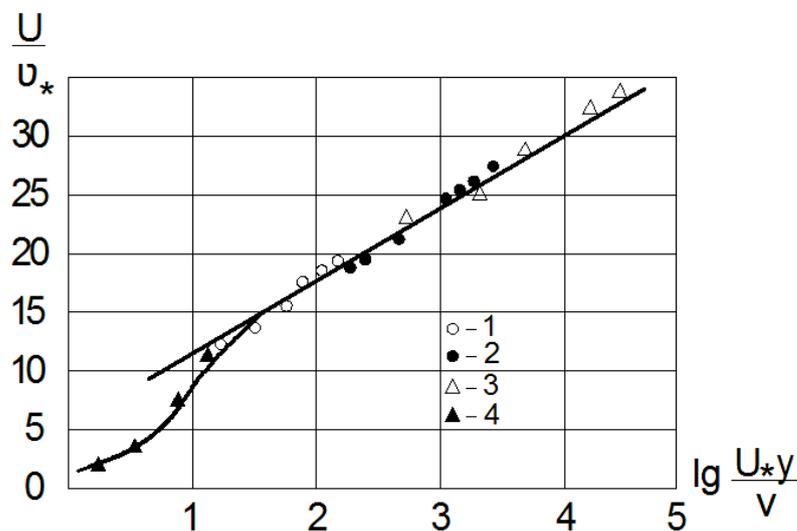
$$\lambda_{KB} = \frac{0,25}{\left(\lg 3,7 \frac{d}{\Delta}\right)^2} \quad (35)$$

В своей работе [3] Л.Д. Ландау приводит уточненную редакцию формулы (31), полученную на основе графоаналитического исследования профиля осредненных скоростей по сечению гидравлически гладких труб:

$$\frac{\bar{u}_r}{v_*} = \frac{1}{0,4} \ln \frac{v_* y}{\nu} + 5,1, \quad (36)$$

т.е. $B=5,1$.

Прямая линия на графике (см. рисунок) отвечает формуле логарифмического закона распределения местных скоростей u_y (1).



Профиль осредненных скоростей по сечению гидравлически гладких труб:
1 – $Re=4 \cdot 10^3$; 2 – $Re=4,1 \cdot 10^5$; 3 – $Re=2 \cdot 10^6$; 4 – опыты Рейхардта

Кривая линия при $v_* y / \nu \leq 5$ ($\lg v_* y / \nu \leq 0,7$) соответственно отвечает формуле линейного закона распределения местных скоростей u_y (10).

Значению коэффициентов $\chi = 0,4$ и $B = 5,1$ согласно формуле (30) будет соответствовать значение числа Никурадзе $N = 11,17 \approx 11,2$. Это значение может быть уточнено. В соответствии с представлениями Прандтля, в критической точке турбулентного режима течения жидкости при переходе его в область квадратичного закона сопротивления шероховатых русел (область автомодельного режима течения жидкости) пристеночный подслой имеет толщину δ_* , в два раза меньшую, чем эквивалентная шероховатость Δ , вычисленная по формуле (35) при известном значении λ_{KT} .

В этом случае формула (26) с учетом $v_{*KT} = v_{*KT} \sqrt{\frac{\lambda_{KT}}{8}}$ примет вид

$$v_{*KT} = \frac{N\nu}{\delta_{KT}} = \frac{2N\nu}{\Delta} = v_{KT} \sqrt{\frac{\lambda_{KT}}{8}}, \quad (37)$$

откуда

$$\lambda_{KT} = 32 \left(\frac{N\nu}{v_{KT} \Delta} \right)^2 = 32 \left(\frac{N}{Re_{\Delta KT}} \right)^2, \quad (38)$$

где $Re_{\Delta KT} = v_{KT}\Delta/\nu$ – критическая величина модифицированного критерия Рейнольдса в точке перехода в область квадратичного закона сопротивления, в котором в качестве линейного размера принята эквивалентная шероховатость Δ (м).

Для критической точки нами была предложена формула [2]

$$\lambda_{KT} = \left(\frac{64}{Re_{\Delta KT}} \right)^2. \quad (39)$$

На основании (34) и (35) может быть определено точное значение числа Никурадзе N

$$32 \left(\frac{N}{Re_{\Delta KT}} \right)^2 = \left(\frac{64}{Re_{\Delta KT}} \right)^2, \quad (40)$$

$$N = \frac{64}{\sqrt{32}} = 11,314.$$

Формулы Прандтля (31) и (33) для турбулентного движения жидкости в гидравлически гладких трубах будут соответствовать друг другу при расстоянии y_{cp} от стенки трубы до слоя, где осредненная местная скорость $\bar{u}_{y_{cp}}$ равна средней скорости потока v , равном $y_{cp} = 0,240r_0$.

Для этого значения, подставляя в формулу (31) $v_* = v\sqrt{\frac{\lambda}{8}}$ и $y_{cp} = 0,240r_0$, получаем:

$$\frac{v}{v\sqrt{\frac{\lambda}{8}}} = 5,75 \lg \frac{v_* y_{cp}}{v} + 5,5 = 5,75 \lg \frac{v 2r_0}{v} \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \frac{0,240}{2} + 5,5. \quad (41)$$

Откуда, учитывая, что $Re = v 2r_0/\nu$, получаем формулу (33)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \left(\lg(Re\sqrt{\lambda}) + \lg \frac{0,240}{2\sqrt{8}} \right) + 1,945 = 2 \lg(Re\sqrt{\lambda}) - 0,8.$$

Альтшуль А.Д. предлагал для этого случая значение $y_{cp} = 0,223r_0$, что не позволяло получить соответствия между формулами (31) и (33).

Для ламинарного движения жидкости в напорном осесимметричном канале расстояние y_{cp} от стенки канала до слоя, где местная скорость u_r равна средней скорости потока v , можно определить из параболического закона распределения местных скоростей Стокса

$$u_r = 2v \left[1 - \left(\frac{r_0 - y}{r_0} \right)^2 \right] \quad (\text{м/с}). \quad (42)$$

При $u_r = v$ и $y_{cp} = xr_0$ получаем:

$$u_r = 2v \left[1 - \left(\frac{r_0 - r_0 x}{r_0} \right)^2 \right] = 2v \left[1 - (1-x)^2 \right] = v \quad (\text{м/с}), \quad (43)$$

тогда $1 - (1-x)^2 = 0,5$,
 $(1-x)^2 = 1 - 0,5 = 0,5$,
 $x = 0,293$, $y_{cp} = 0,293r_0$ (м).

По аналогии с ламинарным движением жидкости в осесимметричной напорной трубе допущение о линейном характере распределения касательных напряжений τ_r по сечению трубы в турбулентном потоке жидкости также приводит к выводу о линейной

зависимости градиента скорости G_r и о квадратичном законе распределения осредненной местной скорости потока \bar{u}_r по текущему радиусу, который может быть описан формулой, полученной нами [2]:

$$\bar{u}_r = 2v \left[\beta - (2\beta - 1) \frac{r^2}{r_0^2} \right] \quad (\text{м/с}), \quad (44)$$

откуда при $y_{cp} = xr_0$ имеем

$$v = 2v \left[\beta - (2\beta - 1) \left(\frac{r_0 - xr_0}{r_0} \right)^2 \right] \quad (\text{м/с}), \quad (45)$$

тогда $\beta - (2\beta - 1)(1 - x)^2 = 0,5$,

$$(1 - x)^2 = \frac{\beta - 0,5}{2\beta - 1} = \frac{\beta - 0,5}{2(\beta - 0,5)} = 0,5,$$

$x = 0,293$, $y_{cp} = 0,293r_0$ (м).

Таким образом, положение о равенстве местной скорости потока u_r средней скорости v в напорной трубе, имеющей радиус r_0 , на расстоянии $y_{cp} = 0,293r_0$ от стенки трубы имеет универсальный характер и справедливо как для ламинарного, так и для турбулентного режима движения жидкости.

Подставляя $Re = v2r_0/\nu$ в формулу (33) для расчета гидравлически гладких труб, ее можно представить в виде:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} \frac{v \sqrt{8}}{v \sqrt{8}} = 2 \lg \left(\frac{v2r_0}{v} \sqrt{\lambda} \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{8}} \frac{0,293}{0,293} \right) - 0,8, \quad (46)$$

откуда, учитывая, что $v_* = v \sqrt{\frac{\lambda}{8}}$ и $y_{cp} = 0,293r_0$, получим

$$\frac{v}{v_*} = 5,7 \left(\lg \frac{v_* y_{cp}}{v} + \lg \frac{2\sqrt{8}}{0,293} \right) - 2,263 = 5,7 \lg \frac{v_* y_{cp}}{v} + 5,1. \quad (47)$$

При использовании скорости \bar{u}_r вместо скорости v и натурального логарифма \ln вместо десятичного логарифма \lg из формулы (47) получаем формулу (36), предложенную Ландау:

$$\frac{\bar{u}_r}{v_*} = \frac{5,7}{2,303} \ln \frac{v_* y}{v} + 5,1 = \frac{1}{0,4} \ln \frac{v_* y}{v} + 5,1 = 2,5 \ln \frac{v_* y}{v} + 5,1.$$

Подобным образом формулу (34) для вполне шероховатых труб можно представить в виде

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} \frac{v \sqrt{8}}{v \sqrt{8}} = 2 \lg \frac{2r_0}{\Delta} \frac{0,293}{0,293} + 1,14 \quad (48)$$

и получить

$$\frac{v}{v_*} = 5,7 \left(\lg \frac{y_{cp}}{\Delta} + \lg \frac{2}{0,293} \right) + 3,224 = 5,7 \lg \frac{y_{cp}}{\Delta} + 7,98. \quad (49)$$

При использовании скорости \bar{u}_r вместо скорости v и натурального логарифма \ln вместо десятичного логарифма \lg формулу (49) можно привести к виду

$$\frac{\bar{u}_r}{v_*} = \frac{5,7}{2,303} \ln \frac{y}{\Delta} + 7,98 = \frac{1}{0,4} \ln \frac{y}{\Delta} + 7,98 = 2,5 \ln \frac{y}{\Delta} + 7,98. \quad (50)$$

Предложенная Ландау формула (36) может быть использована для расчета профиля осредненных местных скоростей в поперечных сечениях напорных трубопроводов, работающих в режиме гидравлически гладких русел.

Полученная нами уточненная формула (50) может быть использована для расчета профиля осредненных местных скоростей в поперечных сечениях напорных трубопроводов, работающих в режиме вполне шероховатых русел.

Список литературы

1. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика /Л. Прандтль. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.
2. Андреев, С.Ю. Гидродинамические закономерности перехода режима течения жидкости в трубчатом смесительном устройстве в область развитой турбулентности / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, М.И. Яхкин // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 3. – С. 161–171.
3. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2006. – 736 с.

References

1. Prandtl, L Hydroaeromechanics / L. Prandtl. – Izhevsk: NITS «Regular and chaotic dynamics», 2000. – 576 p.
2. Andreev, S.Yu. Hydrodynamic regularities of the transition of the fluid flow regime in a tubular device in the region of developed turbulence / S.Yu. Andreev, I.A. Garkina, M.I. Yakhkind // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 3. – P. 161–171.
3. Landau, L.D. Theoretical physics. Hydrodynamic / L.D. Landau, E.M. Lifshitz. – M.: Fizmatlit, 2006. – 736 p.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 711.523 – 042.2

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

Петрянина Любовь Николаевна,
доцент кафедры «Городское строительство
и архитектура»
E-mail: gsia@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Petryanina Lyubov Nikolaevna,
Associate Professor of the department «Urban
construction and Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

КОНЦЕПЦИЯ ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ И РЕАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ЦЕНТРА ГОРОДА: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Л.Н. Петрянина

Выполнен сравнительный анализ реального преобразования городского центра и проектных разработок с учётом научно-технического развития, расположения центробразующих общественных объектов, мобильности населения, роста территории города, увеличения численности населения, сложившейся городской среды и природно-ландшафтных особенностей города. Предложены мероприятия, позволяющие привести в соответствие творческий процесс архитектурного проектирования с реальным развитием центров городов, в том числе с использованием современных количественных методов и математического моделирования. Показана целесообразность комплексного освоения резервных территорий в центральной части города.

Ключевые слова: городской центр, развитие, архитектурное проектирование, системность учёта изменений, мобильность населения, резервные территории, центробразующие учреждения

THE CONCEPT BEHIND THE DESIGN DECISIONS AND THE REAL CITY CENTRE DEVELOPMENT: COMPARATIVE ANALYSIS

L.N. Petryanina

A comparative analysis of the real transformation of the city center and design development, taking into account the scientific and technical development, the location of the center of public objects, the mobility of the population, the growth of the city, the increase in population, the current urban environment and natural landscape features of the city is carried out. The proposed measures allow to bring the creative process of architectural design in line with the real development of urban centers, including the use of modern quantitative methods and mathematical modeling. The expediency of complex development of reserve territories in the central part of the city is shown.

Key words: city, development, architectural design, system changes, population mobility, reserve areas core companies

Преобразование города – процесс постоянный, требующий анализа существующего положения его центра и направлений развития с учётом социальных и экономических предпосылок. Проектные предложения, выполняемые на перспективу, ведут к разрыву между планированием и действительным развитием города.

Данное обстоятельство стало причиной рассмотрения аналитической и расчётной частей проектных разработок, представленных в свободном доступе, для некоторых российских городов с целью определения полноты учёта существующих изменений центральной части города, а также выявления соответствия проектируемого и реального городских центров.

Процесс реального преобразования городского центра представляет собой совокупность развития социальных, технико-экономических и культурных факторов города в целом. Причём формы и приёмы застройки неоднозначны и зависят от градостроительной политики, архитектурно-планировочных приёмов и капиталовложений. Преобразование города всегда связано с общественным процессом, а архитектурная мода и сами сооружения – результат социального заказа.

Поскольку развитие центра города зависит от масштаба строительства, действующих градостроительных норм и материальных возможностей, то было проведено сравнение проектов и реального положения.

В данном случае, рассматривая центр города, имелась в виду наиболее функционально развитая, исторически сложившаяся его часть, занимающая господствующее положение. Функциональное развитие определяло строительство новых, реконструкцию и модернизацию существующих объектов. Поэтому в рассмотренных проектных предложениях предусматриваются функциональные изменения, а также закладываются средства и состав сооружений.

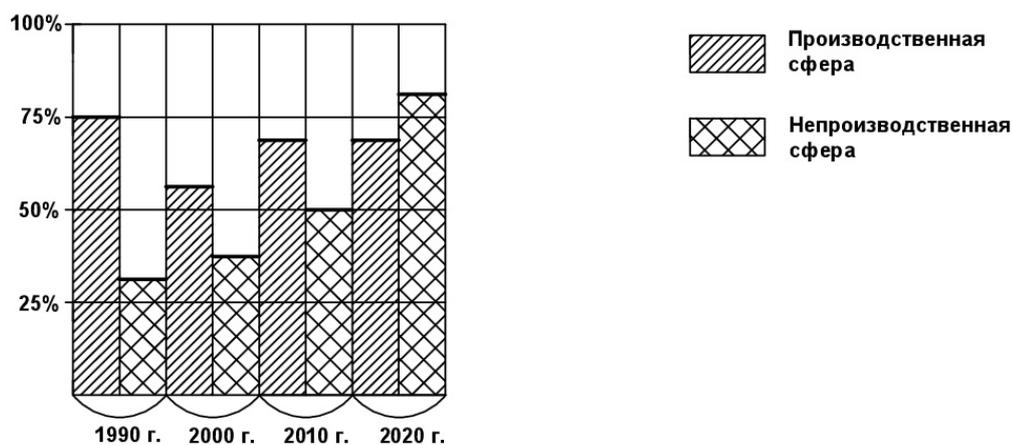
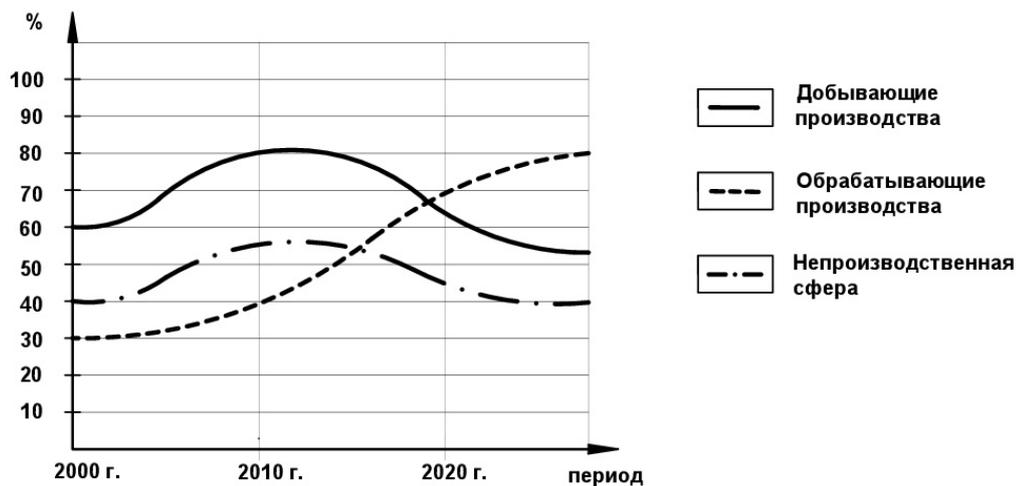
В процессе исследования были определены факторы, существенно влияющие на развитие городского центра, – это мобильность населения и научно-техническое развитие. И хотя, по данным некоторых прогнозов, роль городских центров с учётом научно-технического развития могла бы уменьшиться, в действительности же эти предположения не оправдались. Наоборот, функциональное развитие центров возрастает.

Так, проведение свободного времени зафиксировано по месту проживания или в различных учреждениях центра. Такой вывод сделан на основании развития строительства и реконструкции различных учреждений центра. При этом было отмечено следующее:

- развитие средств связи и автоматизация сделало возможным отдаление управляемых объектов, а центры управления размещаются в центре города;
- для учреждений сферы управления необходим большой объём информации, для чего необходимы информационные центры;
- местом размещения новых учреждений становится центр города;
- научно-исследовательские учреждения, проектные организации и т.п. размещаются в центральной зоне;
- с увеличением потока информации и доставки её до потребителя расширяется сеть учреждений, сопровождающих этот процесс.

Следствием научно-технического развития стало увеличение свободного времени городского населения, которое дополняется уровнем образования и культуры. Это активизирует жизнедеятельность центров. А поиск учреждений с высоким уровнем обслуживания и туризм увеличивают нагрузку на все объекты, расположенные в центре. Увеличилась численность работающих в государственных учреждениях и деловых центрах.

Суммарное число работающих в центральной части городов составляет примерно 57–67 %. Выводы социологических и градостроительных исследований свидетельствуют о долговременном и устойчивом характере этого процесса, связанного с увеличением работающих в сфере управления и обслуживания. Структура занятости городского населения приведена на рисунке.



Структура занятости городского населения в различных сферах

Численность работающих в городских центрах возрастает также и за счёт размещения проектных и научных организаций, учреждений культуры и обслуживания. Такая тенденция просматривалась во всех представленных проектных решениях, независимо от пространственной организации центральной части города.

Очевидно, что авторы рассмотренных проектов увеличивают удельный вес городских центров в сфере обслуживания. Это подтверждают статистические данные, взятые из технико-экономических обоснований: в новых учреждениях культуры для городов Пенза, Тамбов, Ульяновск, Самара отмечено значительное увеличение зрительских мест. Такое направление в проектах, как показало время, верно. Так, в Пензе за последние 8 лет построен драматический театр на 800 мест, филармония на 750 мест и киноконцертный зал на 1200 мест. Подобные данные можно привести и по другим городам.

Однако недостаточно прогнозировать строительство в городах центробразующих объектов. Необходимо закладывать в проектах их рациональное размещение в структуре города. Как показали данные проектных решений, размещение почти всех значимых объектов преобладает в центральном районе города независимо от его пространственной организации, что является следствием влияния объективных факторов на проектирование центров городов.

В ходе исследований установлено, что предпочтение отдаётся близкому пространственному расположению относительно друг друга административных учреждений и деловых центров. Это объясняется, во-первых, удобством, а во-вторых – престижностью размещения на участках центральной части города. При этом на небольших по

площади участках нередко размещаются не только одинаковые, но и разные по функциональному назначению объекты. Такое сконцентрированное размещение выгодно с точки зрения рационального использования территории городских центров. В изученных проектах такое решение нашло применение в расположении групп административных зданий на центральных площадях, строительстве деловых и торговых центров, устройстве пешеходных зон.

При дальнейшем увеличении рабочих мест и посетителей будут увеличиваться и потоки, направленные в центр города. Такое явление связано с увеличением мобильности населения. С увеличением автомобилизации и совершенствованием общественного транспорта центр города стал доступнее для большого количества людей, готовых передвигаться на десятки километров в поисках необходимых услуг. Это сделало возможным расширение сети определённых учреждений в центральной части города. По статистическим данным, культурно-бытовые и торговые учреждения в центральной части города посещают 50–65 % приезжающих из пригородов людей.

Хотя связанная с мобильностью населения притягательность городских центров повышается, это явление не всегда оценивается положительно, т.к. мобильность может быть и вынужденной по причине дальнего расположения мест приложения труда, объектов обслуживания и жилья. В связи с этим дальние поездки не всегда желаемы и удобны. Поэтому используемый в некоторых из рассмотренных проектов приём сосредоточения специализированных учреждений в центральной части города ошибочен. Актуальным стало решение задачи уменьшения передвижения населения на дальние расстояния и увеличения взаимосвязи учреждений обслуживания по месту работы или жительства. В настоящее время делается акцент на увеличение числа поездок.

В рассмотренных проектах нет ограничений мобильности населения. Авторами проектов наоборот предлагается пополнение центра города притягательными объектами за счёт расширения границ. Таким образом, предполагается продолжать увеличение количества поездок теперь и в самом центре из-за увеличения его размеров. Население будет продолжать ездить в центр, т.к. замены размещённым там учреждениям нет. Сосредоточение необходимых объектов имеет определённые пределы. Поэтому следует найти новое рациональное решение, которое для каждого города индивидуально.

В рассмотренных проектах были проанализированы градостроительные причины изменчивости центров городов, к которым относятся рост территорий городов и увеличение численности населения.

Темп роста городского населения характерен для большинства городов. Соблюдение нормативных требований приводит к увеличению общегородских объектов, изменению их качественного и количественного состава. В большинстве случаев в проектных решениях заложено развитие центра города, улучшение существующих учреждений.

За последние десятилетия характерно территориальное расширение городов и вместе с этим городских центров. Такой рост опережает расчётные сроки и в откорректированных генеральных планах закладывается увеличение центральных районов.

Подобные корректировки оказывают влияние на перспективное развитие городского центра при проектировании, т.к. предусматривается его расчётное увеличение. Однако реально центр города может расширяться не так быстро и не совсем в предполагаемом направлении. Из этого следует, что в проектах заложена неизбежность территориального расширения центров на долгосрочный период, без учета реальных сроков роста центрального района. Другого варианта на этот счёт не предусматривается.

Проектировщики при назначении новых границ городских центров руководствуются положениями Градостроительного кодекса и действующими нормами. То есть при расчётном росте населения соответственно механически увеличивается и проектное количество общественных объектов, расположенных в центре. Никакие другие обоснования, кроме композиционных, не учитываются.

Также при изучении предложенных проектов отмечено, что на реконструкцию и новое строительство центров городов влияет сложившаяся городская среда и природно-ландшафтные особенности города. Этими факторами определяются архитектура новых зданий, реконструкция или снос старой застройки, отвод участков под строительство, общий архитектурно-планировочный замысел преобразования городского центра.

Центры городов имеют свою историю формирования, поэтому их градостроительное развитие зависит от наличия и расположения памятников истории, культуры и архитектуры, морального и физического износа существующей застройки. Поскольку в границах центров городов сохранилось значительное количество ветхой малоценной застройки, то эта территория используется как некий внутренний резерв городского центра, предлагаемый во многих проектах. Однако вследствие многочисленных нарушений градостроительной дисциплины и отсутствия плановости капиталовложений освоение таких резервных территорий имеет лишь одиночные, далеко не всегда удачные примеры.

Обобщив лишь некоторые параметры архитектурного проектирования и реального развития городских центров, предлагается следующее:

1) использовать в процессе проектирования системный подход учёта вышеназванных причин, влияющих на изменение городских центров, в результате чего их реальное преобразование получит максимальное отражение в градостроительных проектах;

2) оптимизировать в процессе архитектурного проектирования планировочную структуру городского центра с учётом размещения функционально-притягательных объектов, т.к. отсутствуют ограничения, которые могли бы предотвратить вынужденную мобильность населения;

3) выполнять поиск компромиссного решения снижения вынужденной мобильности населения при большом разбросе центральных учреждений и во избежание их излишней концентрации с использованием современных количественных методов и математического моделирования;

4) избегать при проектировании механического увеличения территории центральной части города из-за предполагаемого роста городского населения в результате простого расчёта по требованиям действующих норм, т.к. это свидетельствует об излишнем упрощении градостроительного проектирования;

5) выполнять предварительный анализ возможных последствий расширения территории городского центра с учётом необходимых капиталовложений, трудовых и материальных ресурсов.

Таким образом, предлагаемые мероприятия позволят проектировщикам, строителям, экономистам, социологам, транспортникам и другим специалистам постепенно приводить в соответствие градостроительное проектирование с реальным развитием городских центров, комплексно осваивать резервные территории в центральной части города, планировать поэтапное освоение капиталовложений в крупные общественные объекты, комплексно решать архитектурно-композиционный образ центра города, значительно увеличить процент комфортности городской среды.

Список литературы

1. Петрянина, Л.Н. К вопросу о комплексном градостроительном проектировании / Л.Н. Петрянина // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. Шухова. – 2018. – №7. – С.57–64.
2. Данилов, А.М. Оценка оператором характеристик объекта в процессе нормального функционирования / А.М. Данилов // News of Science Education. – 2018. – №6. – Т. 5. – С.061–064.
3. Дерина, М.А. К вопросу о целесообразности и экономической обоснованности реконструкции жилых зданий старой застройки / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2017. – №5(12). – С.179–184.

4. Петрянина, Л.Н. Реконструкция жилых зданий опорного городского фонда как направление современного городского строительства / Л.Н. Петрянина // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3(32). – С.172–176.

5. Петрянина, Л.Н. Реконструкция городской среды: новая и сложившаяся застройка / Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина, П.В. Монастырёв // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №4(29). – С.83–86.

6. Петрянина, Л.Н. Учёт природно-климатических условий в архитектурном проектировании / Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина // Вестник ПГУАС: Строительство, наука, образование. – 2016. – №2(3). – С.41–48.

References

1. Petryanina, L.N. On the issue of integrated urban design / L.N. Petryanina // Bulletin of Belgorod state technological University. Shukhov. – 2018. – №7. – P. 57–64.

2. Danilov, A.M. Evaluation of the characteristics of the object by the operator in the process of normal functioning / A.M. Danilov // News of Science Education. – 2018. – №6. – Vol. 5. – P. 061-064.

3. Derina, M.A. To the question of expediency and economic feasibility of reconstruction of residential buildings of old buildings / M.A. Derina, L.N. Petryanina // Education and science in the modern world. Innovations. – 2017. – №5 (12). – P. 179–184.

4. Petryanina, L.N. Reconstruction of residential buildings of the reference city fund as a direction of modern urban construction / L.N. Petryanina // Regional architecture and engineering. – 2017. – №3 (32). – P. 172–176.

5. Petryanina, L.N. Reconstruction of urban environment: new and existing buildings / L.N. Petryanina, M.A. Derina, P.V. Monastirev // Regional architecture and engineering. – 2018. – №4 (29). – P. 83–86.

6. Petryanina, L.N. Records of climatic conditions in architectural design / L.N. Petryanina, M. A. Derin // Bulletin of PGUAS: Construction, science, education. – 2016. – №2 (3). – P. 41–48.

УДК 004.7

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

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

Васин Леонид Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Информационно-
вычислительные системы»
E-mail: leo@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Vasin Leonid Anatolievich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the department «Information-
computing systems»
E-mail: leo@pguas.ru

ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ИЗУЧЕНИИ СЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ CISCO

Л.А. Васин

Рассматривается организация образовательного процесса в электронной информационной образовательной среде (ЭИОС) строительного университета для всех категорий обучающихся при изучении сетевых технологий. Показаны особенности использования аппаратного и программного обеспечения (маршрутизаторы, межсетевые экраны, коммутаторы), порядка управления сетевым трафиком. Определены аппаратные сетевые средства, используемые в процессе управления сетевым трафиком. Обозначены этапы изучения сетевых технологий на примере организации интернет-доступа.

Представлен вариант применения сетевых технологий Cisco в образовательном процессе при изучении вопросов функционирования компьютерных сетей, информационной безопасности и администрирования процесса инфокоммуникационных технологий.

Ключевые слова: строительство, подготовка кадров, образовательный процесс, электронная образовательная среда, интернет-доступ, сетевое оборудование, администрирование

APPROACH TO THE ORGANIZATION OF THE EDUCATIONAL PROCESS IN THE STUDY OF NETWORK TECHNOLOGIES IN ARCHITECTURAL AND CIVIL ENGINEERING UNIVERSITY WITH THE USE OF CISCO EQUIPMENT

L.A. Vasin

The organization of the educational process in the electronic information educational environment (EIOS) of the civil engineering university for all categories of students in studying network technologies is considered. The use of hardware and software (routers, firewalls, switches) is shown. The use of software and the procedure for managing network traffic are shown. Hardware is defined to provide high-quality Internet access. The stages of the study of network technologies on the example of Internet access organization are formulated.

The use of Cisco equipment to provide Internet access to ensure the functioning, as well as network administration issues is considered. The option of using Cisco network technologies for use in the educational process involving issues of the functioning of a computer network, information security and administration of the process of information and communication technologies is shown.

Keywords: civil engineering, training, educational process, electronic educational environment, Internet access, network equipment, administration

Введение

Подготовка специалистов по информационным технологиям в строительной отрасли тесно связана с владениями компетенциями в области телекоммуникационных технологий. Они должны уметь выполнять работы, связанные с реализацией проектов построения информационных систем различной степени сложности в организациях строительного профиля, а также обладать знаниями специфики их работы и применять их в строительной области.

Современные образовательные организации должны обладать электронной информационной средой, которая позволяет проводить контроль уровня знаний, а также организовывать использование дистанционных образовательных технологий. Её функционирование непосредственно связано с качеством коммуникационной среды, обеспечивающей информационное взаимодействие между участниками образовательного процесса и компьютерной сетью Интернет. Она состоит из совокупности телекоммуникационных и информационных сервисных служб, а также среды передачи данных. Телекоммуникационные средства обеспечивают прохождение внешнего и внутреннего сетевого трафика ЭИОС. Для управления им используются различные сетевые аппаратные и программные средства, такие, как маршрутизаторы, коммутаторы, серверы доступа, реализованные на сетевых серверных операционных системах семейства Unix или Windows.

Построение современной среды передачи данных ЭИОС возможно при использовании многоуровневой модели коммутации и обеспечении маршрутизацией данных во внешние сети, что реализуется на основе управляемого сетевого оборудования различных производителей, например CISCO, 3COM, DELL, HP, DLINK.

Современная ЭИОС подразумевает возможность организации доступа к ее ресурсам как из локальной сети университета, так и извне, из сети Интернет. Это позволяет организовать синхронное и асинхронное взаимодействие между участниками образовательного процесса, использовать образовательный контент и ресурсы электронной среды. Для этого необходимо обеспечить настройку сетевого оборудования для внешнего доступа к информационным ресурсам среды, таким, как Internet-портал, электронные курсы, места хранения данных, средства коммуникаций. Используются аппаратные или программные средства, такие, как маршрутизаторы CISCO, DLINK, ZyHEL или серверы доступа, реализованные на сетевых операционных системах Linux или FreeBSD.

Основными функциональными обязанностями специалистов в области информационных технологий, ориентированных на работу в строительной сфере, является администрирование информационных систем, что подразумевает организацию и поддержание работоспособности систем телекоммуникаций. Поэтому они должны обладать знаниями компьютерных сетевых технологий и администрирования. Нарботку навыков администрирования сетевого оборудования необходимо осуществлять как на программных эмуляторах, так и на реальном оборудовании; тем самым обучающийся будет изучать процесс администрирования физического оборудования.

Основная часть

Компьютерная сеть университета реализуется на принципах управляемости, с применением сетевого оборудования DLINK и CISCO. Управляемость сети позволяет изменять ее конфигурацию, добавлять необходимые подсети, модифицировать адресное пространство, а также обеспечивает предотвращение сетевых коллизий и высокую отказоустойчивость компьютерной сети университета в целом. Для этого используется технология виртуальных сетей VLAN. Ее применение позволяет создавать изолированные подсети на L2 уровне сетевых пакетов. Такая технология может быть использована только при применении управляемых L2 и L3 коммутаторов. На её основе реализуются все уровни коммутационной модели: ядра, распределения и доступа. Так, изучение способов построения управляемых сетей на основе технологии VLAN является обязательным этапом обучения. Этот процесс происходит при использовании физического оборудования (коммутаторов). Первый этап обучения реализуется с

помощью оборудования DLINK, второй этап – CISCO. Это связано с более сложной для восприятия работой в командной строке операционной системы CISCO IOS. Выбор оборудования обусловлен его наибольшим распространением в информационных системах, тем самым студенты получают практический навык администрирования наиболее используемого оборудования.

Для организация доступа в Интернет в университете используются маршрутизаторы CISCO 2911 и CISCO 4331. Их применение позволяет реализовать качественный доступ пользователей ЭИОС к компьютерной сети Интернет, а также обеспечить обратную работу внешних пользователей с информационными сервисами.

Настройку маршрутизирующего оборудования начинают с сетевых интерфейсов. В оборудовании Cisco различают сетевые интерфейсы с поддержкой L3 и L2 уровнем сетевой модели. Основное их различие заключается в возможности назначения IP адреса и обработки сетевого трафика. Назначение адресов сетевых интерфейсов происходит на основании сетевого планирования компьютерной сети, которое проводится на этапе её проектирования; при этом происходит также и распределение адресного пространства.

На следующем этапе базовой настройки маршрутизаторов необходимо обеспечить контроль доступа для различных сетевых устройств, входящих в состав компьютерной сети: серверы, компьютеры пользователей, сетевые принтеры, средства организации потокового видео, точки беспроводного доступа и т. д. Для этого в операционной системе IOS, функционирующей на сетевом оборудовании CISCO, используются списки доступа – ACL (Access Control List). В них указываются сетевые параметры (адреса, протоколы, тип пакета, номер порта прикладного протокола) и выполняемое действие (запретить или разрешить). Таким образом, реализуется возможность создания системы контроля за сетевым трафиком, как исходящим, так и входящим в локальную компьютерную сеть университета. Система списков доступа реализуется не только на маршрутизирующем оборудовании CISCO, но также и на управляемых коммутаторах.

Изучение данной технологии является необходимым в плане подготовки специалистов в области телекоммуникационных технологий. Первоначальное ознакомление с правилами создания списков доступа целесообразно начинать в программном эмуляторе, например CISCO Packet Tracer. При этом ошибки, возникающие при создании конфигураций списков доступа, не могут привести к нарушениям в работе с физическим сетевым оборудованием, которое используется при обучении. Работу с ним необходимо начинать при наличии устойчивых навыков администрирования ACL в программном эмуляторе. На рис. 1 показан пример списков доступа, работающих на маршрутизаторе CISCO 2911.

Для обеспечения прохождения внутреннего сетевого трафика за пределами локальной компьютерной сети используется технология NAT. Она обеспечивает трансляцию внутренних сетевых адресов в реальные и наоборот. Это позволяет обеспечить отображение адресного пространства локальной сети на реальный внешний IP адрес и выполнить обратное преобразование в локальные адреса по NAT-таблицам. Кроме этого, трансляция адресов используется для отображения сетевых информационных сервисов, таких, как интернет-сайт, электронная почта, FTP-сервер, облачное хранилище и т.д. В данном случае происходит трансляция пакетов, приходящих на соответствующий порт TCP внешнего сетевого интерфейса с дальнейшей передачей на внутренний порт маршрутизатора, к которым подключены локальные сервера. На рис. 2 показаны правила для NAT, работающие на маршрутизаторе Cisco 2911.

При обучении данной технологии необходимо использовать программные эмуляторы, позволяющие формировать компьютерную сеть, состоящую из множества сетевых адресов, и имитировать наличие реальных и локальных сетевых адресов. В процессе обучения происходит формирование компетенций при настройке NAT как одной из базовых технологий, используемых для организации внешнего доступа.

```

ip access-list extended DmzNet
 permit tcp object-group servers-dmz any
 permit ip object-group servers-dmz any
ip access-list extended IntNet
 permit ip any object-group host-WAN
 permit object-group ports-ftp any object-group host-WAN
 permit object-group ports-mail any object-group host-WAN
 permit object-group ports-web any object-group host-WAN
 permit object-group ports-vipnet object-group servers-vipnet any
ip access-list extended LocalNet
 permit tcp object-group servers-local any
 permit ip object-group servers-local any
 permit udp object-group servers-local any
 permit tcp object-group access-admin any
 permit ip object-group access-admin any
 permit udp object-group access-admin any
 permit tcp object-group access-buch any
 permit ip object-group access-buch any
 permit udp object-group access-buch any
 permit tcp object-group access-defence any
 permit udp object-group access-defence any
 permit ip object-group access-defence any
 permit tcp object-group access-videoconf any
 permit ip object-group access-videoconf any
 permit udp object-group access-videoconf any
 permit object-group ports-web 192.0.0.0 0.255.255.255 any
 permit object-group ports-mail 192.0.0.0 0.255.255.255 any
 permit object-group ports-ftp 192.0.0.0 0.255.255.255 any
 permit udp 192.0.0.0 0.255.255.255 object-group dns-server eq domain
 permit object-group ports-ssl-mail 0.0.0.0 255.0.0.0 any
 permit object-group ports-vipnet object-group host-vipnet any
ip access-list extended VipNet
 permit object-group ports-vipnet object-group servers-vipnet any

```

Рис. 1. Списки контроля доступа, используемые на пограничном маршрутизаторе

```

ip nat source list DmzNet interface GigabitEthernet0/0 overload
ip nat source list LocalNet interface GigabitEthernet0/0 overload
ip nat source static tcp 192.168.5.101 25 interface GigabitEthernet0/0 25
ip nat source static tcp 192.168.5.4 80 interface GigabitEthernet0/0 80
ip nat source static tcp 192.168.2.2 55777 interface GigabitEthernet0/0 55777
ip nat source static udp 192.168.2.2 55777 interface GigabitEthernet0/0 55777
ip nat source list VipNet interface GigabitEthernet0/0 overload
ip nat source static tcp 192.168.5.119 21 interface GigabitEthernet0/0 21
ip nat source static tcp 192.168.5.4 443 interface GigabitEthernet0/0 443
ip route 0.0.0.0 0.0.0.0 85.234.37.1
ip route 192.0.0.0 255.0.0.0 192.168.1.1

```

Рис. 2. Правила сетевой трансляции адресов (NAT)

Для обеспечения управления сетевыми пакетами между различными сетями проводится настройка системы маршрутизации. Понимание её функционирования и умение проводить её настройку является обязательным при подготовке специалистов по администрированию информационных систем.

Системы маршрутизации необходимо изучать, начиная от простых схем маршрутизации со статическим маршрутом во внешние сети, постепенно усложняя задачу путем добавления дополнительных маршрутизаторов, моделирования протоколов динамической маршрутизации BGP, OSPF, RIP.

При организации процесса обучения можно использовать также программный эмулятор Cisco Packet Tracer. Это обусловлено необходимостью моделирования процессов маршрутизации программными образами физического оборудования (коммутаторами, маршрутизаторами), которыми невозможно оснастить лабораторию в университете.

При организации сетевого доступа из локальной сети часто применяется технология кеширующих прокси-серверов. На рис. 3 показано включение в компьютерную сеть университета прокси-сервера.

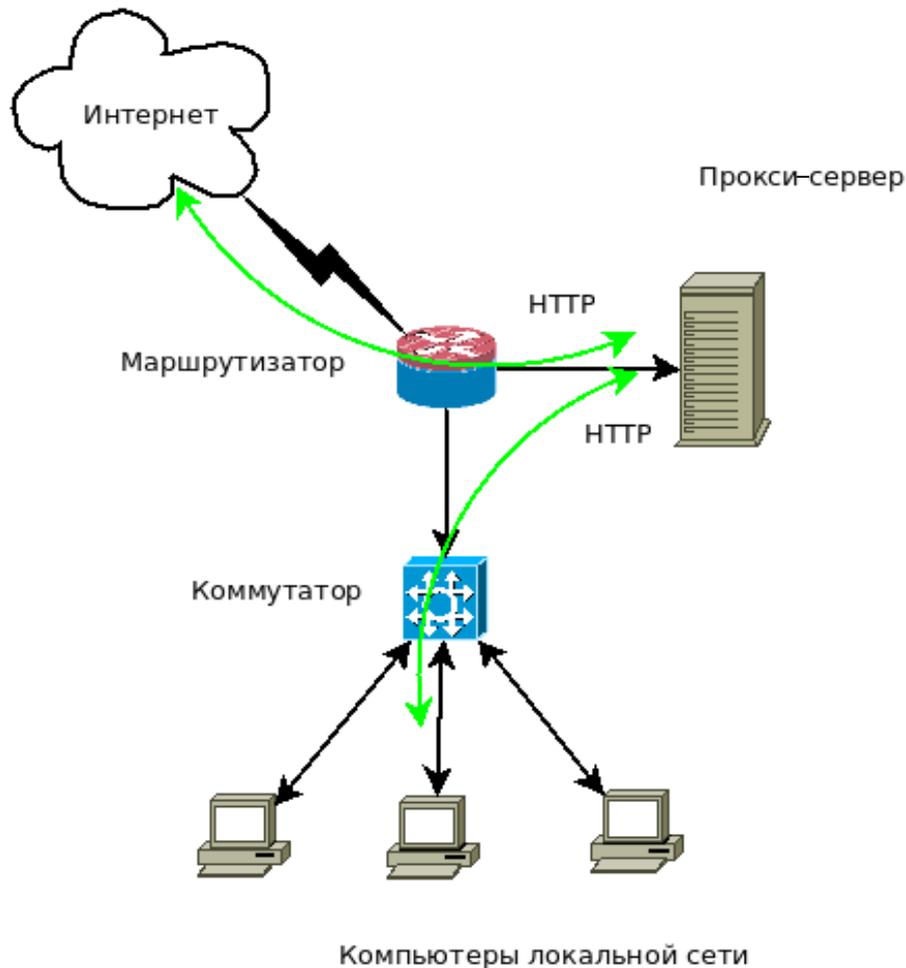


Рис. 3. Включение прокси-сервера в состав локальной компьютерной сети

Такая технология позволяет оптимизировать сетевой трафик, проходящий через маршрутизирующие устройства, путем его кеширования, тем самым обеспечить снижение нагрузки на них. Кроме этого, прокси-сервер позволяет проводить анализ сетевых пакетов пользователей, фильтрацию по контенту, осуществлять подсчет сетевого трафика, а также выступает в роли сервера доступа использующих сетевые аккаунты пользователей.

В качестве основного программного обеспечения, используемого при развертывании серверов различного назначения, например почтового, файлового, прокси, Web, целесообразно ориентироваться на отечественные операционные системы, такие, как ALT Linux, ASTRA Linux, POCA. Они основаны на ядре ОС Linux с различной пакетной базой и имеют в своем составе необходимый набор программных пакетов, позволяющих использовать такие ОС в различных информационных системах. Данные ОС обладают достаточной надежностью и безопасностью, которая подтверждена необходимыми документами, и могут быть использованы при создании защищенных информационных систем для обработки персональных данных.

При проведении лабораторных работ по изучению администрирования сетевого оборудования необходимо использовать такие ОС в качестве основных ОС при развертывании серверов доступа. Поэтому последним этапом изучения сетевых технологий по организации доступа в Интернет из информационных систем, в частности универ-

ситета, является практическое развертывание прокси сервера с последующей интеграцией сетевого оборудования.

Выводы:

1. Разработана методика организации образовательного процесса по изучению сетевых технологий.
2. Представлена поэтапная организация образовательного процесса сетевой лаборатории на примере организации доступа к сети Интернет.
3. Показана работа со списками контроля доступа при организации сетевого доступа.
4. Определены дистрибутивы операционных систем, рекомендованных для использования при организации изучения сетевых технологий.

Список литературы

1. Хьюкаби, Д. Маршрутизаторы Cisco. Руководство по конфигурированию / Д. Хьюкаби, С. Мак-Квери, Э. Уатакер. – М.: Вильямс, 2012. – 736 с.
2. Кофлер, М. Linux. Установка, настройка и администрирование / М. Кофлер, О. Сивченко. – СПб.: Питер, 2014. – 768 с.

References

1. Hukabi, D. Cisco routers. Configuration Guide / D. Hukabi, S. Mac-Query, E. Uataker. – М.: Williams, 2012. – 736 p.
2. Kofler, M. Linux. Installation, configuration and administration / M. Kofler, O. Sivchenko. – SPb.: Peter, 2014. – 768 p.