

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 27.11.2019.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд. л. 29,125. Тираж 500 экз. Первый завод 100.
Заказ № 366.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО 4(41)/2019

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 5

Логанина В.И., Сергеева К.А.
ОЦЕНКА АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫХ
СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
КОНСТРУКЦИЙ..... 5

Макридин Н.И., Максимова И.Н., Коннов Е.Д.
О КОЭФФИЦИЕНТАХ ПОПЕРЕЧНОЙ
ДЕФОРМАЦИИ И ОБЪЕМНОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОГО
КЕРАМЗИТОБЕТОНА НА ДИАГРАММЕ
СЖАТИЯ 11

**Черкасов В.Д., Авдонин В.В.,
Юркин Ю.В., Пильщиков В.О.**
САМОКЛЕЯЩИЕСЯ РАДИАЦИОННО-
ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ 20

**Черкасов В.Д., Бузулуков В.И.,
Емельянов А.И., Хазеев Х.И., Кротова В.С.**
РАЗРАБОТКА ПЕНОБЕТОНОВ НА ОСНОВЕ
ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗ ПРОДУКТОВ
МИКРОБНОГО СИНТЕЗА 27

Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.
МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ
ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ 34

Бондаренко С.Н., Гридчин А.М., Лебедев М.С.
ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ВВЕДЕНИЯ
ПОЛИМЕРНО-МИНЕРАЛЬНОЙ
КОМПОЗИЦИИ NISO FLOK
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТОБЕТОНА 42

Фомина Е.В., Лесовик В.С., Айзенштадт А.М.
СНИЖЕНИЕ АУТОГЕННОЙ УСАДКИ
КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТУФА 48

Саргсян А.Е., Гукова Е.Г.
ОЦЕНКА ЛОКАЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ
НА ПРОБИВАНИЕ ИЗ БЕТОНА РАЗЛИЧНЫХ
ТИПОВ ПРИ СОУДАРЕНИИ С САМОЛЕТОМ..... 56

Тараканов О.В., Белякова Е.А., Утюгова Е.С.
ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ КОМПЛЕКСНЫХ
ДОБАВОК НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И
МИКРОСТРУКТУРУ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ..... 68

© Авторы публикаций, 2019

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2019

© ПГУАС, 2019

Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.
ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ
СЛОЖНЫХ СИСТЕМ МОДУЛЬНОЙ
СТРУКТУРЫ..... 74

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ,
ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ 81

Гучкин И.С., Ласьков Н.Н.
УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ,
ПОЛУЧИВШИХ НЕДОПУСТИМЫЕ
ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ ПОЖАРЕ 81

Бакушев С.В.
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ
РАВНОВЕСИЯ ПЛОСКОЙ ОДНОМЕРНОЙ
ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ИДЕАЛЬНО
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ СПЛОШНОЙ
СРЕДЫ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ
СОСТОЯНИИ 88

Лаврова О.В.
МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОРОТКИХ БАЛОК,
УСИЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ КАРКАСНО-
СТЕРЖНЕВОЙ МОДЕЛИ 98

Вдовин В.М., Мартышкин Д.О.
КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЕ
НЕМАГНИТНОЕ СОЕДИНЕНИЕ
ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ..... 103

Жуков А.Н., Булавина Д.А., Абрашитов В.С.
УЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ
ОСОБЕННОСТЕЙ АРОЧНОГО АНГАРА
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ НЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ ЕГО ОБОЛОЧКИ 109

Селютина Л.Ф., Малащенко А.А.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ИНЖЕНЕРНО- ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
УСЛОВИЙ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ
ПАРАМЕТРЫ ФУНДАМЕНТОВ 115

Нежданов К.К., Гарькин И.Н.
ПОДКРАНОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ:
РЕЛЬСОВЫЙ БЛОК ИЗ АРОЧНЫХ
РЕЛЬСОВ..... 127

Герасимов В.П., Валиахметов Р.М.
УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОСКОЙ ФОРМЫ
ИЗГИБА ДЕРЕВЯННЫХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ РАСПОЛОЖЕНИЯ НАГРУЗКИ
ПО ВЫСОТЕ СЕЧЕНИЯ..... 131

Викторова О.Л., Виктор В.В.
МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВНЕЦЕНТРЕННО
НАГРУЖЕННЫХ СТОЛБЧАТЫХ
ФУНДАМЕНТОВ С ЧАСТИЧНЫМ
ОТРЫВОМ ПОДОШВЫ..... 136

Тюкленкова Е.П., Мейнгард С.И.
ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
КРЫМСКОГО МОСТА 145

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ..... 151

Ерёмкин А.И., Орлова Н.А.
ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ТЕКСТИЛЬНЫХ ВОЛОКОН С КОНДИ-
ЦИОНИРОВАННЫМ ВОЗДУХОМ 151

**Андреев С.Ю., Гарькина И.А.,
Князев А.А., Кузнецова А.О.**
ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЗАВИСИМОСТИ ВЕЛИЧИНЫ
УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ
МЕМБРАННОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА
ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ОБРАБАТЫВАЕМОГО
РАСТВОРА ГИДРОКСИДА НАТРИЯ
И ЕГО ТЕМПЕРАТУРЫ..... 161

Васин Л.А.
СОВРЕМЕННАЯ ПАРАДИГМА
УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМИ СЕТЯМИ:
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА
ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ ЖИЛОГО ДОМА.... 169

**Усачев А.П., Шурайц А.Л.,
Бирюков А.В., Пикалов А.А.**
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ПО ОПТИМИЗАЦИИ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НА
ФИЛЬТРУЮЩИХ КАРТРИДЖАХ ГРУБОЙ
И ТОНКОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВОГО
ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ФИЛЬТРА 177

**Усачев А.П., Шурайц А.Л.,
Бирюков А.В., Соловьев В.А.**
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ
И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПЛОСКИХ ФИЛЬ-
ТРУЮЩИХ КАРТРИДЖЕЙ ПРИРОДНОГО
ГАЗА, ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ
В ОДНОМ КОРПУСЕ ГАЗОВОГО
ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ФИЛЬТРА 183

**Осипова Н.Н., Гришин Б.М.,
Ежов Е.Г., Родионов Ю.В.**
ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОВОЗ-
ДУШНОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ БУТАНА
ДЛЯ ГАЗИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ..... 190

АРХИТЕКТУРА..... 197

Чикота С.И.
ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ
ТОРГОВЫХ ЦЕНТРОВ В КРУПНЫХ
РОССИЙСКИХ ГОРОДАХ 197

Хомяков А.И.
СИМВОЛЫ ЧТИМЫХ ПРОСТРАНСТВ... 203

Марьенкин А.В., Романова С.А., Родин А.И. АРХИТЕКТУРА ЦЕРКВИ В ЧЕСТЬ ИКОНЫ «ВСЕХ СКОРБЯЩИХ РАДОСТИ» В С. ЕНГАЛЫЧЕВО РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ 209	Береговой А.М. СВЕРХПЛОТНАЯ ГОРОДСКАЯ ЗАСТРОЙКА: ЭНЕРГО- И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ В ЗДАНИЯХ223
Герасимов В.П. ИЗ ОПЫТА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АРХИТЕКТУРНО-ПРОЕКТНОЙ МАСТЕРСКОЙ В СТРУКТУРЕ ВУЗА..... 216	Указатель статей, опубликованных в 2019 г..... 228

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS..... 5	Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Utyugova E.S. THE INFLUENCE OF COMPLEX ADDITIVES COMPONENTS ON PHASE COMPOSITION AND MICROSTRUCTURE OF CEMENT STONE.....68
Loganina V.I., Sergeeva K.A. ESTIMATION OF ANTI-ICING PROPERTIES OF METAL CONSTRUCTIONS COATINGS 5	Budylna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. COMPLEX SYSTEMS OF MODULAR STRUCTURE: QUALITY CONTROL PRINCIPLES74
Makridin N.I., Maksimova I.N., Konnov E.D. COEFFICIENTS OF TRANSVERSE DEFORMATION AND VOLUME DEFORMATION OF CONSTRUCTION CERAMZYTON CONCRETE ON COMPRESSION DIAGRAM..... 11	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS 81
Cherkasov V.D., Avdonin V.V., Yurkin Yu.V., Pil'shchikov V.O. ELASTIC RADIATION SHIELDING COVERINGS..... 20	Guchkin I.S., Laskov N.N. REINFORCEMENT OF REINFORCED CONCRETE HOLLOW FLOOR SLABS THAT HAVE RECEIVED UNACCEPTABLE DAMAGE AT FIRE.....81
Cherkasov V.D., Buzulukov V.I., Emelianov A.I., Hazeev H.I., Krotova V.S. DEVELOPMENT OF FOAM CONCRETE ON THE BASIS OF FOAM GENERATOR FROM MICROBIAL SYNTHESIS PRODUCTS 27	Bakushev S.V. DIFFERENTIAL EQUATIONS OF EQUILIBRIUM OF ONE-DIMENSIONAL PLANAR DEFORMATION FOR ELASTIC- PERFECTLY-PLASTIC CONTINUUM AT COMBINED STRESS STATE88
Budylna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF DESIGNING COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS..... 34	Lavrova O.V. STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE SHORT BEAMS STRENGTHENED ON THE BASIS OF FRAME-ROD MODELS98
Bondarenko S.N., Gridchin A.M., Lebedev M.S. INFLUENCE OF THE METHOD OF INTRODUCTION POLYMER-MINERAL COMPOSITION NICOFLOK ON THE CHARACTERISTICS OF SOIL-CONCRETE 42	Vdovin V.M., Martyshkin D.O. CORRSION-RESISTANT NON-MAGNETIC CONNECTION OF WOODEN STRUCTURE ELEMENTS 103
Fomina E.V., Lesovik V.S., Ayzenshtadt A.M. REDUCING OF AUTOGENIC SHRINKAGE IN TUFF-BEARING COMPOSITE BINDER.... 48	Zhukov A.N., Bulavina D.A., Abrashitov V.S. DESIGN FEATURES OF AN ARCHED HANGAR AT DETERMINING THE CARRYING CAPACITY OF ITS SHELL109
Sargsyan A.E., Gukova E.G. EVALUATION OF THE LOCAL STRENGTH OF REINFORCED SAFETY CONTAINMENT FROM DIFFERENT TYPES OF CONCRETE TO PENETRATION DUE TO AIRCRAFT CRASH 56	Selutina L.F., Malashenko A.A. STUDY OF ENGINEERING-GEOLOGICAL CONDITIONS INFLUENCE ON TECHNICAL PARAMETERS OF FOUNDATIONS 115

Nezdanov K.K., Garkin I.N. CRANE STRUCTURES: RAIL BLOCK FROM ARCH RAILS..... 127	Usachev A.P., Shuraitis A.L., Biryukov A.V., Pikalov A.A. DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL FOR OPTIMIZATION OF GAS- DYNAMIC LOSSES ON THE FILTER CARTRIDGE COARSE AND FINE GAS CLEANING OF TWO-STAGE FILTER 177
Gerasimov V.P., Valiakmetov R.M. STABILITY FLAT FORM BEND OF WOODEN CURVILINEAR ELEMENTS DEPENDING ON THE LOAD SITTING AT SECTION HEIGHT 131	Usachev A.P., Shuraitis A.L., Biryukov A.V., Soloviev V.A. DESIGN AND CALCULATION METHODS IMPROVING OF FLAT FILTER CARTRIDGE OF NATURAL GAS, CONNECTED IN PARALLEL IN A SINGLE PACKAGE OF TWO STAGE GAS FILTER..... 183
Viktorova O.L., Viktorov V.V. METHODS OF CALCULATION OF OFF-CENTER LOADED COLUMNAR FOUNDATIONS WITH PARTIAL SEPARATION OF SOLE..... 136	Osipova N.N., Grishin B.M., Ezhov E.G., Rodionov Yu.V. JUSTIFICATION OF THE APPLICATION OF GAS AIR MIXTURE BASED ON BUTANE FOR GASIFICATION OF OBJECTS190
Tyuklenkova E.P., Meyngard S.I. GEODETIC CONTROL OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF BUILDING STRUCTURES OF KRYMSKY BRIDGE ... 145	ARCHITECTURE 197
ENGINEERING SYSTEMS151	Chikota S.I. DESIGN DECISIONS OF SHOPPING CENTERS IN RUSSIAN CITIES..... 197
Eremkin A.I., Orlova N.A. EVALUATION OF INTERACTION OF TEXTILE FIBERS WITH CONDITIONED AIR..... 151	Khomyakov A.I. SYMBOLS OF ESTEEMED SPACES.....203
Andreev S.Yu., Garkina I.A., Knyazev A.A., Kuznetsova A.O. EXPERIMENTAL STUDIES OF DEPENDENCE OF THE VALUE OF SPECIFIC ELECTRIC CONDUCTIVITY OF THE ELECTROCHEMICAL CELL OF MEMBRANE ELECTROLYZER FROM CONCENTRATION OF PROCESSED SODIUM HYDROXIDE AND ITS TEMPERATURE. 161	Maryonkin A.V., Romanova S.A., Rodin A.I. ARCHITECTURE OF CHURCH IN HONOR OF ICON «JOY OF ALL WHO SORROW» IN ENGALYCHEVO, REPUBLIC OF MORDOVIA209
Vasin L.A. MODERN PARADIGM OF MANAGEMENT OF ENGINEERING NETWORKS: INTELLECTUAL SYSTEM OF THERMAL REGULATION OF A RESIDENTIAL HOUSE 169	Gerasimov V.P. ARCHITECTURAL AND DESIGN WORKSHOP IN THE STRUCTURE OF THE UNIVERSITY216
	Beregovoy A.M. SUPER DENSE CITY BUILDING: QUESTIONS OF ENERGY AND RESOURCE SAVINGS AND ECOLOGY IN BUILDINGS223

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

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

Сергеева Кристина Анатольевна,
кандидат технических наук,
ст.преподаватель кафедры «Физика
и химия»
E-mail: papsheva.ka@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

Sergeeva Kristina Anatolevna,
Candidate of Sciences, senior lecturer
of the department «Physics and Chemistry»
E-mail: papsheva.ka@gmail.com

ОЦЕНКА АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

В.И. Логанина, К.А. Сергеева

Приведены сведения о результатах оценки антиобледенительных свойств покрытий. Показано, что значение гистерезиса смачивания супергидрофобной поверхности на основе разработанного состава составляет 3,7 град. Определен критический угол скатывания капли воды с наклонной поверхности.

Ключевые слова: супергидрофобная поверхность, смачивание, антиобледенительные свойства, гистерезис смачивания

ESTIMATION OF ANTI-ICING PROPERTIES OF METAL CONSTRUCTIONS COATINGS

V.I. Loganina, K.A. Sergeeva

Information on the results of the evaluation of anti-icing properties of coatings is provided. It is shown, that the hysteresis of wetting of the superhydrophobic surface based on the developed composition is 3,7 hail. The critical angle of a water drop rolling of from an inclined surface is determined.

Keywords: superhydrophobic surface, wetting, anti-icing properties, wetting hysteresis

Образование сосулек большого размера на кромках кровель крыш и последующее их падение могут приводить к тяжелым и даже трагическим последствиям, а борьба с этим явлением требует больших материальных затрат.

Для защиты крыш зданий от обледенения применяются различные антиобледенительные покрытия. Эффективность антиобледенительных покрытий обусловлена их уникальными свойствами:

- существенное (более чем в 3 раза) замедление процесса замерзания капли на супергидрофобной поверхности [1];
- продолжительность контакта супергидрофобной поверхности с падающей каплей настолько мала, что капля не успевает замерзнуть [2, 3];
- высокая мобильность жидких капель на поверхности покрытия, которая определяется малой величиной гистерезиса угла смачивания – не более 10–15 градусов [4, 5];
- малая адгезия льда к поверхности, обусловленная малой долей смачиваемой поверхности (<100 кПа), и антикоррозионные свойства [6, 7].

Анализ научно-технической литературы свидетельствует, что получение супергидрофобных материалов возможно при комбинации гидрофобного материала и топографии поверхности [8].

На отечественном рынке антиобледенительных покрытий представлены составы «ПРОЛ», НИВАСАР-300, ULTRA GUARD СТОПЛЕД, ОС-12-03, «Slider», «Baltek-Antiice» и др. [9–11].

Несмотря на большое количество предлагаемых композиций, проблема борьбы с обледенением остается актуальной. В ряде случаев покрытия, обладающие супергидрофобным эффектом, теряют его после определенного срока эксплуатации [12–14]. Проведенные нами исследования позволили рекомендовать состав для антиобледенительного покрытия, содержащий кремнийорганическую смолу SILRES® MSE 100 и аэросил марки R 972 [15]. Результаты проведенных исследований показали, что после смачивания в течение 72 часов покрытия на основе силиконовой смолы SILRES® MSE100 5 %-й и 10 %-й концентраций сохранили супергидрофобный эффект – краевой угол смачивания на растворной подложке составил более 150 град. Адгезия покрытий к подложке, оцененная методом решетчатого надреза в соответствии с ГОСТ 15140-78 «Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии», после увлажнения составила 1 балл.

Нами экспериментально исследовалась зависимость характеристик смачивания в процессе растекания капли на поверхности покрытия на основе предложенного состава. Для характеристики антиобледенительных свойств покрытий применяли значения статического и динамического (наступающего и отступающего) краевых углов смачивания, а также гистерезиса смачивания, для чего измеряли углы натекания $\theta_{\text{нат}}$ и углы оттекания $\theta_{\text{от}}$.

Динамический краевой угол смачивания определяли методом лежащей капли. Для этого каплю воды помещали на поверхность покрытия с помощью шприца, диаметр капли составлял от 2 до 5 мм. Во время измерения натекающего угла $\theta_{\text{нат}}$ игла шприца оставалась в капле на протяжении всего опыта. Оттекающий угол $\theta_{\text{от}}$ измеряли при уменьшении размера капли за счет всасывания воды через шприц (рис. 1). По разнице между натекающим углом и оттекающим углом определялся гистерезис смачивания.

Кроме того, определялся критический угол, при котором капля воды с наклонной поверхности начинала скатываться. Для этого капля воды помещалась на металлическую пластину, которая постепенно начинала наклоняться. Для экспериментального исследования процесса смачивания жидкостью твердых подложек в качестве подложек использовались металлические пластины профнастила кровельного «MR-20» с полимерным покрытием. Состав антиобледенительного покрытия был нанесен на пластину; после его отверждения на поверхность наносилась капля воды. Статический краевой угол смачивания определялся методом лежащей капли по формуле

$$\cos \theta = 1 - \frac{h}{r}, \quad (1)$$

где h – высота капли; r – радиус капли.

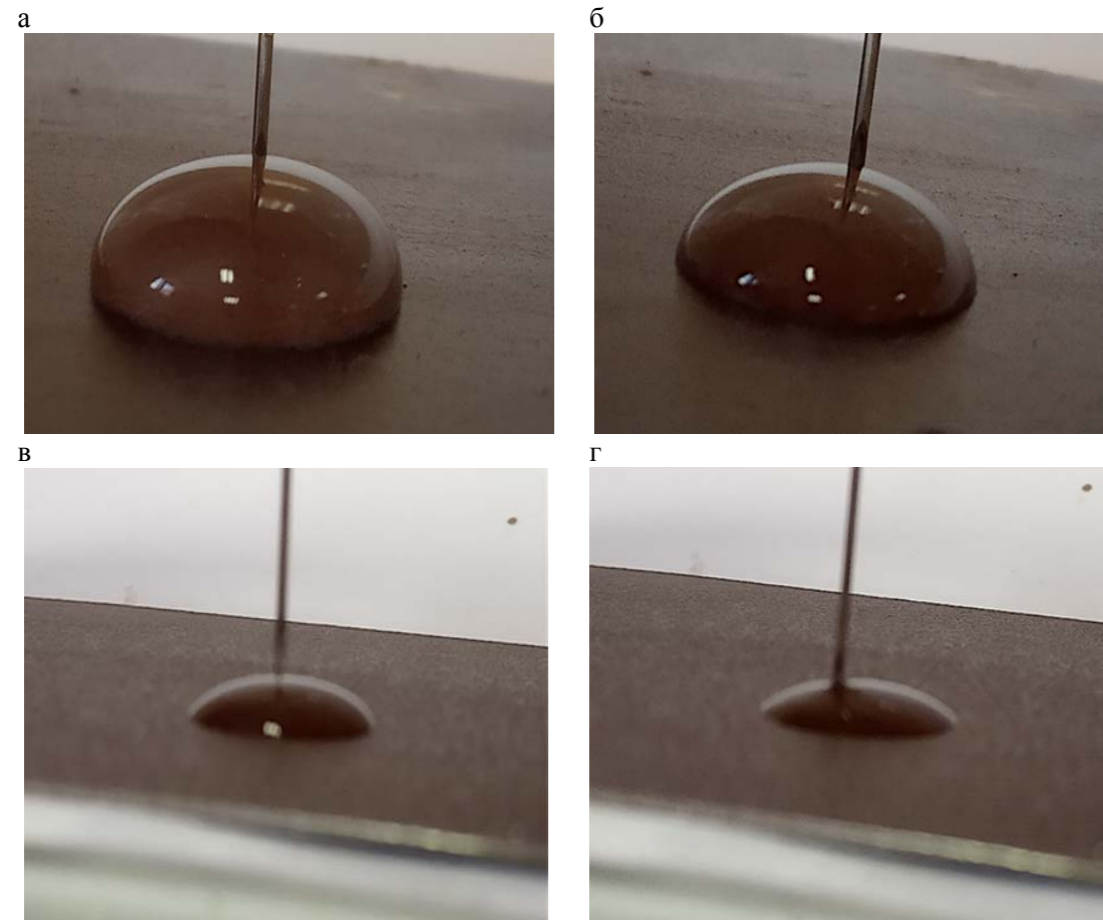


Рис. 1. Фото капли воды на металлической поверхности:
а, б – на супергидрофобной поверхности; в, г – на гидрофильной поверхности;
а, в – натекание; б, г – оттеkanie

Значения косинусов краевых углов представлены в табл. 1 и явно подтверждают наличие гистерезиса на поверхности. Данные хорошо согласуются с результатами, приведенными в [16–18].

Т а б л и ц а 1
Краевой угол для воды на металлической поверхности

Тип поверхности	Статический угол смачивания	Угол оттеkania	Угол натекания	Гистерезис смачивания
супергидрофобная	164	162,8	166,5	3,7
гидрофильная	25,4	21,1	45	23,9

При угле наклона металлической пластины 10 град капля воды с супергидрофобной поверхности начинает скатываться (рис. 2). Скатывание капли воды на гидрофильной поверхности начинается при угле наклона 31 град.

Дополнительно был проведен расчет силы, при которой капля воды скатывается с наклонной поверхности. Объем капли воды составлял 0,05 мл и был одинаковым для различных поверхностей. В этом случае ее масса определялась в соответствии с формулой

$$m = V\rho, \quad (2)$$

где ρ – плотность воды.

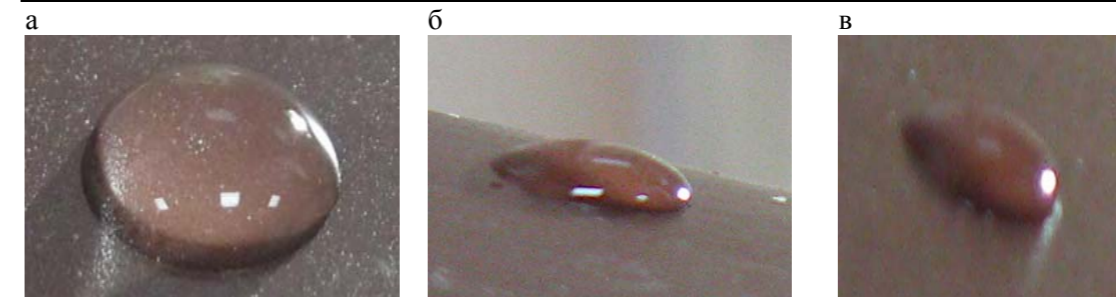


Рис. 2. Фото капли воды на поверхности антиобледенительного покрытия на металлической поверхности:

а – в исходном состоянии; б – через 1 сек скатывания; в – через 2 сек скатывания

Скатывание происходит, когда отрывается задний край капли. Условие отрыва капли определяется выражением

$$F = mg \sin \alpha, \quad (3)$$

где m – масса капли воды, кг; α – угол скатывания, град; F – усилие отрыва, Н.

Усилие F является суммой величин адгезии капли воды и силы трения.

В табл. 2 приведены значения силы F для гидрофильной и супергидрофобной поверхностей.

Т а б л и ц а 2
Угол скатывания капли воды с металлической поверхности

Тип поверхности	Угол скатывания, град	Сила отрыва, Н
гидрофильная	31	$2,55 \cdot 10^{-4}$
супергидрофобная	10	$0,85 \cdot 10^{-4}$

Результаты расчета свидетельствуют, что сила отрыва капли на супергидрофобной металлической поверхности в 3 раза меньше, что обеспечивает более легкое скатывание капли воды с поверхности и ее антиобледенительные свойства.

Список литературы

1. Boinovich, L. Effect of wettability on sessile drop freezing: when superhydrophobicity stimulates an extreme freezing delay / L. Boinovich, A.M. Emelyanenko, V.V. Korolev, A.S. Pashinin // *Langmuir*. – 2014. – Vol. 30, No. 6. – P. 1659–1668.
2. Boreyko, J.B. Delayed frost growth on jumping-drop superhydrophobic surfaces / J.B. Boreyko, C.P. Collier // *ACS nano*. – 2013. – Vol. 7, No. 2. – P. 1618–1627.
3. Mishchenko, L. Design of ice-free nanostructured surfaces based on repulsion of impacting water droplets / L. Mishchenko, B. Yatton, V. Bahadur [et al.] // *ACS nano*. – 2010. – Vol. 4, No. 12. – P. 7699–7707.
4. Kulinich, S.A. How wetting hysteresis influences ice adhesion strength on superhydrophobic surfaces / S.A. Kulinich, M. Farzaneh // *Langmuir*. – 2009. – Vol. 25, No. 16. – P. 8854–8856.
5. Momen, G. Ice repellency behaviour of superhydrophobic surfaces: Effects of atmospheric icing conditions and surface roughness / G. Momen, R. Jafari, M. Farzaneh // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 349. – P. 211–218.
6. Zheng, S. Development of stable superhydrophobic coatings on aluminum surface for corrosion-resistant, self-cleaning, and anti-icing applications / S. Zheng, Q. Fu, W. Hu [et al.] // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 93. – P. 261–270.
7. Boinovich, L.B. Durable icephobic coating for stainless steel / L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2013. – Vol. 5, No. 7. – P. 2549–2554.

8. Cao, L. Anti-icing superhydrophobic coatings / L. Cao, A.K. Jones, V.K. Sikka [et al.] // *Langmuir*. – 2009. – Vol. 25, No. 21. – P. 12444–12448.
9. www.verholaz.net 2006-2015
10. <http://ultra-ever-dry.info/katalog/>
11. <https://www.rl812.ru/>
12. Синебрюхов, С.Л. Антикоррозионные, антифрикционные покрытия на магниевых сплавах для авиации / С.Л. Синебрюхов, М.В. Сидорова, В.С. Егоркин, П.М. Недозоров, А.Ю. Устинов, С.В. Гнеденков // *Вестник ДВО РАН*. – 2011. – № 5. – С. 95–105.
13. Бойнович, Л.Б. Супергидрофобные покрытия – новый класс полифункциональных материалов / Л.Б. Бойнович // *Вестник Российской АН*. – 2013. – Т.8, №1. – С.10–22.
14. Lau, K.K.S. Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests / K.K.S. Lau, J. Bico, K.K.B. Teo, M. Chhowalla, G.A.J. Amaratunga, W.I. Milne, G.H. McKinley, K.K. Gleason // *Nano Lett.* – 2003. – №3. – P. 1701–1705,
15. Логанина, В.И. Выбор концентрации полимера при разработке рецептуры состава для антиобледенительного покрытия / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, К.А. Сергеева // *Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование*. – 2019. – №1(8). – С.19–22.
16. Schutzius, T.M., Jung, S., Maitra, T. et al. Physics of icing and rational design of surfaces with extraordinary icephobicity // *Langmuir*. – 2014. – Vol. 31, No. 17. – P. 4807–4821.
17. Kreder, M.J. Design of anti-icing surfaces: smooth, textured or slippery? / M.J. Kreder, J. Alvarenga, P. Kim, J. Aizenberg // *Nature Reviews Materials*. – 2016. – Vol. 1, No. 1. – P. 15003.
18. Khedir, K.R. An outlook on tunable superhydrophobic nanostructural surfaces and their possible impact on ice mitigation / K.R. Khedir, G.K. Kannarpady, C. Ryerson, A.S. Birisa // *Progress in Organic Coatings*. – 2017. – Vol. 112. – P. 304–318.

References

1. Boinovich, L. Effect of wettability on sessile drop freezing: when superhydrophobicity stimulates an extreme freezing delay / L. Boinovich, A.M. Emelyanenko, V.V. Korolev, A.S. Pashinin // *Langmuir*. – 2014. – Vol. 30, No. 6. – P. 1659–1668.
2. Boreyko, J.B. Delayed frost growth on jumping-drop superhydrophobic surfaces / J.B. Boreyko, C.P. Collier // *ACS nano*. – 2013. – Vol. 7, No. 2. – P. 1618–1627.
3. Mishchenko, L. Design of ice-free nanostructured surfaces based on repulsion of impacting water droplets / L. Mishchenko, B. Yattton, V. Bahadur [et al.] // *ACS nano*. – 2010. – Vol. 4, No. 12. – P. 7699–7707.
4. Kulinich, S.A. How wetting hysteresis influences ice adhesion strength on superhydrophobic surfaces / S.A. Kulinich, M. Farzaneh // *Langmuir*. – 2009. – Vol. 25, No. 16. – P. 8854–8856.
5. Momen, G. Ice repellency behaviour of superhydrophobic surfaces: Effects of atmospheric icing conditions and surface roughness / G. Momen, R. Jafari, M. Farzaneh // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 349. – P. 211–218.
6. Zheng, S. Development of stable superhydrophobic coatings on aluminum surface for corrosion-resistant, self-cleaning, and anti-icing applications / S. Zheng, Q. Fu, W. Hu [et al.] // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 93. – P. 261–270.
7. Boinovich, L.B. Durable icephobic coating for stainless steel / L.B. Boinovich, A.M. Emelyanenko // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2013. – Vol. 5, No. 7. – P. 2549–2554.
8. Cao, L. Anti-icing superhydrophobic coatings / L. Cao, A.K. Jones, V.K. Sikka [et al.] // *Langmuir*. – 2009. – Vol. 25, No. 21. – P. 12444–12448.
9. www.verholaz.net 2006-2015
10. <http://ultra-ever-dry.info/katalog/>

11. <https://www.rl812.ru/>

12. Sinebryukhov, S.L. Anti-corrosion, anti-friction coatings on magnesium alloys for aviation / S.L. Sinebryukhov, M.V. Sidorova, V.S. Egorokin, P.M. Nedozorov, A.Yu. Ustinov, S.V. Gnedenkov // *Vestn. Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. – 2011. – No. 5. – P. 95–105.

13. Boyunovich, L.B. Superhydrophobic coatings – a new class of polyfunctional materials / L.B. Boyunovich // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. – 2013. – Vol.8, №1. – P. 10–22.

14. Lau, K.K.S. Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests / K.K.S. Lau, J. Bico, K.K.B. Teo, M. Chhowalla, G.A.J. Amaratunga, W.I. Milne, G.H. McKinley, K.K. Gleason // *Nano Lett.* – 2003. – №3. – P. 1701–1705,

15. Loganina, V.I. The choice of polymer concentration in the development of a formulation for anti-icing coating / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, K.A. Sergeeva // *Bulletin PGUAS: construction, science and education*. – 2019. – № 1 (8). – P.19–22.

16. Schutzius, T.M., Jung, S., Maitra, T. et al. Physics of icing and rational design of surfaces with extraordinary icephobicity // *Langmuir*. – 2014. – Vol. 31, No. 17. – P. 4807–4821.

17. Kreder, M.J. Design of anti-icing surfaces: smooth, textured or slippery? / M.J. Kreder, J. Alvarenga, P. Kim, J. Aizenberg // *Nature Reviews Materials*. – 2016. – Vol. 1, No. 1. – P. 15003.

18. Khedir, K.R. An outlook on tunable superhydrophobic nanostructural surfaces and their possible impact on ice mitigation / K.R. Khedir, G.K. Kannarpady, C. Ryerson, A.S. Birisa // *Progress in Organic Coatings*. – 2017. – Vol. 112. – P. 304–318.

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

Коннов Евгений Денисович,
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

Konnov Evgeniy Denisovich,
Postgraduate student

О КОЭФФИЦИЕНТАХ ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ОБЪЕМНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНА НА ДИАГРАММЕ СЖАТИЯ

Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Е.Д. Коннов

Экспериментальное изучение механического поведения конструкционного материала позволяет судить о прочности, надежности и долговечности материала, определять условия оптимизации состояния по тем или иным параметрам конструкционной прочности и использовать их при расчетах и проектировании конструкций и, в том числе, в технологии производства конструкционного материала. Представлены результаты экспериментальной оценки механического поведения конструкционного керамзитобетона сравниваемых серий по характеру изменения коэффициентов поперечной относительной деформации, объемного относительного изменения, модуля деформации и упругой характеристики керамзитобетона на диаграмме сжатия в зависимости от уровня нагружения, а также кратковременной меры пластичности сравниваемых серий образцов. Приведен сравнительный анализ влияния условий предварительного нагружения и разгрузки конструкционного керамзитобетона на характер механического поведения на диаграмме осевого сжатия. Экспериментально показано влияние возраста на характер изменения прочности и начального модуля упругости керамзитобетона.

Ключевые слова: конструкционный керамзитобетон, диаграмма сжатия, продольная и поперечная относительные деформации, интегральный и дифференциальный коэффициент поперечной деформации, объемные относительные деформации, модуль деформации, упругая характеристика

COEFFICIENTS OF TRANSVERSE DEFORMATION AND VOLUME DEFORMATION OF CONSTRUCTION CERAMZYTON CONCRETE ON COMPRESSION DIAGRAM

N.I. Makridin, I.N. Maksimova, E.D. Konnov

Experimental study of the mechanical behavior of a structural material makes it possible to judge the strength, reliability and durability of the material, to obtain conditions for optimizing the state of various structural strength parameters and use them in calculations and design of structures, including production technology of a structural material. The results of experimental evaluation of the mechanical behavior of structural claydite-concrete of the compared series by the nature of changes in the coefficients of transverse relative deformation, volume relative change, deformation modulus and

elastic characteristics of claydite-concrete on the compression diagram depending on the loading level, as well as a short-term measure of plasticity of the compared series of samples are presented. A comparative analysis of the influence of the conditions of preloading and unloading of structural claydite-concrete on the nature of the mechanical behavior on the axial compression diagram is given. The effect of the age on the nature of change in strength and the initial modulus of elasticity of expanded clay concrete is experimentally shown.

Keywords: structural expanded clay concrete, compression diagram, longitudinal and transverse relative deformations, integral and differential coefficient of transverse deformation, volumetric relative deformations, deformation modulus, elastic characteristic

Как известно, особенностью современных исследований в области технологии и механического поведения бетонов вообще и легких в частности является то, что в них все с большей определенностью проявляется интерес к изучению не только прочности и долговечности, но также и деформативных особенностей этих материалов.

Существенной особенностью макроструктур легких бетонов является повышенная деформативность пористых заполнителей, а через них – и легких бетонов. На основе экспериментальных данных, полученных как отечественными, так и зарубежными исследователями, в работе [1] отмечено, что на пористых заполнителях с различной плотностью может быть получен легкий бетон одинаковой прочности с резко отличным модулем упругости.

Экспериментальные исследования механического поведения материала позволяют устанавливать количественные соотношения между напряжениями и деформациями, так как в диаграмме сжатия и растяжения отражается связь деформативных и прочностных свойств любых твердых тел конструкционного назначения, которые, в принципе, можно получать только экспериментальным путем.

Для практических оценок диаграмм состояния под кратковременной нагрузкой необходимо располагать данными по крайней мере о двух параметрах диаграммы нагружения: начальном модуле деформации и предельной деформации, которые применяются для расчета элементов конструкций и существенно зависят от особенностей структуры композита [2–6].

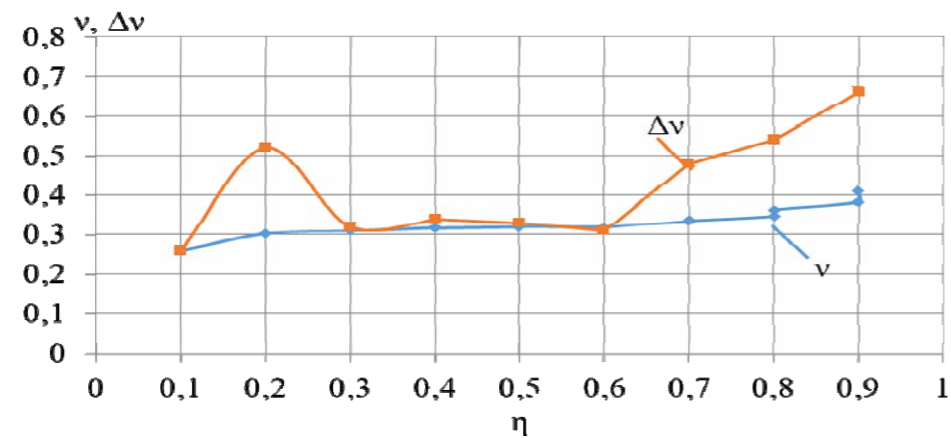
По мнению проф. О.Я. Берга [7], механическое поведение композита наиболее отчетливо проявляется при анализе его объемных относительных деформаций. Поскольку анализ объемного деформирования бетона при сжатии (основной вид сопротивления материала в конструкции) и характер изменения величин $\theta = \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2$ и $\nu = \varepsilon_2/\varepsilon_1$ и их дифференциальных приращений $\Delta\theta = \Delta\varepsilon_1 - 2\Delta\varepsilon_2$ и $\Delta\nu = \Delta\varepsilon_2/\Delta\varepsilon_1$ с нагрузкой показывают, что по диаграмме состояния бетона можно определить, как меняются указанные характеристики деформирования и как развивается процесс микротрещинообразования и разрушения при достижении структуры материала предельных уровней напряжения, соответствующих достижению второй параметрической точки R_T^v .

Целью эксперимента являлось изучение и сравнительный анализ механического поведения зрелого конструкционного керамзитобетона на диаграмме нагружения в зависимости от предистории предварительного механического нагружения и разгрузки опытных образцов и их влияния на характер изменения вышеназванных параметров объемного деформирования с оценкой их предельных значений.

Состав, материалы, технология получения сравниваемых серий конструкционного керамзитобетона, подготовка опытных образцов-призм размерами 10×10×40 см для механического испытания по методике ГОСТ 24452-80 изложены нами в работе [8].

На рис. 1–3 представлены результаты экспериментальных исследований изменения интегрального и дифференциального коэффициентов поперечной относительной деформации и объемного относительного изменения керамзитобетона сравниваемых серий в возрасте 395 суток.

а



б

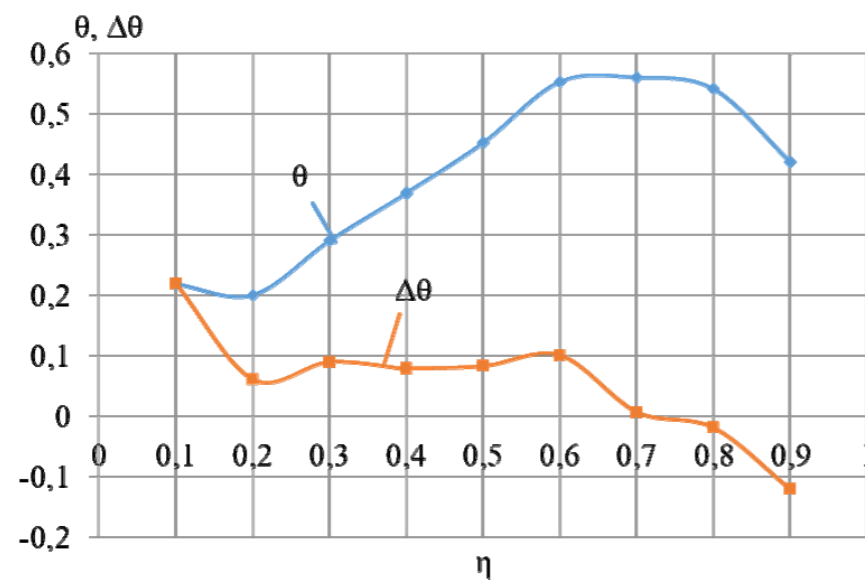


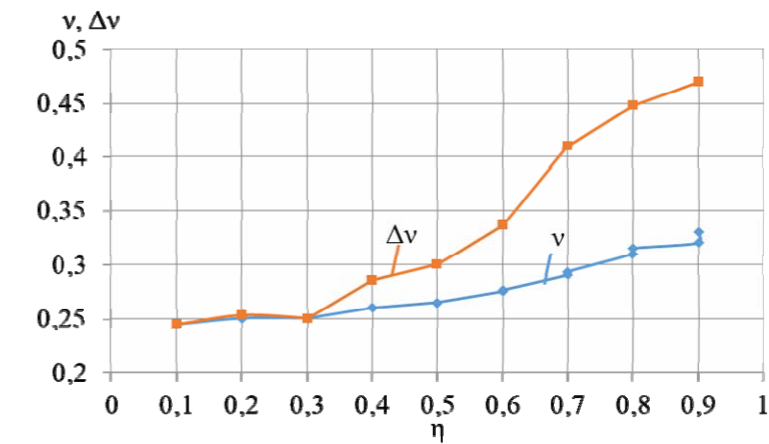
Рис. 1. Изменение коэффициента поперечной относительной деформации v и его приращения Δv (а) и объемного относительного изменения при сжатии θ и его приращения $\Delta\theta$ (б) образцов керамзитобетона контрольной серии №1 в зависимости от уровня кратковременного нагружения η

Из анализа графических зависимостей (см. рис. 1–3) следует отметить, что образцы керамзитобетона контрольной серии (см. рис. 1), то есть образцы, на которых контролировали усадку керамзитобетона в течение длительного времени, показали критические значения параметров Δv и $\Delta\theta$, характеризующие микротрещинообразование бетона при сжатии, на уровне напряжения $\eta=(0,72-0,73) R_{np}$.

На образцах керамзитобетона серии №2, которые испытывали на механическое поведение путем нагружения до разрушения сразу после разгрузки на ползучесть (см. рис. 2), не удалось зафиксировать на диаграмме сжатия уровни расположения параметров Δv и $\Delta\theta$.

Образцы керамзитобетона серии №3, то есть образцы, испытанные до разрушения на седьмой день после разгрузки на ползучесть (см. рис. 3), показали уровень расположения критических значений параметров Δv и $\Delta\theta$ на диаграмме сжатия, равный $0,8 R_{np}$.

а



б

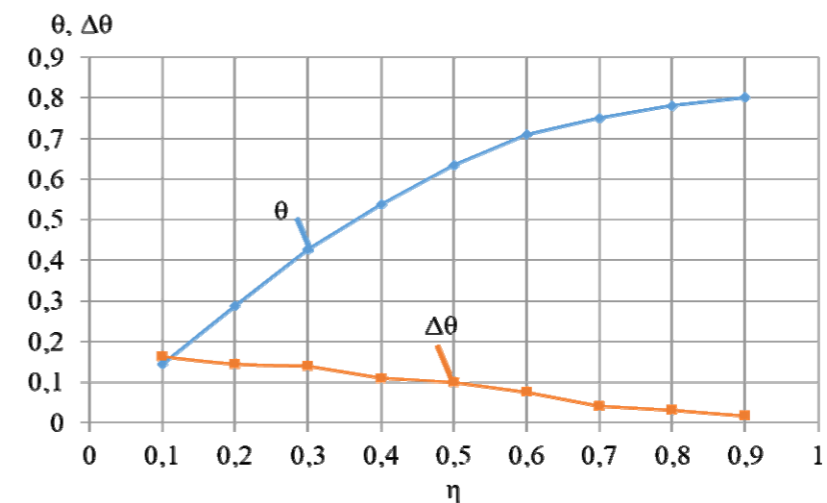
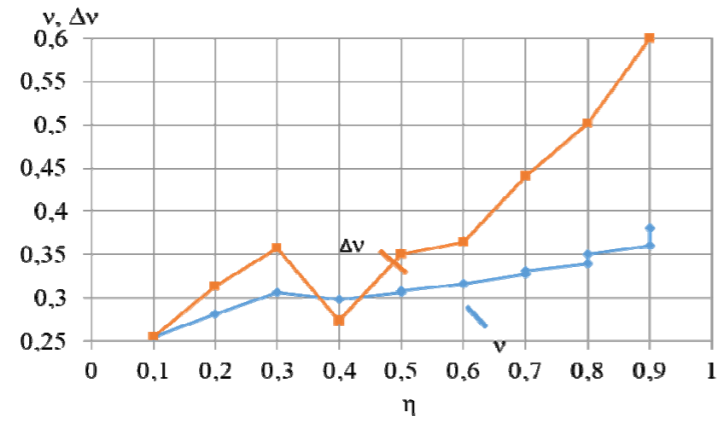


Рис. 2. Изменение коэффициента поперечной относительной деформации v и его приращения Δv (а) и объемного относительного изменения при сжатии θ и его приращения $\Delta\theta$ (б) образцов керамзитобетона серии №2 сразу после разгрузки на ползучесть в зависимости от уровня кратковременного нагружения η

Анализ результатов механического поведения конструкционного керамзитобетона на трех сравниваемых сериях опытных образцов достаточно четко отражает влияние предистории нагружения и разгрузки опытных образцов на характер объемного деформирования керамзитобетона на диаграмме сжатия, что, на наш взгляд, обусловлено как взаимодействием, так и взаимовлиянием деформативных особенностей весьма пористого керамзитового гравия и пористой цементно-песчаной матричной фазы керамзитобетона, так и разным вязкоупругим состоянием на диаграмме нагружения макроструктуры керамзитобетона, что, на наш взгляд, лежит в основе различия механического поведения конструкционного керамзитобетона и тяжелого бетона на плотных заполнителях.

На рис. 4–6 представлены результаты экспериментальной оценки характера изменения модуля деформации $E = \sigma/\varepsilon_1$ и упругой характеристики $V_y = E_i/R_{np}$ образцов сравниваемых серий керамзитобетона на диаграмме сжатия в диапазоне нагружения от $0,2$ до $0,9 R_{np}$.

а



б

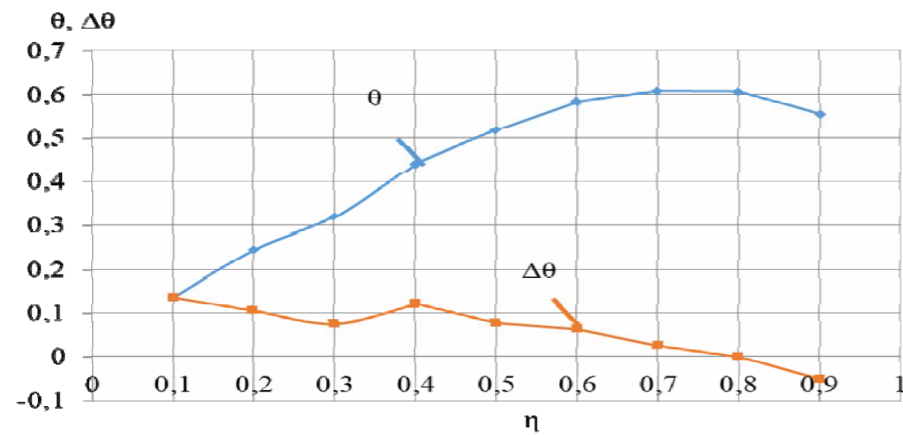


Рис. 3. Изменение коэффициента поперечной относительной деформации v и его приращения Δv (а) и объемного относительного изменения при сжатии θ и его приращения $\Delta\theta$ (б) образцов керамзитобетона серии №3 на седьмой день после разгрузки на ползучесть в зависимости от уровня кратковременного нагружения η

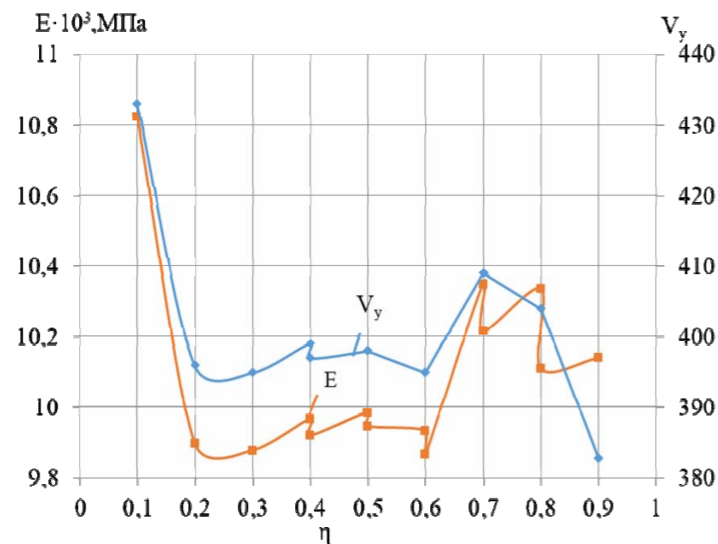


Рис. 4. Характер изменения модуля деформации E и упругой характеристики V_y образцов керамзитобетона контрольной серии №1 в зависимости от уровня напряжения

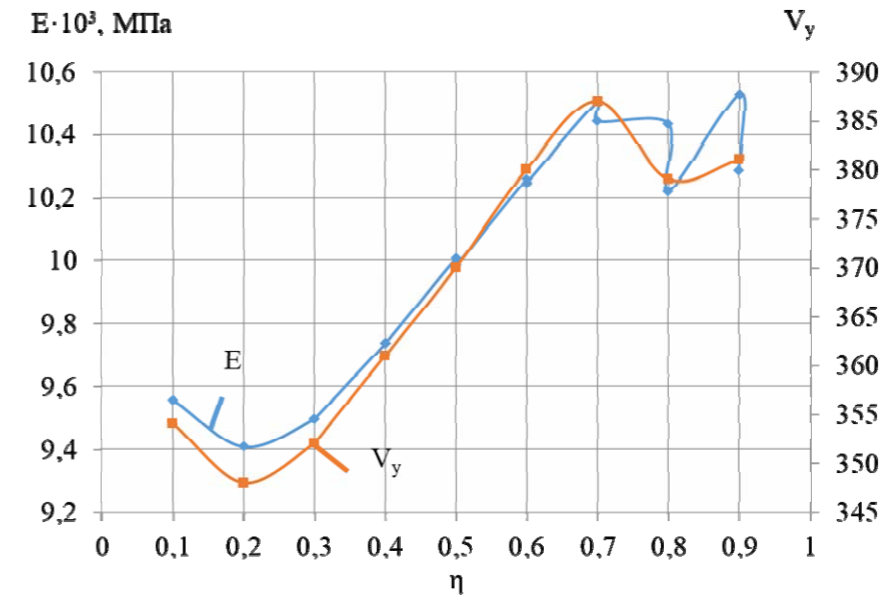


Рис. 5. Характер изменения модуля деформации E и упругой характеристики V_y образцов керамзитобетона серии №2 сразу после разгрузки на ползучесть в зависимости от уровня напряжения

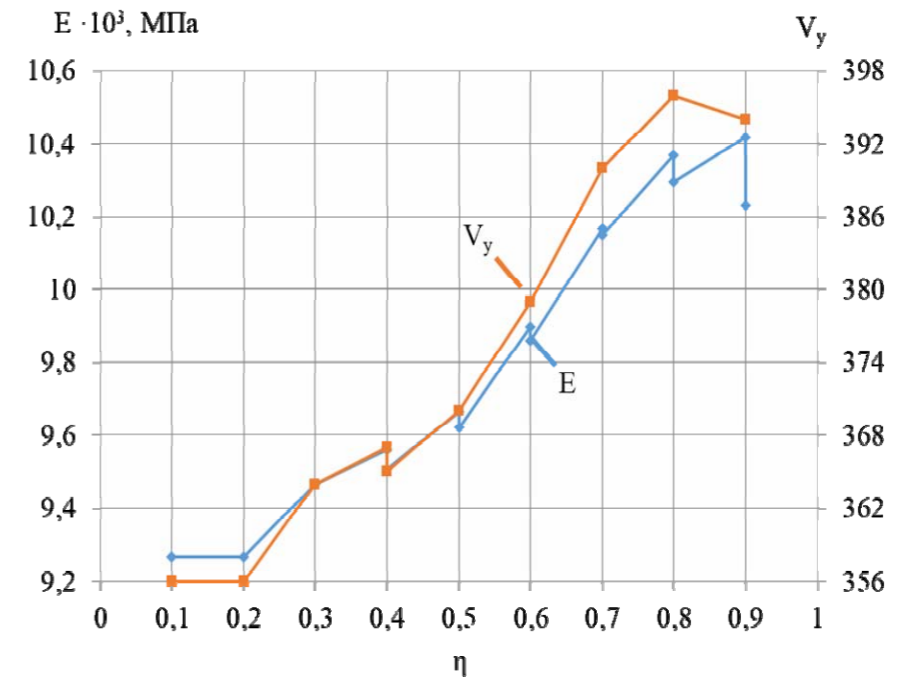


Рис. 6. Характер изменения модуля деформации E и упругой характеристики V_y образцов керамзитобетона серии №3 на седьмой день после разгрузки на ползучесть в зависимости от уровня напряжения

Анализ графических зависимостей (см. рис. 4), полученных на образцах контрольной серии №1, позволяет констатировать, что несмотря на неоднозначный характер изменения параметров, модуль деформации в названном интервале напряжения увеличивается примерно на 2,8 %, а упругая характеристика при этом уменьшается примерно на 3,3 %.

Графические зависимости (см. рис. 5), полученные на образцах серии №2, то есть на образцах керамзитобетона, испытанных сразу после разгрузки на ползучесть, показали увеличение модуля деформации и упругой характеристики на диаграмме сжатия соответственно на 9,6 и 9,5 %.

Графические зависимости (см. рис. 6), полученные на образцах серии №3, то есть на образцах керамзитобетона, испытанных на седьмой день после разгрузки на ползучесть, другими словами, на образцах, проявивших вязкоупругие деформации последнего действия ползучести, показали увеличение значений модуля деформации и упругой характеристики соответственно на 13,0 и 10,0 %.

Вместе с тем следует отметить, что образцы контрольной серии №1, то есть образцы, не подвергавшиеся предварительному нагружению в процессе изучения механического поведения на диаграмме сжатия, характеризовались более высокими относительно образцов серий №2 и №3 значениями начального модуля деформации – на 5,3 и 7,6 % и упругой характеристики – на 13,5 и 11,3 % соответственно.

В заключение сравнительного анализа механического поведения конструкционного керамзитобетона при сжатии следует отметить и характер развития меры пластичности (C , МПа⁻¹) сравниваемых серий образцов на пятиминутных этапах выдержки при кратковременном нагружении образцов-призм до разрушения. опыты показали, что образцы керамзитобетона сравниваемых серий №1–№3 до уровня нагружения $0,4 R_{np}$ не проявляли деформации кратковременной пластичности, то есть фиксировали только упругомгновенные деформации. Однако при уровне напряжения выше $0,4 R_{np}$ на образцах серий №1–№3 фиксировали разную кинетику нарастания кратковременной меры пластичности C , которая на уровне напряжения $0,9 R_{np}$ на образцах сравниваемых серий №1–№3 достигала значений соответственно $58 \cdot 10^{-7}$; $22,5 \cdot 10^{-7}$; $17,5 \cdot 10^{-7}$ МПа⁻¹. Полученные величины меры пластичности сравниваемых серий образцов керамзитобетона находятся в полном согласии с уровнем расположения на диаграмме критических параметров Δv и $\Delta \theta$, отражающих характер микротрещинообразования образцов при сжатии.

Таким образом, совместный сравнительный анализ результатов исследований механического поведения конструкционного керамзитобетона по продольным и поперечным деформациям диаграмм сжатия опытных образцов, подвергнутых предварительному силовому воздействию в пружинных установках в интервале возраста бетона от 28 до 395 суток и специальному режиму разгрузки образцов, приведенных в [8], и результатов настоящего экспериментального исследования по оценке характера изменения интегрального и дифференциального коэффициентов поперечной деформации и объемного деформирования, изменения модуля деформации и упругой характеристики, уровня расположения параметрической точки R_T^v и проявления кинетики кратковременной меры пластичности сравниваемых серий образцов на диаграмме сжатия в зависимости от интенсивности нагружения позволяет констатировать:

1) увеличение возраста керамзитобетона опытных образцов сравниваемых серий №1–№3 от 28 до 395 суток при равных условиях внешней среды и разного силового воздействия и разгрузки приводило, с одной стороны, к возникновению порового пространства в образцах от испарившейся воды затворения в количестве 10,7; 8,0 и 8,0 % соответственно для образцов серий №1–№3, а с другой – к увеличению призмной прочности соответственно в 1,41 и 1,5 раза и снижению значений начального модуля упругости керамзитобетона соответственно на 4,2; 14,4 и 19 %;

2) исходя из условий эксперимента получения разного деформационного состояния макроструктуры керамзитобетона сравниваемых серий, следует отметить, что избыток вязкоупругого состояния макроструктуры рабочих образцов серий №2 и №3 способствует более упругому поведению этих образцов на диаграмме сжатия;

3) наличие вязкоупругого состояния макроструктур рабочих образцов керамзитобетона серий №2 и №3, что обусловлено условиями эксперимента, проявлялось в том, что на диаграмме сжатия образцов серии №2 не фиксировали критические значения уровня расположения параметров Δv и $\Delta \theta$; на образцах серии №3 фиксировали уровень расположения критических значений параметров Δv и $\Delta \theta$ при интен-

сивности нагружения $0,8 R_{np}$, а образцы контрольной серии №1 показали критические значения параметров Δv и $\Delta \theta$ на уровне напряжения $\eta = (0,72 \div 0,73) R_{np}$;

4) особенностью диаграмм сжатия сравниваемых серий керамзитобетона является то, что все образцы серий №1–№3 в диапазоне напряжений от 0,2 до $(0,7-0,8) R_{np}$ показывали увеличение показателей жесткости структуры конструкционного керамзитобетона $E = \sigma/\varepsilon_1$ и $V_y = E_i/R_{np}$ соответственно в пределах 2,8–3,3 % и 13,0–10,0 %;

5) оценка кинетики кратковременной меры пластичности керамзитобетона сравниваемых серий образцов №1–№3 на этапах ступенчатого нагружения вплоть до интенсивности напряжения $0,9 R_{np}$ свидетельствует о значительной разнице величин меры пластичности опытных образцов сравниваемых серий, что находится в полном согласии с уровнем расположения на диаграммах сжатия критических параметров Δv и $\Delta \theta$, отражающих характер микротрещинообразования в образцах;

6) комплексное экспериментальное изучение механического поведения конструкционного керамзитобетона с позиций механики деформируемого твердого тела позволяет судить не только о его прочности и деформативности, но и получать условия оптимизации состояния по тем или иным параметрам конструкционной прочности и использовать их при расчетах и проектировании конструкций на его основе и, в том числе, в технологии производства конструкционного материала.

Список литературы

1. Пирадов, А.Б. Конструктивные свойства легкого бетона и железобетона / А.Б. Пирадов. – М.: Стройиздат, 1973. – 133 с.
2. Erofeev, V.T. Investigation of the crack resistance of cement stone and rocks / V.T. Erofeev, I.N. Maksimova, N.I. Makridin, Salman Dawood Salman Al-Dulaimi // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). – April, 2019. – Vol. 10, Iss. 04. – Pp. 1300–1311.
3. Smirnov, V.A. Modeling the Building Materials: Applications of Particle Dynamics / V.A. Smirnov, E.V. Korolev, A.V. Evstigneev, O.I. Poddaeva // IOAB Journal. – 2016. – Vol. 7, No 1. – P. 496–503.
4. Иванов, И.А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях / И.А. Иванов. – М.: Стройиздат, 1993. – 182 с.
5. Макридин, Н.И. Механическое поведение конструкционного керамзитобетона при осевом сжатии / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Строительные материалы. – 2009. – №1. – С. 51–53.
6. Максимова, И.Н. Строительное материаловедение конструкционных легких бетонов: монография / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 204 с.
7. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко; под ред. д-ра техн. наук, проф. О.Я. Берга. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.
8. Макридин, Н.И. Особенности механического поведения и структурных изменений конструкционного керамзитобетона / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Ю.В. Полубарова // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 3 (40). – С. 50–57.

References

1. Piradov, A.B. The structural properties of lightweight concrete and reinforced concrete / A.B. Piradov. – M.: Stroyizdat, 1973. – 133 p.
2. Erofeev, V.T. Investigation of the crack resistance of cement stone and rocks / V.T. Erofeev, I.N. Maksimova, N.I. Makridin, Salman Dawood Salman Al-Dulaimi // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). – April 2019. – Vol. 10, Iss. 04. – P. 1300–1311.

3. Smirnov, V.A. Modeling the Building Materials: Applications of Particle Dynamics / V.A. Smirnov, E.V. Korolev, A.V. Evstigneev, O.I. Poddaeva // ИОАВ Journal. – 2016. – Vol. 7, No 1. – P. 496–503.
4. Ivanov, I.A. Lightweight Concrete with Artificial Porous Aggregates / I.A. Ivanov. – М.: Stroyizdat, 1993. – 182 p.
5. Makridin, N.I. Mechanical behavior of structural claydite-concrete under axial compression / N.I. Makridin, I.N. Maksimova // Construction materials. – 2009. – No. 1. – P. 51–53.
6. Maksimova, I.N. Building materials constructional lightweight concrete / I.N. Maksimova, N.I. Makridin. – Penza: PGUAS, 2014. – 204 p.
7. Berg, O.Ya. High-strength concrete / O.Ya. Berg, E.N. Shcherbakov, G.N. Pisanko; ed. Dr. techn. sciences, prof. O.Ya. Berg. – М.: Stroizdat, 1971. – 208 p.
8. Makridin, N.I. Features of mechanical behavior and structural changes in structural expanded clay concrete / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, Yu.V. Polubarova // Regional architecture and construction. – 2019. – No. 3 (40). – P. 50–57.

УДК 691.175.2

Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева

Россия, 430005, Саранск,
ул. Большевикская, д. 68

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

Пильшиков Владислав Олегович,
аспирант кафедры «Прикладная механика»
E-mail: vlad-pil-2020@mail.ru

Вятский государственный университет

Россия, 610000, г. Киров,
ул. Московская, д. 36,
тел.: (8332) 74-25-65; (8332) 74-27-15

Авдонин Валерий Викторович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Строительные
конструкции и машины»
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru

Юркин Юрий Викторович,
кандидат технических наук,
зав. кафедрой «Строительные конструкции
и машины»
E-mail: yurkin@vyatsu.ru

Mordovian State University
named after N.P. Ogarev

Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.

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

Pil'shchikov Vladislav Olegovich,
Postgraduate student of the department
«Applied mechanics»
E-mail: vlad-pil-2020@mail.ru

Vyatka State University

Russia, 610000, Kirov, 36, Moskovskaya St.,
tel.: (8332) 74-25-65; (8332) 74-27-15

Avdonin Valeriy Viktorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Building Structures and
Machines»
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru

Yurkin Yuriy Viktorovich,
Candidate of Sciences, Head of the
department «Building Structures and
Machines»
E-mail: yurkin@vyatsu.ru

САМОКЛЕЯЩИЕСЯ РАДИАЦИОННО- ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ*

В.Д. Черкасов, В.В. Авдонин, Ю.В. Юркин, В.О. Пильшиков

Теоретически обосновано создание самоклеящихся эластичных радиационно-защитных покрытий с заданными свойствами. Экспериментально подтверждены результаты теоретических исследований. Выявлено, что, применяя материал поглотителя с высоким порядковым номером и атомной массой и в количестве 50-70 %, можно получить материал с высокими радиационно-защитными свойствами. Исследования разработанных материалов показали, что при энергии облучения 59 кэВ для защиты от ионизирующего облучения достаточна толщина материала 2-3 мм. При этом количество гамма-квантов, прошедших через материал, составляет 0÷0,5 %.

Ключевые слова: эластичные радиационно-защитные покрытия, атомная масса, порядковый номер, облучение, гамма-кванты

ELASTIC RADIATION SHIELDING COVERINGS

V.D. Cherkasov, V.V. Avdonin, Yu.V. Yurkin, V.O. Pil'shchikov.

Creation of self-adhesive elastic radiation shielding covering with set properties is theoretically proved. The results of theoretical researches are experimentally confirmed. It is revealed, that applying an absorber with a high order number and atomic weight and in the quantity of 50-70 % it is possible to get a material with high radiation shielding properties. Researches of the developed materials have shown, that at irradiation energy of 59 keV for protection against ionising irradiation

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Название проекта – «Прикладные научные исследования, направленные на создание съемных эластичных самоклеящихся радиационно-защитных покрытий, обеспечивающих экологически безопасное обращение с радиационно-активными отходами» (код формы заявки «2018-14-000-0001-028»). Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57418X0187.

material the thickness of 2-3 mm is sufficient. Thus the quantity of gamma quanta which have passed through a material is 0÷0,5 %.

Keywords: elastic radiation shielding covering, atomic weight, order number, irradiation, gamma quanta

Быстрое развитие ядерной энергетики и широкое внедрение источников ионизирующих излучений в различных областях науки, техники и в народном хозяйстве создало потенциальную угрозу радиационной опасности для человека и загрязнения окружающей среды радиоактивными веществами. Поэтому вопросы защиты от ионизирующих излучений превратились в одну из важнейших проблем современности.

Для снижения вредного воздействия ионизирующего излучения используют радиационно-защитные материалы. Существующие тенденции развития радиационно-защитных материалов показывают, что наиболее перспективными являются полимерные композиционные материалы [1].

Комбинируя состав полимерной матрицы и химический состав внедренных частиц, можно создавать различные типы материалов, отвечающих различным потребностям и критериям защиты при различных эксплуатационных воздействиях.

В настоящее время для радиационной защиты используют композиционные материалы, матрицы которых представлены вулканизированными резинами, резиноподобными полимерами, материалы, матрицы которых изготовлены на основе полиэтилена, и многослойные экраны [2].

С учетом требований, предъявляемых к радиационно-защитным материалам, таких, как вибро- и ударостойкость, низкий модуль упругости, коррозионная стойкость, минимальное тепловое расширение, малая усадка, простота монтажа и демонтажа, низкая стоимость и доступность сырья, для изготовления радиационно-защитных покрытий подходят неотверждаемые герметики на основе каучуков. Имеется опыт получения неотверждаемых герметиков с целым рядом положительных свойств [3–6].

Защитные свойства материалов характеризуются линейным коэффициентом ослабления пучка γ -квантов. Интенсивность пучка γ -квантов при прохождении через вещество меняется по закону [7]:

$$J = J_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$

где J_0 – интенсивность падающего на образец пучка γ -лучей, МэВ/(см²·с); J – интенсивность пучка после прохождения через образец, МэВ/(см²·с); x – толщина образца, см; μ – линейный коэффициент ослабления, 1/см; e – основание натурального логарифма. Коэффициент ослабления μ представляет собой толщину образца, ослабляющую интенсивность потока γ -лучей в e раз и является суммой трех слагаемых: коэффициента фотоэлектрического ослабления $\mu_{\text{ф}}$, коэффициента комптоновского ослабления $\mu_{\text{нк}}$ и коэффициента парного ослабления $\mu_{\text{п}}$:

$$\mu = \mu_{\text{ф}} + \mu_{\text{нк}} + \mu_{\text{п}}. \quad (2)$$

Линейный коэффициент ослабления зависит от плотности вещества и порядковых номеров элементов, из которых состоит вещество. В случае фотоэффекта линейный коэффициент ослабления выражается следующим соотношением:

$$\mu_{\text{ф}} = 0,089 \cdot \rho \frac{Z^{4,1}}{A} \cdot \lambda^h, \quad (3)$$

где ρ – плотность вещества поглотителя; A и Z – порядковый номер и атомная масса элемента; λ – длина волны γ -кванта; h – эмпирический коэффициент.

Таким образом, чем выше плотность поглотителя и больше порядковый номер элементов, из которых состоит поглотитель, тем выше будут его защитные свойства.

Многочисленные исследования показали [8], что структура материала определяет особенности распределения поглощенной энергии излучения по объему, однако радиационно-защитные свойства определяются усредненным химическим составом и

плотностью материала. В связи с этим усредненные параметры плотности и коэффициента линейного ослабления композита могут быть определены в первом приближении по правилу «смесей». В связи с этим плотность композита будет определяться следующим выражением:

$$\rho_{\text{к}} = \rho_{\text{м}} \cdot V_{\text{м}} + \sum_1^n \rho_{\text{н}}^i V_{\text{н}}^i, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{к}}$ – плотность композита; $\rho_{\text{м}}$ – плотность матрицы; $V_{\text{м}}$ – объемное содержание матрицы; $\rho_{\text{н}}^i$ – плотность i -го наполнителя; $V_{\text{н}}^i$ – объемное содержание i -го наполнителя.

Коэффициент линейного ослабления композита можно рассчитать с помощью выражения

$$\mu_{\text{к}} = \mu_{\text{м}} \cdot V_{\text{м}} + \sum_1^n \mu_{\text{н}}^i V_{\text{н}}^i, \quad (5)$$

где $\mu_{\text{к}}$ – коэффициент линейного ослабления композита; $\mu_{\text{м}}$ – коэффициент линейного ослабления матрицы; $V_{\text{м}}$ – объемное содержание матрицы; $\mu_{\text{н}}^i$ – коэффициент линейного ослабления i -го наполнителя; $V_{\text{н}}^i$ – объемное содержание i -го наполнителя, %.

Из полученных выражений видно, что коэффициент линейного ослабления увеличивается с увеличением количества поглотителя.

Для установления влияния порядкового номера и атомной массы вещества поглотителя были изготовлены следующие образцы (табл. 1 и 2).

Т а б л и ц а 1

Составы образцов

№ п/п	Маркировка образцов	Применяемые материалы			Объемные доли, %		
		Полимер	Пластификатор	Наполнитель	Полимер	Пластификатор	Наполнитель
1	СМ4Ж5	Каучук	Масло И-20	Оксид железа III	30	20	50
2	СМ4Б5	Каучук	Масло И-20	Барит	30	20	50
3	СМ4В5	Каучук	Масло И-20	Вольфрам техн.	30	20	50
4	СМ4С5	Каучук	Масло И-20	Оксид свинца IV	30	20	50

Т а б л и ц а 2

Порядковые номера и атомная масса вещества наполнителя

№ п/п	Вещество	Порядковый номер в табл. Менделеева	Атомная масса
1	Железо	26	55,847
2	Барит	56	137,33
3	Вольфрам	74	183,85
4	Свинец	82	207,19

Результаты испытаний образцов с различными видами наполнителя представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3
Результаты испытаний образцов с различными видами наполнителя

№ п/п	Маркировка образцов	Плотность, г/см ³	Толщина образца, мм	Линейный коэффициент поглощения, СМ-1 при энергии	
				59кэВ	661кэВ
1	СМ4Ж5	3,08	5,1	2,243	0,263
2	СМ4Б5	2,56	5,1	10,06	0,201
3	СМ4В5	4,04	5	12,774	0,486
4	СМ4С5	5,15	4,7	14,7	0,51

Проведенные исследования показали, что чем выше порядковый номер и атомная масса вещества, тем выше радиационно-защитные свойства материала. Применяя материал поглотителя с высокими порядковым номером и атомной массой, можно получить материал с высокими радиационно-защитными свойствами. Таким образом, для получения материала с необходимыми защитными свойствами надо выбрать определенного вида наполнитель и его количество.

Как следует из теоретического обоснования, защитные свойства материала зависят от количества поглотителя. В связи с этим были проведены исследования по определению влияния количества наполнителя на линейный коэффициент ослабления излучения. В качестве наполнителя был взят барит. Количество его в матрице изменялось от 30 до 70 % (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Влияние количества наполнителя на линейный коэффициент ослабления излучения

№ п/п	Маркировка образцов	Полимер	Пластификатор	Наполнитель	Объемные доли, %		
					Полимер	Пластификатор	Наполнитель
1	СМ4Б3	Каучук	Масло И-20	Барит	42	28	30
2	СМ4Б4	Каучук	Масло И-20	Барит	36	24	40
3	СМ4Б5	Каучук	Масло И-20	Барит	30	20	50
4	СМ4Б6	Каучук	Масло И-20	Барит	24	16	60
5	СМ4Б7	Каучук	Масло И-20	Барит	18	12	70

Приведенные результаты показывают (рис. 1 и 2), что с увеличением содержания наполнителя возрастает линейный коэффициент ослабления. Из этого следует, что для получения материала с высокими защитными свойствами необходимо в состав вводить наполнитель в количестве 50-70 % по объему.

Важным показателем радиационно-защитных свойств материалов является кратность ослабления излучения. Проведенные исследования разрабатываемых материалов (рис. 3) показали, что при энергии облучения 59 кэВ для защиты достаточны материалы толщиной 2-3 мм. При этом количество гамма-квантов, прошедших через материал, составляет 0-0,5 %.

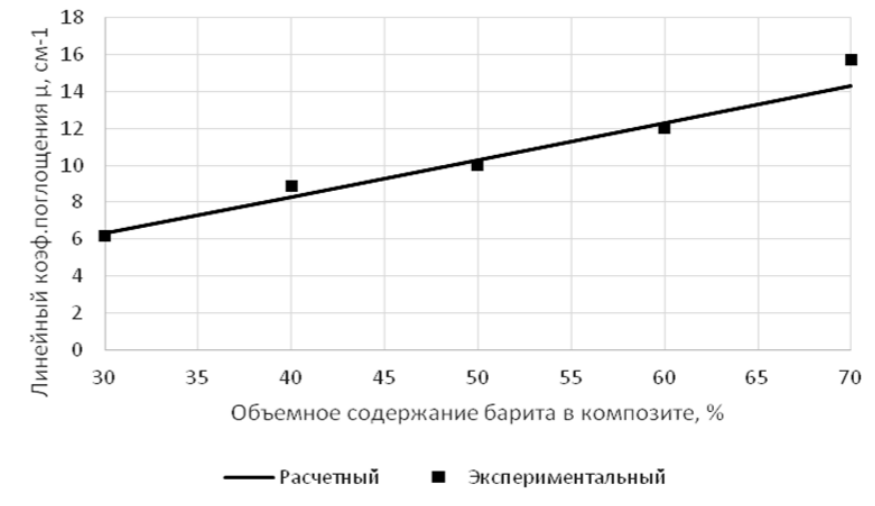


Рис. 1. Изменение линейного коэффициента поглощения при $E=0,059$ МэВ в зависимости от объемного содержания барита

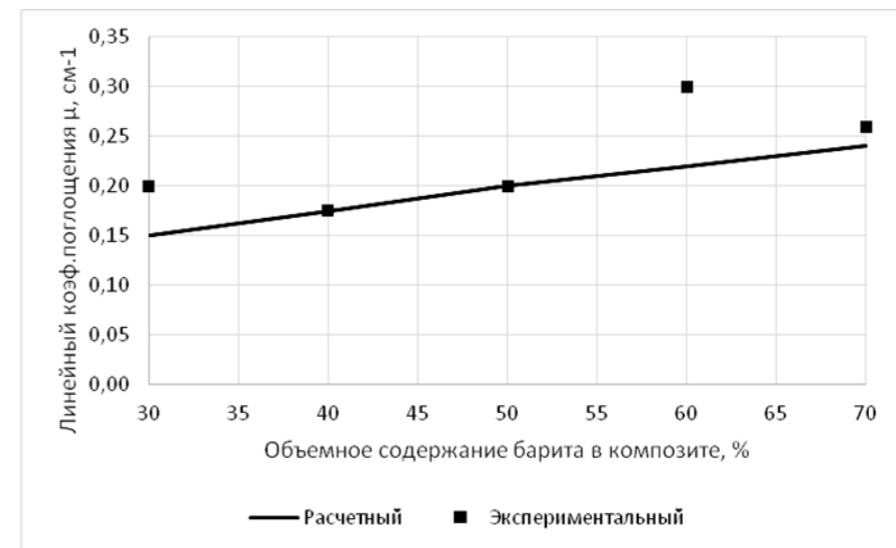


Рис. 2. Изменение линейного коэффициента поглощения при $E=0,661$ МэВ в зависимости от объемного содержания барита

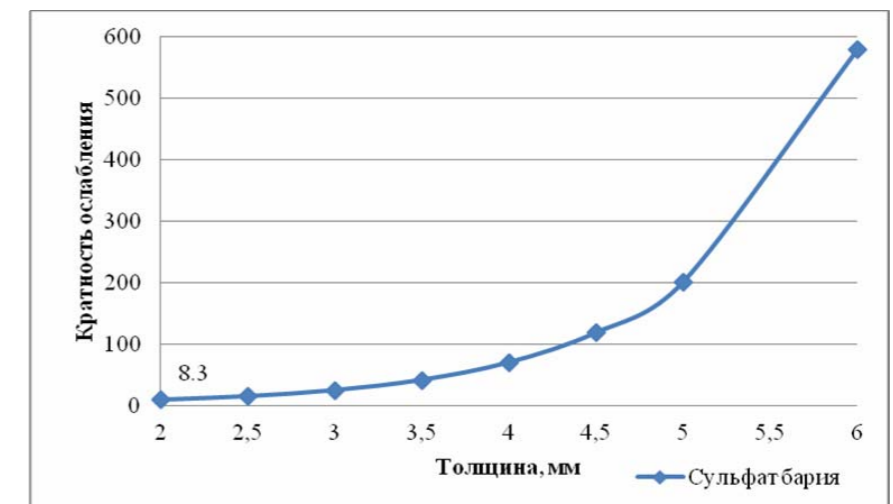


Рис. 3. Зависимость кратности ослабления мощности дозы гамма-излучения от толщины материала с наполнителем сульфатом бария. Энергия облучения 59 кэВ

Выводы

1. В результате теоретических исследований установлены закономерности изменения радиационно-защитных свойств материала от порядкового номера, атомной массы и количества вещества наполнителя.
2. Установлено, что, применяя материалы поглотителя с высокими порядковым номером и атомной массой и в количестве 50-70 %, можно получить материал с высокими радиационно-защитными свойствами.
3. Разработан материал на основе каучука и наполнителя сульфата бария в количестве 52 % по объему. Проведенные исследования показали, что при энергии облучения 59 кэВ для защиты достаточна толщина материала 2–3 мм. При этом количество гамма-квантов, прошедших через материал, составляет 0–0,5 %.

Список литературы

1. Алфимова, Н.И. Современные тенденции развития радиационно-защитного материаловедения / Н.И. Алфимова, С.Ю. Пириев, А.В. Федоренко, М.С. Шейченко, Я.Ю. Вишневецкая // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 4. – С. 20–22.
2. Ястребинский, Р.Н. Композиционный материал для защиты от гамма-излучения / Р.Н. Ястребинский, В.И. Павленко, П.В. Матюхин, Н.А. Четвериков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 17–20.
3. Кошелев, Ф.Ф. Общая технология резины / Ф.Ф. Кошелев, А.Е. Корнев, А.М. Буканов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1978. – С. 503–504.
4. Защищающий от радиации эластомерный материал, многослойная перчатка для защиты от ионизирующего излучения и их применение: пат. 2545350 Рос. Федерация: МПК С 08 К 3/22, А 41 D 19/015 / Ларминьи Жан-Филипп, Матьё Жан-Поль, Герен Доминик, Добровольски Антуан ; заявитель и патентообладатель Арева, Пьеркан. – № 2012107700/05; заявл. 29.07.10; опубл. 27.03.15, Бюл. № 9.
5. Экран для защиты от радиационного излучения: п. м. 156351 Рос. Федерация: МПК G 21 F 3/00 / Артамонова Т.А., Савченкова Г.А., Савченков В.П.; заявитель и патентообладатель ООО «Завод герметизирующих материалов». – № 2015115999/07; заявл. 27.04.15; опубл. 10.11.15, Бюл. № 31.
6. Материал, защищающий от проникающего излучения: пат. 2111559 Рос. Федерация: МПК G 21 F 1/00 / Гончаров С.И., Федотов В.А.; заявитель и патентообладатель Гончаров С.И., Федотов В.А. – № 97109830/25 ; заявл. 26.06.97; опубл. 20.05.98.
7. Кимель, Л.Р. Защита от ионизирующих излучений: справочник / Л.Р. Кимель, В.П. Машкович. – 2-е изд. – М.: Атомиздат, 1972. – 312 с.
8. Чирская, Н.П. Математическое моделирование взаимодействия космических излучений с гетерогенными микроструктурами: дис. ... канд. физ.-мат. наук. 01.04.20, 01.04.16 / Чирская Наталья Павловна. – М., 2014. – 129 с.

References

1. Alfimova, N.I. Current trends in the development of radiation-protective materials science / N.I. Alfimova, S.Yu. Piriev, A.V. Fedorenko, M.S. Sheychenko, Y.Yu. Vishnevskaya // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2017. – No. 4. – P. 20–22.
2. Yastrebinsky, R.N. Composite material for protection against gamma radiation / R.N. Yastrebinsky, V.I. Pavlenko, P.V. Matyukhin, N.A. Chetverikov // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2011. – No. 3. – P. 17–20.
3. Koshelev, F.F. General technology of rubber / F.F. Koshelev, A.E. Kornev, A.M. Bukanov. – 4th ed., rev. and add. – M.: Chemistry, 1978. – P. 503–504.
4. Radiation-protective elastomeric material, multilayer glove for protection against ionizing radiation and their use: US Pat. 2545350 Ros. Federation: IPC S 08 K 3/22, A 41 D 19/015 / Larmigny Jean-Philippe, Mathieu Jean-Paul, Guéren Dominique, Dobrovolski Antoine; Applicant and patentee Areva, Piercan. – No. 2012107700/05; declared 07/29/10; publ. 03/27/15, Bull. Number 9.

5. Screen for protection against radiation: p. 156351 Ros. Federation: IPC G 21 F 3/00 / Artamonova T.A., Savchenkova G.A., Savchenkov V.P.; Applicant and patent holder LLC “Plant of sealing materials”. – No. 2015115999/07; declared 04/27/15; publ. 11/10/15, Bull. Number 31.
6. Material protecting against penetrating radiation: US Pat. 2111559 Ros. Federation: IPC G 21 F 1/00 / Goncharov S.I., Fedotov V.A.; Applicant and patent holder S. Goncharov, V. A. Fedotov – No. 97109830/25; declared 06/26/97; publ. 05/20/98.
7. Kimel, L.R. Protection from ionizing radiation. Directory / L.R. Kimel, V.P. Mashkovich. – 2 ed. – M.: Atomizdat, 1972. – 312 p.
8. Chirskaya, N.P. Mathematical modeling of the interaction of cosmic radiation with heterogeneous microstructures: dis. ... cand. physical-mat. sciences. 04/01/20, 04/01/16 / Chirskaya Natalya Pavlovna. – M., 2014. – 129 p.

УДК 691.327.333: 661.185.74

*Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева*Россия, 430005, Саранск,
ул. Большевикская, д. 68**Черкасов Василий Дмитриевич**,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Прикладная механика»
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru**Бузулуков Виктор Иванович**,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Физическая химия»
E-mail: buzulukov-v@mail.ru**Емельянов Алексей Иванович**,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Прикладная механика»
E-mail: emeljanovai@list.ru**Хазеев Хаким Ильхамович**,
магистрант
E-mail: Hakimiwe@gmail.com**Кротова Виктория Сергеевна**,
магистрант
E-mail: vika.krotova@bk.ru*Mordovian State University
named after N.P. Ogarev*Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.**Cherkasov Vasily Dmitrievich**,
Doctor of Science, Professor,
Head of the department «Applied mechanics»
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru**Buzulukov Victor Ivanovich**,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Physical chemistry»
E-mail: buzulukov-v@mail.ru**Emelianov Aleksey Ivanovich**,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Applied mechanics»
E-mail: emeljanovai@list.ru**Hazeev Hakim Ilhamovich**,
Undergraduate
E-mail: Hakimiwe@gmail.com**Krotova Viktoria Sergeevna**,
Undergraduate
E-mail: vika.krotova@bk.ru

РАЗРАБОТКА ПЕНОБЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗ ПРОДУКТОВ МИКРОБНОГО СИНТЕЗА

В.Д. Черкасов, В.И. Бузулуков, А.И. Емельянов, Х.И. Хазеев, В.С. Кротова

Разработаны оптимальные условия получения белкового пенообразователя строительного назначения из отходов молочной промышленности, молочной сыворотки, предварительно модифицированной микробиологическим способом. Определены основные условия получения пенобетона с хорошими физико-техническими показателями с применением разработанного пенообразователя.

Ключевые слова: пенобетон, пенообразователь, пенообразующие свойства, молочная сыворотка, гидролизат, микроорганизмы

DEVELOPMENT OF FOAM CONCRETE ON THE BASIS OF FOAM GENERATOR FROM MICROBIAL SYNTHESIS PRODUCTS

V.D. Cherkasov, V.I. Buzulukov, A.I. Emelianov, H.I. Hazeev, V.S. Krotova

The most optimal conditions for obtaining a protein frother for construction purposes from waste of the dairy industry, whey, previously modified by microbiological method, have been developed. The basic conditions for the production of foam concrete with good physical and technical characteristics, using the developed foam generator, have been determined.

Keywords: foam concrete, foam generator, foaming properties, whey, hydrolyzate, microorganisms

В последнее годы значительно возросла доля пенобетона в общем объеме производимых строительных материалов на цементном вяжущем, что объясняется широким применением данного вида ячеистого бетона в строительстве зданий любого назначения благодаря его отличным теплотехническим качествам и эксплуатационным показателям. Прочностные характеристики пенобетонных материалов в значительной

степени зависят от используемого пенообразователя. В настоящее время выпускается широкий ассортимент пенообразующих веществ и накоплен большой объем экспериментальных данных по применению их растворов [1-6]. Несмотря на это, подобрать необходимый пенообразователь, дающий высокократную и стойкую пену, совместимый с другими компонентами пенобетонной смеси и при этом не оказывающий негативного влияния на свойства конечного продукта, – очень непростая задача.

Исходя из технико-экономических, производственно-технологических, санитарно-гигиенических и экологических требований, предъявляемых к пенообразователям строительного назначения, наиболее приемлемыми остаются пенообразователи на основе белокосодержащих веществ. С целью расширения сырьевой базы таких веществ в данной работе в качестве исходного сырья использована молочная сыворотка, предварительно обработанная микробиологическим способом. Молочная сыворотка является побочным продуктом при производстве сыров, творога, молочно-белковых концентратов и относится к вторичным сырьевым ресурсам молочного комплекса АПК. Состав и свойства молочной сыворотки обусловлены видом основного продукта, особенностями технологии её получения, а также аппаратным оформлением процесса. Содержание сухих веществ в сыворотке колеблется в пределах 4-7 %, а на долю белковых веществ приходится около 1 %. Пенообразующая способность сыворотки не велика и обусловлена в основном содержанием в ней белковых веществ. Повысить массу белковых веществ в сыворотке можно при переработке молочной сыворотки методом микробной биотехнологии. Как известно, в основе получения продуктов путем микробной биотехнологии лежат или анаэробные процессы (брожение), или процессы окислительные. В первом случае мы имеем дело с продуктами энергетического распада лактозы (кислоты, спирты), во втором – с процессами интенсивного нарастания клеточного материала и синтезом микроорганизмом-продуцентом сложных органических соединений (белки, жиры, витамины и т.д.) [7]. В процессе обработки вторым способом происходит нарастание биомассы, а поскольку тела микроорганизмов в основном состоят из белков, то и содержание белковых веществ в сыворотке повысится. Помимо белковых веществ, в сыворотке содержится большое количество лактозы. Обладая слабой поверхностной активностью, лактоза и её производные не вносят существенного вклада в пенообразующие свойства сыворотки и её гидролизата, поэтому остаются фактически неиспользованными. Наряду с этим, лактоза может выступать в качестве питательного компонента для сбраживающих сыворотку микроорганизмов с последующим преобразованием лактозы в вещества белковой природы.

В использованной в работе подсырной и творожной сыворотке, в зависимости от степени применения компонентов молока в основном продукте, содержание сухих веществ составляло от 4 до 6 %, а белковых веществ колебалось в пределах 0,7–1,0 %. Первоначально были установлены наиболее оптимальные условия получения пенообразователя из сыворотки путем ее гидролиза. Варьировались такие параметры, как продолжительность процесса гидролиза, температура и концентрация гидролизующего вещества. Качество пены оценивалось по таким свойствам, как кратность и стабильность. Опыты по гидролизу растворами серной, азотной и соляной кислот показали малую пенообразующую способность полученного гидролизата. Гидролиз сыворотки растворами гидроксидов калия, натрия и кальция оказался более эффективным, чем кислотный. При этом гидролизат, полученный при использовании гидроксида натрия, имел лучшие поверхностно-активные свойства. Были выявлены следующие оптимальные условия гидролиза сыворотки: весовое соотношение гидроксид натрия : сухие вещества в сыворотке – 1:2, продолжительность гидролиза – 50 мин при температуре среды 95 °С. В качестве стабилизатора пены использован раствор сульфата железа (II). Полученная пена имела кратность, равную 15, стойкость – около 5 %. Стабильность пены определялась по количеству жидкости, выделившейся из пены в течение одного часа (в процентах к исходному количеству взятого для испытания раствора пенообразователя). Экспериментально установлено, что гидролиз сыворотки можно проводить и при более низких температурах без ухудшения

пенообразующих свойств гидролизата, но при этом продолжительность процесса гидролиза необходимо увеличить. Так, при 60 °С потребуется 2 часа, а при 24 °С – 3 суток. В последнем случае кратность пены возрастает до 18, без ухудшения её стабильности. Остаток щелочи в гидролизате нейтрализовывали 20 % раствором серной кислоты, доводя pH среды до 8,5. Выбор серной кислоты обусловлен тем, что образующийся при этом сульфат натрия, как известно, является ускорителем схватывания цементных систем, в то время как соли других кислот в основном негативно влияют на свойства конечной продукции. Изучение влияния содержания сухих веществ на пенообразующие свойства гидролизата показало, что с повышением их концентрации пенообразующая активность возрастает и достигает своего максимального значения при 20–25 г/л. Следует отметить, что в этой же области находится и экспериментально определенное значение ККМ раствора гидролизата. Исследования, проведенные по выявлению веществ, ответственных за пенообразующие свойства гидролизата молочной сыворотки, показали, что таковыми являются только продукты гидролиза белковой составляющей сыворотки. Как предположено выше, повышение белковой массы в сыворотке, например, микробиологическим путем улучшит её пенообразующие свойства. По нашему мнению, наиболее простой путь реализации данной идеи – это проведение самосквашивания молочной сыворотки. Для изучения динамики пенообразующих свойств сыворотки в ходе самосквашивания были выбраны подсырная и творожная сыворотки, которые были подвержены брожению микрофлорой, внесенной в момент её получения. Процесс осуществлялся при 25 °С. Сравнивались два пути брожения сыворотки: анаэробное и окислительное. Анаэробный процесс проводился в закрытых емкостях с периодическим сбросом образующихся газообразных продуктов. Окислительное брожение осуществлялось в открытых емкостях при барботировании воздуха через раствор. Поскольку пенообразующие свойства сыворотки в первом методе самосквашивания оказались немного выше, чем во втором, то в дальнейшем брожение сыворотки проводилось только путем анаэробного брожения. Динамика основных свойств гидролизата сыворотки в ходе брожения представлена в табл. 1, 2.

Т а б л и ц а 1
Свойства творожной сыворотки и её гидролизата

Свойство	Продолжительность брожения, сут					
	0	7	14	22	29	36
Содержание сухих веществ, г/л	63,0	60,3	56,6	50,9	30,8	28,2
Масс. доля белковых веществ в сухих веществах, %	16,3	16,8	19,5	22,3	31,8	41,7
Масс. доля лактозы в сухих веществах, %	83,7	83,2	80,2	77,7	68,2	58,4
Кратность 2 % раствора (pH=8,5)	8	10	12	15	20	10
Стабильность 2 % раствора (pH=8,5)	10	7	6	0	0	0

Т а б л и ц а 2
Свойства подсырной сыворотки и её гидролизата

Свойство	Продолжительность брожения, сут					
	0	7	14	22	29	36
Содержание сухих веществ, г/л	62,0	57,5	56,6	55,0	45,0	37,6
Масс. доля белковых веществ в сухих веществах, %	22,8	18,0	18,5	19,3	22,4	27,4
Масс. доля лактозы в сухих веществах, %	77,2	81,8	81,2	80,9	77,6	72,6
Кратность 2 % раствора гидролизата (pH=8,5)	10	10	11	12	16	21
Стабильность 2 % раствора гидролизата (pH=8,5)	15	13	12	10	0	0

Увеличение массовой доли белковых веществ и уменьшение массовой доли лактозы в сухих веществах в ходе брожения сыворотки до определенного времени (см. табл. 1, 2) может свидетельствовать о частичной переработке лактозы микроорганизмами в белковую массу. Изменение состава сыворотки по мере брожения влечет за собой изменение свойств самой сыворотки и её гидролизата. Оптимальной можно считать следующую продолжительность самосквашивания сыворотки в выбранных условиях: творожная сыворотка 29–30 сут, а подсырная – 40–42 сут. Разницу в оптимальных сроках брожения можно объяснить тем, что при производстве творога происходит более интенсивный гидролиз белков, чем при производстве сыра, поэтому творожная сыворотка на начальном этапе уже частично гидролизована. С целью сокращения продолжительности брожения и дальнейшего повышения качества получаемой пены было проведено сбраживание творожной сыворотки в присутствии таких микроорганизмов, как *Candida utilis*, *Penicillium chrysogenum*, *Xanthomonas campestris*, *Saccharomyces cerevisiae* (дрожжи пекарские). Исследования показали, что кратность и стабильность пены раствора гидролизата сыворотки в ходе брожения возрастали и достигали максимального значения примерно на 3–4 сутки, независимо от использованных микроорганизмов, а затем уменьшались. Хорошие пенообразующие свойства показал гидролизат сыворотки, сбраживание которой производилось в присутствии *Candida utilis* при 27 °С. Использование данного микроорганизма позволило сократить процесс сбраживания сыворотки до трех суток, без ухудшения пенообразующих свойств гидролизата (табл. 3).

Т а б л и ц а 3
Свойства гидролизата сброженной творожной сыворотки

Свойство	Продолжительность брожения творожной сыворотки в присутствии <i>Candida utilis</i> , сут									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кратность 2 % раствора гидролизата (pH=8,5)	14,1	16,4	18,5	16,7	14,5	12,4	9,5	8,2	7,4	7,1
Стабильность 2 % раствора гидролизата (pH=8,5)	8,7	6,5	4,4	2,5	0	0	0	3	8	16

Лабораторные испытания показали, что применение данного пенообразователя позволяет получить устойчивую пену с коэффициентом стойкости в цементном тесте, равным 0,92, что подтверждает возможность его использования в производстве пенобетонных композитов. При этом необходимо придерживаться оптимальных условий использования пенообразователя: pH – 8,5; концентрация сухих веществ в пенообразующем растворе – 2,5 %, содержание стабилизатора в растворе – 0,3 %, время вспенивания – 3 мин.

При разработке условий получения неавтоклавного пенобетона с применением вышерассмотренного пенообразователя в качестве минеральных составляющих пенобетона использовали портландцемент ЦЕМ I42,5 Б, выпускаемый ОАО «Мордовцемент», и наполнитель – тонкомолотый мел (известковая мука с содержанием карбоната кальция 91...92 %, Атемарского месторождения Республики Мордовия), обладающий сравнительно легкой диспергируемостью в воде, особенно при интенсивном перемешивании суспензии, и образующий однородную пенобетонную массу.

Пенобетонную смесь готовили по двухстадийной технологии [8]. Отформованные образцы выдерживали в нормальных условиях в течение 28 суток, после чего проводили испытания.

В связи с тем, что в настоящее время на рынке строительных материалов наиболее востребованы пенобетоны плотностью 600–800 кг/м³, в данной работе разрабатывались пенобетоны вышеуказанной средней плотности.

На начальном этапе исследований было выявлено влияние состава пенобетонной смеси и продолжительности перемешивания на прочность пенобетона с расчетной средней плотностью 700 кг/м^3 с применением метода математического планирования эксперимента [9, 10]. Была принята математическая модель в виде двухфакторного плана второго порядка, в качестве варьируемых факторов выбраны количество наполнителя и продолжительность перемешивания. Параметрами оптимизации были выбраны средняя плотность, прочность материала, осадка пеномассы. Для сравнения прочностных свойств пенобетонов различной плотности применялась такая характеристика, как коэффициент конструктивного качества (ККК) [11].

Анализ полученных данных показал, что на ККК оба фактора оказывают значительное влияние. При снижении содержания наполнителя и увеличении времени перемешивания ККК возрастает (табл. 4). На основе анализа изменения средней плотности делаем вывод, что возрастание значений обоих факторов приводит к увеличению плотности. Таким образом, получение пенобетона заданной плотности с максимальным значением ККК (прочностью при сжатии 2,6 МПа) возможно при оптимальном соотношении цемента и мела 0,8:0,2 и продолжительности перемешивания 3 мин.

Т а б л и ц а 4

Зависимость свойств пенобетона от количества наполнителя и продолжительности перемешивания растворной смеси

Свойства пенобетона	Факторы, влияющие на свойства пенобетона					
	Количество наполнителя, % от массы сухих веществ			Продолжительность перемешивания растворной смеси, мин		
	20	25	30	2	3	4
Плотность	710	734	773	714	710	727
ККК	5,2	4,8	4,5	4,9	5,2	5,1

С учетом полученных результатов эксперимента произведен расчет состава для приготовления 1 м^3 пенобетона плотностью 700 кг/м^3 (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Состав и свойства пенобетона

Состав						Плотность, кг/м^3	Прочность при изгибе, МПа	Прочность при сжатии, МПа
Цемент, кг	Известковая мука, кг	Вода, л	Пенообразователь					
			Гидролизат, л	Стабилизатор*, л	Вода, л			
488	122	165	8,3	0,6	32,5	700	0,26	2,6

* – 20 %-й раствор сульфата железа (II).

Физико-технические свойства пенобетонных образцов определяли в возрасте 28 суток после твердения в н. у. Было установлено, что пенобетоны средней плотностью 700 кг/м^3 , полученные на основе разработанного белкового пенообразователя из продуктов микробного синтеза, по морозостойкости и теплопроводности соответствуют требованиям ГОСТ для ячеистых бетонов. Так, прочность образцов после 30 циклов попеременного замораживания и оттаивания снизилась на 2,8 %. К важным показателям свойств пенобетонов относится деформация усадки. Снижение усадки является наиболее сложной задачей совершенствования технологии пенобетона естественного твердения. Изучение деформации усадки пенобетонов из сухих смесей в течение 98 суток показало, что наиболее интенсивно процесс усадки происходит в течение первых 30 суток. Согласно полученным данным величина усадки пенобетона средней плотности 700 кг/м^3 составляет $1,4 \text{ мм/м}$ (по требованиям ГОСТ для ячеистых бетонов – не более 3 мм/м).

Результаты проведенных исследований позволяют определить технологические параметры получения эффективного, относительно недорогого и экологически безопасного пенообразователя из отходов молочной промышленности. Разработанные составы могут быть использованы в технологии пенобетона с высокими физико-техническими свойствами.

Список литературы

1. Славчева, Г.С. Теплоэффективные пенобетоны нового поколения для малоэтажного строительства / Г.С. Славчева, Е.М. Чернышов, М.В. Новиков // Строительные материалы. – 2017. – № 7. – С. 20–24.
2. Иванов, И.А. Оценка свойств синтетических пенообразователей для пенобетона / И.А. Иванов, В.М. Жмыхов // Строительные материалы. – 2007. – № 7. – С. 33–34.
3. Безбородов, В.Г. К вопросу об устойчивости минерализованных пен для получения материалов ячеистой структуры / В.Г. Безбородов, В.Ф. Завадский, Т.Ю. Никулина // Изв. вузов. Строительство. – 2002. – №12. – С. 29–33.
4. Моргун, В.Н. Обоснование влияния корреляционной связи «расход ПАВ – агрегативная устойчивость» на качество пенобетона / В.Н. Моргун // Строительные материалы. – 2009. – № 8. – С. 29–33.
5. Черкасов, В.Д. Пенообразователь для цементных систем / В.Д. Черкасов, В.И. Бузулуков, А.И. Емельянов // Вестник Волжского регионального отделения РААСН. – 2015. – Вып. 18 – С. 182–183.
6. Леонович, С.Н. Сухая смесь для получения жаростойкого пенобетона / С.Н. Леонович, Д.В. Свиридов, А.Л. Беланович, В.П. Савенко, С.А. Карпушенков // Строительные материалы. – 2017. – № 7. – С. 25–29.
7. Залашко, М.В. Биотехнология переработки молочной сыворотки / М.В. Залашко. – М.: Агропромиздат, 1990. – 192 с.
8. Завадский, В.Ф. Технология изоляционных строительных материалов и изделий. Ч. I: Стеновые материалы и изделия / В.Ф. Завадский – М.: Академия, 2012. – 189 с.
9. Красовский, В.А. Планирование эксперимента / В.А. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – Минск: Изд-во БГУ им. В.И. Ленина, 1982. – 302 с.
10. Вознесенский, В.А. Методические указания по построению математических моделей / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – Одесса: ОИСИ, 1982. – 94 с.
11. Воробьев, В.А. Строительные материалы / В.А. Воробьев, А.Г. Комар. – М.: Стройиздат, 1976. – 475 с.

References

1. Slavcheva, G.S. Heat-efficient foam concrete of a new generation for low-rise construction / G.S. Slavcheva, E.M. Chernyshov, M.V. Novikov // Construction materials. – 2017. – № 7. – P. 20–24.
2. Ivanov, I.A. Evaluation of the properties of synthetic foaming agents for foam concrete / I.A. Ivanov, V.M. Zhmykhov // Construction materials. – 2007. – № 7. – P. 33–34.
3. Bezborodov, V.G. On the question of the stability of mineralized foams for the production of materials of cellular structure / V.G. Bezborodov, V.F. Zavatsky, T.Yu. Nikulin // Izv. universities. Building. – 2002. – №12. – P. 29–33.
4. Morgun, V.N. Substantiation of the influence of the correlation relation “surfactant consumption – aggregative stability” on the quality of foam concrete / V.N. Morgun // Construction materials. – 2009. – № 8. – P. 29–33.
5. Cherkasov, V.D. Frother for cement systems / V.D. Cherkasov, V.I. Buzulukov, A.I. Yemelyanov // Bulletin of the Volga regional branch RAASN. – 2015. – Vol. 18. – P. 182–183.

6. Leonovich, S.N. Dry mix for heat-resistant foam concrete / S.N. Leonovich, D.V. Sviridov, A.L. Belanovich, V.P. Savenko, S.A. Karpushenkov // Construction materials. – 2017. – № 7. – P. 25–29.
7. Zalashko, M.V. Biotechnology of whey processing / M.V. Zalashko. – M.: Agropromizdat, 1990. – 192 p.
8. Zavadsky, V.F. Technology of insulating building materials and products. Part I: Wall materials and products / V.F. Zavadsky. – M.: Akademiya, 2012. – 189 p.
9. Krasovsky, V.A. Experiment Planning / V.A. Krasovsky, G.F. Filaret. – Minsk: Publishing House of BSU named after IN AND. Lenin, 1982. – 302 p.
10. Voznesensky, V.A. Guidelines for the construction of mathematical models / V.A. Voznesensky, T.V. Lyashenko, B.L. Ogarkov. – Odessa: OICI, 1982. – 94 p.
11. Vorobiev, V.A. Building materials / V.A. Vorobev, A.G. Komar. – M.: Stroyizdat, 1976. – 475 p.

УДК 519.7:691

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

Будылина Евгения Александровна,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Инфокогнитивные
технологии»
E-mail: bud-ea@yandex.ru

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

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

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

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

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

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

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

Danilov 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

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

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

Рассматриваются основные аспекты математического моделирования как метода познания и технологии решения прикладных задач. Предлагается единая концепция проектирования сложных систем с системными атрибутами, в том числе управляемых в пространстве технических систем, на основе решения комплекса взаимосвязанных задач. На примерах иллюстрируется трансфер методов синтеза эргатических систем на разработку композиционных материалов с регулируемой структурой и свойствами.

Ключевые слова: сложные системы, технология синтеза, математическое моделирование, эргатические транспортные системы, оператор, управляющие воздействия, оценка качества объекта, функционал качества, композиты, трансфер методов синтеза

METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF DESIGNING COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS

Е.А. Budylina, I.A. Garkina, A.M. Danilov

The basic aspects of mathematical modeling as a method of cognition and technology of solving applied problems are considered. A unified design concept for complex systems with system attributes, including those controlled in the space of technical systems, is proposed based on the solution of a set of interrelated tasks. The examples illustrate the transfer of methods for the synthesis of ergatic systems to the development of composite materials with adjustable structure and properties.

Keywords: complex systems, synthesis technology, mathematical modeling, ergatic transport systems, operator, control actions, object quality assessment, quality functional, composites, transfer of synthesis methods

В самом широком смысле под идентификацией понимается выработка точного языка описания реальности и соответствующих понятий и категорий, то есть понятий крайне высокого, насколько это возможно, уровня. Сложность понятий – цена за простоту языка описания реальности, законов ее функционирования. В каждый конкретный исторический период могут быть недостаточными ресурсы для получения с заданной точностью необходимого для решения практической проблемы описания реальности. Возникает необходимость использования присущих только человеку способностей в процессе управления. Более того, любая система или непосредственно в явном виде содержит человеческий фактор, или является элементом системы, которая содержит человеческий фактор подобным образом. Так что любая эффективная методология идентификации должна включать процесс человеческого выбора, так как именно в результате выбора вырабатывается текущее управление процессом идентификации.

Приводимая ниже методология применялась при решении задач идентификации в весьма разных областях приложений [1...5]: разработка и управление качеством материалов специального назначения, авиакосмические тренажеры для подготовки операторов, анализ экологической опасности от деятельности объектов по хранению и уничтожению химического оружия, идентификация и синтез образовательной системы и др. Во всех рассматриваемых задачах в соответствии с введенной иерархией критериев и выделенными комплексами решаемых частных задач строится иерархическая структура системы с оценками её элементов, которая и служит основой перспективного планирования всего комплекса разработок и отдельных систем. Декомпозиция системы в рамках указанных иерархий продолжалась до получения на нижнем уровне элементов, принадлежащих разработанным типам, или формулировки задачи создания необходимых элементов [6, 7]. Зависимости между критериями выявлялись методами факторного анализа и математической статистики; закономерности получались на основе процедур оценки гипотез и взвешивания факторов. Так, при синтезе материалов специального назначения, связанном с выбором рецептуры, технологии и способов управления качеством, использовались различные способы оптимизации параметров системы, в том числе векторной оптимизации. Неопределенность целей [8, 9] преодолевалась использованием линейной свертки, введением некоторых контрольных показателей, построением множеств Парето. При анализе и синтезе эргатических систем [10, 11] с участием в процессе управления человека-оператора задача усложнялась трудностями формализации деятельности оператора по управлению объектом, оценки переноса навыков управления имитатором динамики объекта управления эргатической системы на управление реальным объектом.

Разработка единой концепции проектирования сложных управляемых в пространстве технических систем производилась на основе решения комплекса взаимосвязанных задач:

- формализация управляющих движений оператора,
- определение параметров управляющих движений как непрерывного, дискретного, импульсного процессов, потока заявок, временного ряда и др.,
- разработка функционалов качества для объективной оценки оператором динамических характеристик объекта,
- определение связей между техническими параметрами объекта и функционалами качества,
- выбор структуры имитаторов динамики объекта с точки зрения формирования у обучаемых требуемых навыков управления,
- настройка параметров имитаторов,
- выбор параметров вычислительного цикла с учетом влияния временного запаздывания в имитаторах, динамических характеристик объекта и т.д.

При синтезе материалов специального назначения с регулируемой структурой и свойствами использовалась обобщенная модель и осуществлялась параметрическая идентификация каждого из наиболее распространенных видов кинетических процессов. С учетом быстрого роста стоимости, трудностей перенастройки и модернизации

систем предполагалась модульность структуры и программно-математического обеспечения.

В общем случае сложность и многообразие процессов функционирования реальных систем не позволяют получить абсолютно адекватные математические модели. Математическая модель, описывая формализованный процесс функционирования системы, охватывает только основные, характерные закономерности (невозможно указать формальные правила для выбора характеристик состояний и параметров исследуемых реальных систем). Исследователь вынужден руководствоваться лишь собственной интуицией, опирающейся на постановку прикладной задачи и понимание природы процессов функционирования системы. С общетеоретической точки зрения моделирование есть метод научного познания, а с практической – технология решения прикладных научно-технических задач. Математизация, развитие и применение математических моделей и математического аппарата в ближайшие годы будут лишь усиливаться. Этим объясняется возросший интерес к тому, как именно осуществляется процесс применения математики: как создаются математические модели, как они изучаются, как интерпретируются и т.д. В то же время этот вопрос все еще изучен поразительно слабо. При этом, конечно, речь идет не о многочисленных конкретных случаях применения математики, а об изучении общих законов этого применения. Нет особых путей в приложениях математики, позволяющих избежать кропотливого освоения, развития и применения современных математических методов, необходимых для того или иного исследования. Призывы к гибкости, адекватности и гармонии при использовании математических моделей не имеют ничего общего с вульгаризацией.

Существуют различные методы идентификации, основанные на разных подходах к форме задания идентификационных моделей (дифференциальные уравнения, разностные уравнения, передаточные функции, градиентные выражения и т.п.). Но ни один из методов идентификации не годится для идентификации всех видов систем.

Анализ каждой сложной системы непосредственно связан с использованием системного подхода: отдельные части системы настолько сильно взаимосвязаны между собой множеством прямых и обратных связей, что изменение одной из них может повлечь за собой значительные изменения в других ее частях. Часто не работает метод декомпозиции: надо систему оценивать и анализировать как целостную, единую.

Идентификационный подход еще окончательно не оформился; доминирует математический уровень строгости: математический язык рассматривается как наилучшее средство представления системы; нельзя управлять системой, если она не идентифицирована (заранее либо в процессе управления). При математическом моделировании не всегда требуется компьютерная поддержка. Более того, аналитические решения обычно удобнее и информативнее численных, но их применение связано с относительной сложностью по сравнению с численными. Существенным является и число входных воздействий, методы идентификации значительно проще при одном входном воздействии.

Укажем ряд существенных замечаний:

– задача идентификации, как обратная, относится к классу некорректных задач; необходима оценка влияния ошибок идентификации на качество управления системой по результатам идентификации;

– никакими методами невозможно идентифицировать динамические параметры системы, находящейся в установившемся режиме (идентификация динамических параметров на основании измерений возможна только в случае, когда измерения выполнены в период переходного состояния системы);

– параметры нелинейных систем при идентификации должны принадлежать к заранее заданному виду: параметр, наилучшим образом описывающий систему при одной форме представления, может оказаться совершенно неудовлетворительным при другом описании системы;

– адекватность системной модели объекту изучения нельзя доказать: модель может быть принята либо отвергнута лишь с учетом наблюдений.

Отметим, адекватность достигается сужением сферы использования данной системной модели, ограниченностью ее практической применимости. Адекватность повышается за счет модельных экспериментов: появляются новые знания интуитивного характера, которые могут использоваться для настройки свойств модели с учетом свойств изучаемого объекта. Процесс моделирования позволяет глубже проникнуть в существо объекта-оригинала, а модельные исследования приводят к открытию новых свойств и закономерностей функционирования изучаемой системы.

Таким образом, системный подход к анализу и синтезу сложных систем состоит в упрощении сложности и ограничении разнообразия формализованного описания системы (работа исследователя) с учетом возможного проявления свойств, неопределенности состояния системы (свойства реальной системы).

Приведем результаты практической реализации системного подхода к математическому моделированию сложных эргатических систем. Подготовка операторов транспортных эргатических систем с использованием тренажных и обучающих комплексов связана с решением целого ряда сложных задач, в числе которых определение параметров и разработка функционалов качества для оценки управляющих воздействий, а также методов оценки имитационных характеристик тренажеров транспортных систем. Известно, деятельность оператора в эргатической системе есть поведенческий акт, включающий процессы восприятия и переработки информации, формирование и выполнение на этой основе двигательных действий. Использовались модели вида

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{f},$$

$$\mathbf{T}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{u} = \mathbf{P}\mathbf{x} + \mathbf{Q}\dot{\mathbf{x}},$$

где \mathbf{x} , \mathbf{u} , \mathbf{f} – векторы фазовых координат, управляющих и возмущающих воздействий; \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{P} , \mathbf{Q} – матрицы соответствующих размерностей, \mathbf{T} – вектор-столбец постоянных времени. Почти вся информация, воспринимаемая оператором, реализуется в управляющих движениях. В структуре сенсомоторного навыка управления двигательный компонент является интегральным показателем, отражающим полноту и качество переработки оператором информации, поступающей по каналам различных анализаторов. Именно поэтому при синтезе тренажеров, оптимизации математических моделей транспортных средств, оценке имитационных характеристик тренажеров целесообразно исходить из характеристик разности $[u_c(t) - u_t(t)]$ управлений, формируемых оператором на реальном объекте и тренажере. При таком подходе оптимизация математических моделей и их корректировка должны производиться в два этапа: на первом достигается соответствие технических характеристик тренажера характеристикам реального объекта, а на втором обеспечивается сближение структуры управляющих движений оператора.

Управление $u(t)$ можно рассматривать как последовательность импульсов разной формы, следующих друг за другом через некоторые промежутки времени. При заданной форме импульсов в числе случайных параметров импульсов будут высота (или амплитуда) A_v , длительность τ_v , время появления t_v . При представлении управления как узкополосного случайного процесса в качестве характеристик стиля управления по каждому из каналов использовались параметры внутренней структуры центрированных случайных функций управлений, где

$$M[u_j(t)] = \frac{1}{2T_0} \int_{-T_0}^{T_0} u_j(t) dt$$

зависит от выбора интервала усреднения $2T_0$. Выбор значения T_0 производился по доминирующей в $u_j(t)$ частоте $\omega_c = 2\pi f_c$; $f_c = T_c^{-1}$ (принималось $T_0 = 0,5T_c$). Если

на инерционную систему воздействуют неперекрывающиеся импульсы $(t_v + \tau_{v+1} \leq t_{v+1}, v = 0, 1, 2, \dots)$, то на выходе системы, как правило, получаются перекрывающиеся импульсы.

Известно, что оценка оператором характеристик объекта управления, вид и структура управляющих воздействий существенно зависят от собственных частот колебаний ω_k и безразмерных коэффициентов демпфирования $\xi_k, k \leq \frac{n}{2}$ (собственных чисел $\lambda_s = \alpha_s + i\beta_s$ матрицы \mathbf{A}). Предпочтительными с инженерно-психологической точки зрения считаются значения $\omega_k \in (3 \dots 4, 5), c^{-1}$; $\xi_k \approx 0,5$.

Непосредственно из физики процесса управления следует, что управляющие воздействия оператора, адаптированного к конкретному объекту, в каждом из каналов в качестве доминирующей составляющей будут содержать гармонику с частотой, близкой к собственной частоте колебаний в этом канале. Наличие перекрестных связей между каналами управления, естественно, может привести к заметному появлению в управляющих воздействиях одного канала гармоник, соответствующих собственным колебаниям по другому каналу. Таким образом, в числе объективных характеристик структуры управляющих воздействий можно использовать оценки ω_k локальных максимумов спектральной плотности $S_{u_k}(\omega)$ (при ее вычислении можно воспользоваться методом быстрого преобразования Фурье; а при сглаживании – различными окнами, например Ханна). Чем меньше ξ_k и чем лучше оператор приспособился к значению ω_k , тем больше значение $S_{u_k}(\omega_k)$. Адаптация оператора к значениям параметров ω_k и ξ_k оценивалась по

$$D_k = \int_{\omega_k - \Delta\omega'_k}^{\omega_k + \Delta\omega''_k} S_{u_k}(\omega) d\omega,$$

$$P_k = P(\omega_k - \Delta\omega'_k < \omega < \omega_k + \Delta\omega''_k),$$

D_k и P_k – соответственно дисперсия, приходящаяся на участок

$$\omega_k - \Delta\omega'_k < \omega < \omega_k + \Delta\omega''_k,$$

и вероятность попадания частоты ω в управляющих воздействиях оператора на этот участок.

Оказалось, что параметры $D_k, P_k, \Delta\omega'_k, \Delta\omega''_k$ достаточно полно характеризуют управляющие воздействия оператора как непрерывную случайную функцию. Если $\omega_{k0}, P_{k0}, D_{k0}$ соответствуют идеальному оператору (этalonу), то $\omega_k - \omega_{k0}, P_k - P_{k0}, D_k - D_{k0}$ можно рассматривать как объективные показатели формирования у обучаемых требуемого навыка управления. Поэтому аддитивный глобальный критерий качества управления принимался в виде

$$K_u = \sum_j c_j K_j = \sum_j c_j \sum_k (\alpha_{jk} |\Delta\tilde{\omega}_k| + \beta_{jk} |\Delta\tilde{P}_k| + \gamma_{jk} |\Delta\tilde{D}_k|),$$

$$\Delta\tilde{\omega}_k = \left| \frac{\omega_k - \omega_{k0}}{\sigma[\omega_k - \omega_{k0}]} \right|, \Delta\tilde{P}_k = \left| \frac{P_k - P_{k0}}{\sigma[P_k - P_{k0}]} \right|, \Delta\tilde{D}_k = \left| \frac{D_k - D_{k0}}{\sigma[D_k - D_{k0}]} \right|.$$

Определение весовых констант c_j осуществлялось, исходя из уровня корреляционной связи между K_u и K_j , а констант $\alpha_{jk}, \beta_{jk}, \gamma_{jk}$ – по связи между K_j и $\Delta\tilde{\omega}_k, \Delta\tilde{P}_k, \Delta\tilde{D}_k$. Если $S(\omega)$ симметрична относительно ω_0 , то $S(\omega) \neq 0$ при

$\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2} \leq \omega \leq \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}$; $\Delta\omega \ll \omega_0$. Если $S(\omega)$ несимметрична относительно ω_0 , то

$$\text{принималось } \omega_0 = 2\pi \frac{\int_0^{\infty} \omega S(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} S(\omega) d\omega}.$$

Параметры управляющих воздействий оператора зависят от концептуальной модели движения транспортного средства и качественной оценки оператором его динамических характеристик. Формализация этой оценки является особенно актуальной при разработке тренажных и обучающих комплексов для подготовки операторов транспортных систем. Для решения этой задачи можно воспользоваться параметрами переходных процессов в системе. Так, переходные процессы в асимптотически устойчивой линейной системе

$$\dot{y} = \mathbf{S}y(t) + \mathbf{f}(t)$$

определяются собственными числами матрицы \mathbf{S} ; длительность переходных процессов определяется значением $\Phi_1(\mathbf{S}) = -\frac{1}{\max \operatorname{Re} \lambda_i}$; параметры колебательности –

$$\text{значениями } \Phi_2(\mathbf{S}) = \max_i \left| \frac{\operatorname{Im} \lambda_i}{\operatorname{Re} \lambda_i} \right| \text{ и } \Phi_3(\mathbf{S}) = \max_i |\operatorname{Im} \lambda_i|.$$

Поэтому объективная оценка оператором динамических характеристик объекта оценивалась по функционалу качества

$$\Phi(\mathbf{S}) = -a \frac{1}{\max \operatorname{Re} \lambda_i} + b \max_i \left| \frac{\operatorname{Im} \lambda_i}{\operatorname{Re} \lambda_i} \right| + c \max_i |\operatorname{Im} \lambda_i| + d \frac{1}{\min \operatorname{Im} \lambda_i}. \quad (1)$$

Последние два слагаемых ограничивают собственные частоты колебаний системы как сверху, так и снизу; второе слагаемое определяет уровень колебательности системы. Система \mathbf{S} тем лучше, чем меньше величина $\Phi(\mathbf{S})$; a, b, c, d – весовые константы. Система относилась к классу k с оценкой $\Phi(\mathbf{S})$ при

$$d_{k-1} < \Phi(\mathbf{S}) \leq d_k; \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

N – бальность шкалы (в авиации – шкала Купера – Харпера с $N=10$).

Композиционные материалы (сложные системы) в известной мере можно рассматривать как частный случай эргатической системы (отсутствует человек-оператор). Неудивительно, что успешно был осуществлен трансфер методов объективизации оценки эргатических систем по функционалу (1) и для оценки качества композиционных материалов как сложных систем с системными атрибутами [12...17].

Список литературы

1. 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.
2. Будылина, Е.А. Аналитическое определение имитационных характеристик тренажных и обучающих комплексов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, С.А. Пылайкин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6–4. – С. 698–702.
3. Данилов, А.М. Обобщенная математическая модель управления безопасностью арсеналов и баз хранения боеприпасов / А.М. Данилов, О.А. Голованов, И.А. Гарь-

кина, А.А. Плющ // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007. – № 1. – С. 241.

4. Данилов, А.М. Безопасность транспортных систем: разработка имитаторов / А.М. Данилов, Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.С. Махонин // Отраслевые аспекты технических наук. – 2013. – № 5 (29). – С. 03–08.
5. Данилов, А.М. Методологические принципы оценки качества образовательной системы / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, И.В. Маркелова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. – С. 161.
6. Гарькина, И.А. Управление в сложных технических системах: методологические принципы проектирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 1. – С. 39–42.
7. Данилов, А.М. Строительное материаловедение: комплексные исследования, системный анализ / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 1 (30). – С. 42–46.
8. Будылина, Е.А. Композиты с системных позиций / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 2 (39). – С. 5–10.
9. Данилов, А.М. Системное проектирование композитов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 3 (28). – С. 45–49.
10. Данилов, А.М. Методы теории эргатических систем в материаловедении / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 3 (36). – С. 71–74.
11. Будылина, Е.А. Структурная и параметрическая идентификация сложных эргатических систем / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Р.Л. Дулатов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–5. – С. 919–922.
12. 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.
13. 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. 5–11.
14. 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.
15. Garkina, I.A. Composite materials: identification, control, synthesis / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 032005.
16. Гарькина, И.А. Единая концепция системного проектирования сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1 (38). – С. 119–123.
17. Данилов, А.М. Проектирование системного объекта: моделирование, управление / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 4 (25). – С. 98–101.

References

1. Garkina, I.A. Experience in the development of composite materials: some aspects of mathematical modeling / I.A. Garkina, A.M. Danilov // News of higher educational institutions. Construction. – 2013. – № 8 (656). – P. 28–33.
2. Budylyna, E.A. Analytical determination of the simulation characteristics of training and educational complexes / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov, S.A. Pylaykin // Basic research. – 2014. – № 6–4. – P. 698–702.
3. Danilov, A.M. A generalized mathematical model for managing the security of arsenals and ammunition storage bases / A.M. Danilov, O.A. Golovanov, I.A. Garkina,

A.A. Plyusch // News of the Khmelnytsky National University. Technical sciences. – 2007. – №1. – P. 241.

4. Danilov, A.M. Safety of transport systems: development of simulators / A.M. Danilov, E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.S. Makhonin // Sectoral aspects of technical sciences. – 2013. – № 5 (29). – P. 03–08.

5. Danilov, A.M. Methodological principles for assessing the quality of the educational system / A.M. Danilov, I.A. Garkina, I.V. Markelova // Modern problems of science and education. – 2014. – № 2. – P. 161.

6. Garkina, I.A. Management in complex technical systems: methodological design principles / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2012. – № 1. – P. 39–42.

7. Danilov, A.M. Building materials science: comprehensive research, system analysis / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2017. – № 1 (30). – P. 42–46.

8. Budylna, E.A. Composites from a systemic position / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2019. – № 2 (39). – P. 5–10.

9. Danilov, A.M. System design of composites / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2016. – № 3 (28). – P. 45–49.

10. Danilov, A.M. Methods of the theory of ergatic systems in materials science / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 3 (36). – P. 71–74.

11. Budylna, E.A. Structural and parametric identification of complex ergatic systems / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov, R.L. Dulatov // Basic research. – 2015. – № 2–5. – P. 919–922.

12. Garkina, I.A. The evolution of ideas about composite materials from the perspective of a paradigm shift / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Building materials. – 2018. – № 1–2. – P. 60–62.

13. 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). – P. 5–11.

14. 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.

15. Garkina, I.A. Composite materials: identification, control, synthesis / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 032005.

16. Garkina, I.A. Unified concept of system design of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2019. – № 1 (38). – P. 119–123.

17. Danilov, A.M. System object design: modeling, management / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2015. – № 4 (25). – P. 98–101.

УДК 625.73:678

Белгородский государственный
технологический университет
им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, г. Белгород,
ул. Костюкова, 46

Бондаренко Светлана Николаевна,
старший преподаватель кафедры
«Автомобильные и железные дороги»
E-mail: sveta-zolotykh@yandex.ru

Гридчин Анатолий Митрофанович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Автомобильные и железные
дороги»

Лебедев Михаил Сергеевич,
кандидат технических наук,
научный сотрудник
E-mail: michael1987@yandex.ru

Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St.

Bondarenko Svetlana Nikolaevna,
Senior lecturer of the department «Roads and
Railways»
E-mail: sveta-zolotykh@yandex.ru

Gridchin Anatoly Mitrofanovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Roads and Railways»

Lebedev Mikhail Sergeevich,
Candidate of Sciences, research scientist
E-mail: michael1987@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ВВЕДЕНИЯ ПОЛИМЕРНО-МИНЕРАЛЬНОЙ КОМПОЗИЦИИ NICOFOK НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТОБЕТОНА*

С.Н. Бондаренко, А.М. Гридчин, М.С. Лебедев

Представлены результаты исследования физико-механических свойств и структуры грунтобетонных на основе грунтов с разным числом пластичности при различных способах введения полимерно-минеральной композиции Nicosflok в смесь: в виде композиционного минерального вяжущего, полученного совместным помолем с портландцементом, и в виде однородной механически перемешанной смеси портландцемента с добавкой.

Ключевые слова: грунтобетон, комплексное вяжущее, точная дозировка стабилизатора, полимерно-минеральная композиция Nicosflok, механохимический активатор

INFLUENCE OF THE METHOD OF INTRODUCTION POLYMER-MINERAL COMPOSITION NICOFOK ON THE CHARACTERISTICS OF SOIL-CONCRETE

S.N. Bondarenko, A.M. Gridchin, M.S. Lebedev

Researches of physical and mechanical characteristics and structure of soil concretes on the basis of soils with different plasticity number by different methods of introducing polymer-mineral composition Nicosflok into the mixture: in the form of a composite mineral binder obtained by joint grinding with Portland cement, and in the form of a homogeneous mechanically mixed mixture of Portland cement with an additive are presented.

Keywords: soil-concrete, complex binder, exact dosage of stabilizer, polymer-mineral composition Nicosflok, mechanochemical activator

* Работа выполнена в рамках реализации Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова с использованием оборудования на базе Центра Высоких Технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

В последнее время в практике дорожного строительства широко используется метод укрепления грунтов, что обусловлено высокими темпами строительства транспортных сооружений. Данное научное направление – дорожное грунтоведение – сформировалось еще в середине 20-х годов прошлого века и занимается разработкой и изучением способов улучшения отдельных свойств грунтов, а именно изменением первоначальных свойств пород и превращением несвязной системы в монолитную массу с новыми физико-механическими свойствами. Такое превращение можно обеспечить только путем внесения оптимального количества добавок вяжущих и стабилизаторов, последовательного выполнения установленных технологических операций с обязательным использованием высокопроизводительных специализированных машин [1].

При укреплении грунтов используют «местные грунты» с числом пластичности не более 22 по ГОСТ 25100-2011, органическое или неорганическое вяжущее и различные добавки-стабилизаторы, которые вводят либо в виде порошкообразного вещества, либо в виде раствора.

В зависимости от введения перечисленных веществ (компонентов) в грунт конечным материалом могут быть [2]:

а) стабилизированные грунты, полученные по технологии перемешивания при оптимальной влажности с малыми дозами активных стабилизирующих добавок, не являющихся вяжущими;

б) комплексно стабилизированные грунты, полученные по технологии перемешивания при оптимальной влажности с малыми дозами стабилизирующих добавок и небольшим содержанием органических или минеральных вяжущих (до 2 %);

в) комплексно укрепленные грунты, полученные по технологии перемешивания при оптимальной влажности с малыми дозами стабилизирующих добавок и вяжущих материалов в концентрации более 2 %.

Каждый вид обработки грунтов (укрепления грунтов) преследует свою цель. Так, первый метод используется для улучшения водно-физических свойств (гидрофобизация, снижение морозного пучения и оптимальной влажности) глинистых грунтов. Применяя технологию комплексной стабилизации, можно повысить прочностные характеристики и водно-физические свойства глинистых грунтов, а комплексное укрепление грунтов, в свою очередь, дает возможность увеличить прочность на изгиб, трещиностойкость и морозостойкость укрепленных грунтов [3].

На практике наиболее востребованной является технология комплексно укрепленных грунтов с применением вяжущего – портландцемента – и различных добавок-стабилизаторов. Основными технологическими операциями при этом являются: размельчение глинистых грунтов (производится в камере ротора-смесителя), точное дозирование вяжущих и стабилизаторов, перемешивание данных материалов до однородной смеси, её увлажнение до требуемой оптимальной влажности, последующие уплотнение готовой смеси до максимальной плотности и уход за уплотненным слоем из укрепленного грунта [4].

Особенно важной частью технологических операций является точная дозировка стабилизаторов, вводимых в грунтовую смесь, согласно рецептуре, разработанной в лаборатории по подбору состава грунтобетона. Но на практике не всегда удается достигнуть точности дозирования, в связи с чем снижаются прочностные характеристики грунтобетонного слоя, которые закладывались при проектировании всей конструкции, что влечет за собой увеличение затрат на ремонт при эксплуатации объектов.

В качестве решения этой проблемы можно предложить применение вяжущего, включающего в себя стабилизатор, что позволит избежать неточности дозирования стабилизатора при строительстве земляного полотна транспортных объектов и оптимизирует технологию строительства [5].

Проводилось исследование экспериментальных составов грунтобетона, полученных с использованием различных грунтов, вяжущих и стабилизатора. Было выбрано три различных типа грунтов (суглинок, супесь, песок), в которые вводился портландцемент совместно со стабилизатором, в роли которого выступала полимерно-мине-

ральная композиция (ПМК) Nicoflok российского производства (представляющая собой гранулированный порошок) [6].

Для изготовления грунтобетона применялись следующие составы вяжущих: 1. Ц1 – портландцемент (без ПМК Nicoflok), взятый за контроль; 2. Ц2 – портландцемент, смешанный вручную с 10 % ПМК Nicoflok до равномерного её распределения; 3. Ц3 – портландцемент с тем же процентом добавки, ПМК Nicoflok использован как механохимический активатор [5].

Эксперимент проводился следующим образом: в высушенный грунт вводилось вяжущее в количестве 8 % по массе, смесь увлажнялась до оптимальной влажности [7], и из нее формовались образцы цилиндрической формы под нагрузкой 15 МПа [8]; полученным образцам были обеспечены условия нормального твердения (температура воздуха (20±2) °С, влажность – не менее 95 %) в течение 28 суток. По истечении срока твердения образцы грунтобетона были подвергнуты испытаниям на прочность, морозостойкость при двух режимах водонасыщения по ГОСТ 30491–2012. Результаты испытаний приведены на рис. 1.

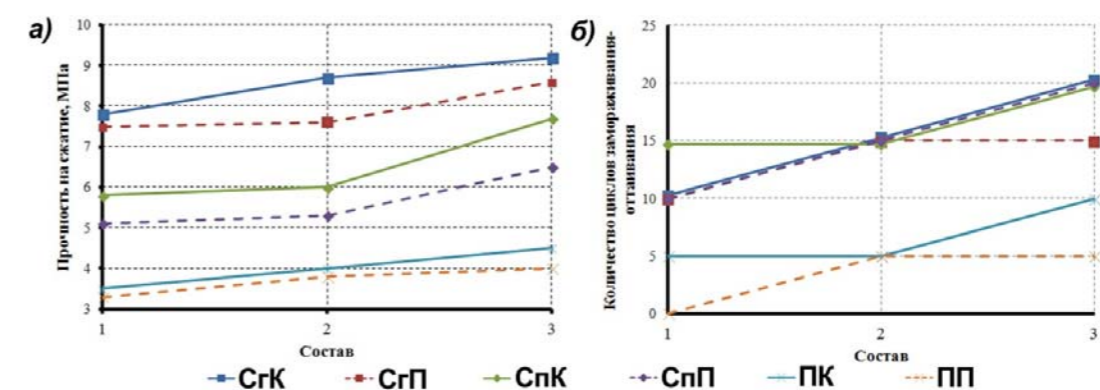


Рис. 1. Зависимость прочности (а) и морозостойкости (б) грунтобетона от применяемого состава вяжущего и режима водонасыщения перед испытанием (К – капиллярное; П – полное): Сг – суглинок, Сп – супесь, П – песок

Из анализа полученных результатов видно, что снижение прочностных показателей грунтобетонных образцов происходит в ряду суглинок → супесь → песок, т.е. по мере уменьшения глинистой составляющей в грунте, вне зависимости от способа водонасыщения (рис. 1, а).

Объяснением этому могут служить следующие соображения. При капиллярном водонасыщении вода, проникая по капиллярам, заполняет поровое пространство и, возможно, способствует протеканию взаимодействия непрореагировавших клинкерных минералов с глинистой компонентой, в результате чего поры заполняются новообразованиями, снижается пористость и повышается прочность. При полном водонасыщении прочность ниже вследствие вымывания некоторых структурных единиц и новообразований из объема образца, в результате чего его пористость возрастает.

Наилучшие показатели прочности показывают грунтобетоны на вяжущем Ц3, поскольку оно имеет самую высокую активность из всех представленных, реализуемую посредством процессов механохимии. Последовательность составов грунтобетонных по прочностным показателям совпадает с аналогичными свойствами вяжущих [5].

Схожие результаты наблюдаются при определении морозостойкости (рис. 1, б). Состав с использованием вяжущего Ц3 показывает наилучшие результаты по морозостойкости. Глинистые грунты (супесь и суглинок) выдерживают большее количество циклов замораживания-оттаивания за счет входящих в их состав глинистых цементирующих минералов. Морозостойкость грунтобетонных на песке отличается более низкими значениями, поскольку в их составе глинистая составляющая присутствует в меньшем количестве, недостаточном для обеспечения связности материала и прочности грунтобетона.

Учитывая взаимосвязь структуры материала с физико-механическими характеристиками [9], авторы изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU особенности строения образцов грунтобетона, полученных с использованием различных грунтов, вяжущих и стабилизатора (рис. 2).

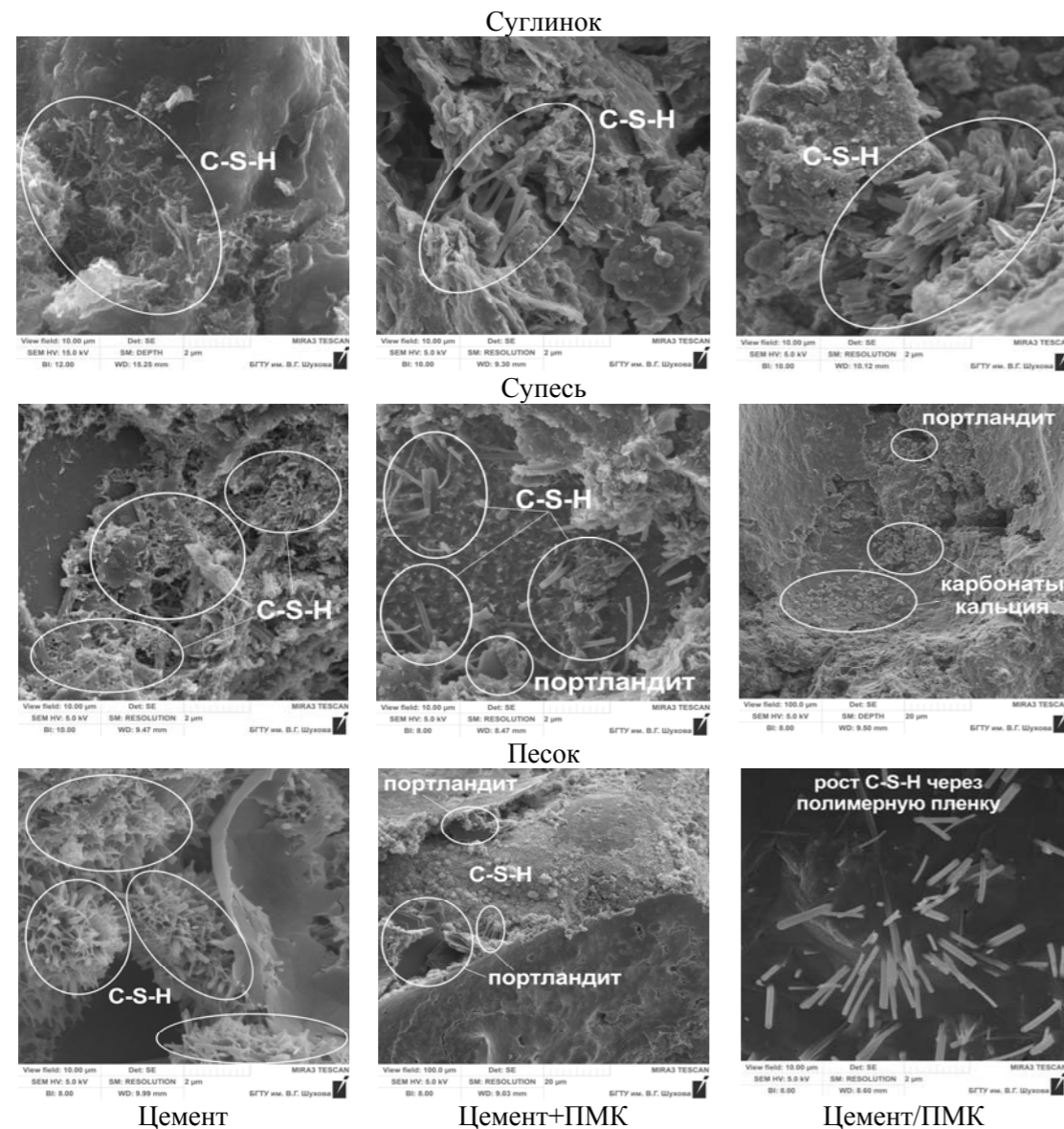


Рис. 2. Микроструктура грунтобетона на разных типах вяжущих

Изучение характера микроструктуры укрепленного грунта при внесении в него полимерно-минеральной добавки направленного действия позволило выявить некоторые особенности формирования композиционного материала и влияние отдельных компонентов на грунтобетон. Анализ микроструктурных особенностей образцов грунтобетона свидетельствует о том, что основными гидратными фазами композиции являются гидросиликаты кальция. Они представлены в двух различных формах в виде столбчатых продолговатых кристаллов и в виде сеток новообразований (см. рис. 2), что позволяет говорить об их различных модификациях. Количество и распределение этих образований в структуре грунтобетонных композиций различается в зависимости от вида применяемого грунта и состава вяжущего. При использовании композиционного вяжущего наблюдается большая однородность структуры и прочность контак-

ной зоны между частицами кварца во всех типах грунтов и продуктами гидратации цемента и, возможно, взаимодействие их с глинистой составляющей грунта.

Выводы

Установлено влияние способа введения полимерно-минеральной композиции в состав грунтобетонной смеси, заключающееся в повышении значений физико-механических свойств укрепленных грунтов при использовании композиционного минерального вяжущего в сравнении с композициями на чистом портландцементе и с добавлением стабилизатора вручную. Этому способствуют формирование однородной структуры с большим количеством новообразований гидросиликатов кальция различных модификаций и большая прочность контактной зоны между всеми компонентами смеси.

Сравнивая грунтобетоны на различных грунтах, можно говорить о том, что при уменьшении количества глинистой составляющей в грунте показатели прочности и морозостойкости снижаются.

С другой стороны, выявлена зависимость прочностных характеристик и морозостойкости от содержания глинистой составляющей в грунте.

Таким образом, можно говорить, что при использовании композиционного вяжущего, полученного совместным помолом портландцемента с полимерно-минеральной композицией Nicoflok, есть возможность создания прочных и морозостойких грунтобетонных композитов на основе глинистых грунтов с достаточно большим числом пластичности (возможно расширение применяемости глинистых грунтов до Ip 15, что будет исследовано в дальнейших работах).

Список литературы

1. Фурсов, С.Г. К вопросу о способах укрепления грунтов / С.Г. Фурсов // Транспортное строительство. – 2017. – №7. – С. 19–22.
2. ОДМ 218.3.076–2016. Методические рекомендации по подбору стабилизаторов грунтов и грунтовых смесей для дорожного строительства. – М.: Росавтодор (Федеральное дорожное агентство), 2017.
3. Абрамова, Т.Т. Стабилизаторы грунтов в отечественном дорожном и аэродромном строительстве / Т.Т. Абрамова, А.И. Босов, К.Э. Валиева // Дороги и мосты. – 2013. – № 2 (30). – С. 60–85.
4. Фурсов, С.Г. Особенности структуры песчаных и глинистых грунтов, укрепленных цементом / С.Г. Фурсов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2009. – № 3. – С. 27–29.
5. Гридчин, А.М. Исследование влияния ПМК Nicoflok как механохимического активатора на свойства цемента, применяемого при укреплении грунтов / А.М. Гридчин, С.Н. Золотых // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 5. – С. 5–10.
6. Гусев, Н.К. Строительство конструктивных слоев аэродромных и дорожных одежд из местных материалов / Н.К. Гусев // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2013. – № 2 (65). – С. 21–22.
7. ГОСТ 22733–2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. Введ. 01.01.2017. – М.: Стандартинформ, 2016. – 12 с.
8. ГОСТ 23558–94. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2005. – 8 с.
9. Васильев, Ю.М. Структурные связи в цементогрунтах / Ю.М. Васильев // Материалы VI Всесоюзного совещания по закреплению и уплотнению грунтов. – М.: Изд-во МГУ, 1968. – С. 63–67.

References

1. Fursov, S.G. To the question of methods of soil strengthening / S.G. Fursov // Transport construction. – 2017. – №7. – P. 19–22.

2. ODM 218.3.076–2016. Guidelines for the selection of soil stabilizers and soil mixtures for road construction. – M.: Rosavtodor (Federal road Agency), 2017.
3. Abramova, T.T. Soil stabilizers in domestic road and airfield construction / T.T. Abramova, A.I. Basov, K.E. Valieva // Roads and bridges. – 2013. – № 2 (30). – P. 60–85.
4. Fursov, S.G. Features of the structure of sandy and clay soils reinforced with cement / S.G. Fursov // Science and technology in the road industry. – 2009. – № 3. – P. 27–29.
5. Gridchin, A.M. Study of the effect of PMK Nicoflok as mechanochemical activator on the properties of cement used in strengthening of soils / A.M. Gridchin, S.N. Zolotych // Vestnik of BSTU n.a. V. G. Shukhov. – 2018. – № 5. – P. 5–10.
6. Gusev, N.K. Construction of structural layers of airfield and road clothes from local materials / N.K. Gusev // Science and technology in the road industry. – 2013. – № 2 (65). – P. 21–22.
7. GOST 22733–2016. Soils. The method of laboratory determination of the maximum density. Enter. 01.01.2017. – M.: STANDARTINFORM, 2016. – 12 p.
8. GOST 23558–94. Mixtures of gravel-gravel-sand and soils treated with inorganic binders for road and airfield construction. Technical conditions. – M.: FSUE «STANDARTINFORM», 2005. – 8 p.
9. Vasiliev, Yu.M. Structural connections in cement soils / Yu.M. Vasiliev // Materials of the VI all-Union meeting on consolidation and compaction of soils. – M.: Moscow state University Publ., 1968. – P. 63–67.

УДК 691.31

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Фомина Екатерина Викторовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
E-mail: fomina.katerina@mail.ru

Лесовик Валерий Станиславович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Строительное материаловедение, изделия и конструкции»
E-mail: naukavs@mail.ru

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ им. М.В. Ломоносова)

Россия, 163002, Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17, тел.: +7(8182) 41-28-33

Айзенштадт Аркадий Михайлович, доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой «Композиционные материалы и строительная экология»
E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukov St.

Fomina Ekaterina Viktorovna, Candidate of Sciences, Senior researcher
E-mail: fomina.katerina@mail.ru

Lesovik Valery Stanislavovich, Doctor of Sciences, Professor, Head of the department «Building materials, products and structures»
E-mail: naukavs@mail.ru

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU named after M.V. Lomonosov)

Russia, 163002, Arkhangelsk, 17, Northern Dvina Emb., tel.: +7(8182) 41-28-33

Ayzenshtadt Arkady Mikhailovich, Doctor of Chemistry, Professor, Head of the department «Composite materials and building ecology»
E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru

СНИЖЕНИЕ АУТОГЕННОЙ УСАДКИ КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТУФА*

Е.В. Фомина, В.С. Лесовик, А.М. Айзенштадт

Рассмотрено влияние системы внутреннего ухода на аутогенную усадку композиционного вяжущего. Внутренним резервуаром для хранения дополнительного количества воды служит пористая структура вулканического туфа месторождения Иордании. Исследовано влияние количества и дисперсности частиц вулканической породы на кинетику аутогенной усадки и физико-механические показатели вяжущего. Произведена оптимизация составов. Построена теоретическая модель распределения пористых частиц в структуре вяжущего, активно участвующих во влагообмене гидратируемой бетонной смеси. Снижение аутогенной усадки композиционного вяжущего указывает на эффективность работы системы внутреннего ухода при бетонировании в условиях сухого и жаркого климата.

Ключевые слова: аутогенная усадка, внутренний уход, композиционное вяжущее, туф, пористый заполнитель, генезис, гидратация, геоника

* Исследование выполнено за счет средств Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013–2020 годы, Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, в рамках Плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН, тема 7.5.1.; программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий, БГТУ им. В.Г.Шухова.

REDUCING OF AUTOGENIC SHRINKAGE IN TUFF-BEARING COMPOSITE BINDER

E.V. Fomina, V.S. Lesovik, A.M. Ayzenshtadt

The effect of internal maintenance for composite binder on autogenic shrinkage is studied. Inner reservoir to collect extra water is a porous structure of tuff from Jordan. The influence of concentration and dispersity of tuff particles on kinetics of autogenic shrinkage and physical and mechanical parameters in the binder is studied. The composition optimization is realized. The theoretical model for tuff particles distribution in binder structure as a participants of moisture exchange process of concrete hydration is proposed. Reducing of autogenic shrinkage of composite binder indicates the efficiency of internal maintenance of concrete casting in dry and hot climate.

Keywords: autogenous shrinkage, internal care of concrete, composite binder, tuff-bearing, lightweight aggregates, genesis, hydration, geonics

Бетонирование в условиях сухого и жаркого климата имеет свои особенности. Воздействие высокой температуры и низкой влажности приводит к испарению воды, быстрой гидратации вяжущего и ускорению сроков схватывания. Кроме того, в этих условиях интенсивная потеря воды в первые часы после укладки бетона сказывается на гидратации цемента, происходят рост пористости бетона, усадка бетона и, как результат, потеря прочности и долговечности [1, 2].

Испарение свободной воды из бетона приводит к обезвоживанию в первую очередь его наружных слоев. Это вызывает дополнительные напряжения на границе наружных и внутренних слоев с пластической усадкой системы. Ранее считалось, что пластическая усадка возникает в случае, когда скорость испарения влаги с поверхности бетона превышает скорость водоотделения материала. Однако результаты последних исследований показали, что трещины образуются и под слоем воды и становятся заметными лишь после высыхания. В данном случае речь идет об аутогенной усадке бетона. Аутогенная усадка не вызвана внешними факторами. Она происходит вследствие образования продуктов гидратации цемента, которые занимают меньший объем по сравнению с объемом негидратированного цемента и воды [3]. Другими словами, сформировавшиеся на ранних стадиях твердения продукты гидратации цемента уплотняются за счет образования более упорядоченных и термодинамически устойчивых структур [4]. В тонких капиллярах возникают мениски. Цемент продолжает потреблять воду для гидратации из пор, и в результате «внутреннего высыхания» происходят значительные внутренние напряжения с деформацией системы. Эти процессы протекают внутри бетона в изотермических условиях, исключая влагообмен с окружающей средой, и в общем случае эффект аутогенной усадки проявляется уже после схватывания вяжущего [5]. Незаметная на первый взгляд аутогенная усадка становится более значимым и даже доминирующим фактором разрушения бетона, эксплуатируемого в условиях жаркого и сухого климата.

Для замены влаги, теряемой в результате испарения или «самоосушения» бетона, уже через 3 часа гидратации применяют систему внешнего ухода. Бетонную поверхность увлажняют водой. Поскольку даже на ранних сроках гидратации образуется плотная микроструктура бетона, это не позволяет проникать воде орошения в глубь бетонных конструкций, особенно в случае их значительной толщины (рис. 1), что способствует протеканию процесса аутогенной усадки.

Наиболее эффективным средством борьбы с трещинообразованием в бетонах, вызванным аутогенной усадкой, является внутренний уход. Широко распространенным приемом системы внутреннего ухода служит применение заполнителей, включающих микропористую структуру [7–9]. Изучение влияния отличительных особенностей генезиса сырья на процессы структурообразования строительных композитов является эффективным подходом геоники, который направлен на создание интеллектуальных строительных композитов, способных приспосабливаться к изменяющимся условиям окружающей среды [10, 11].

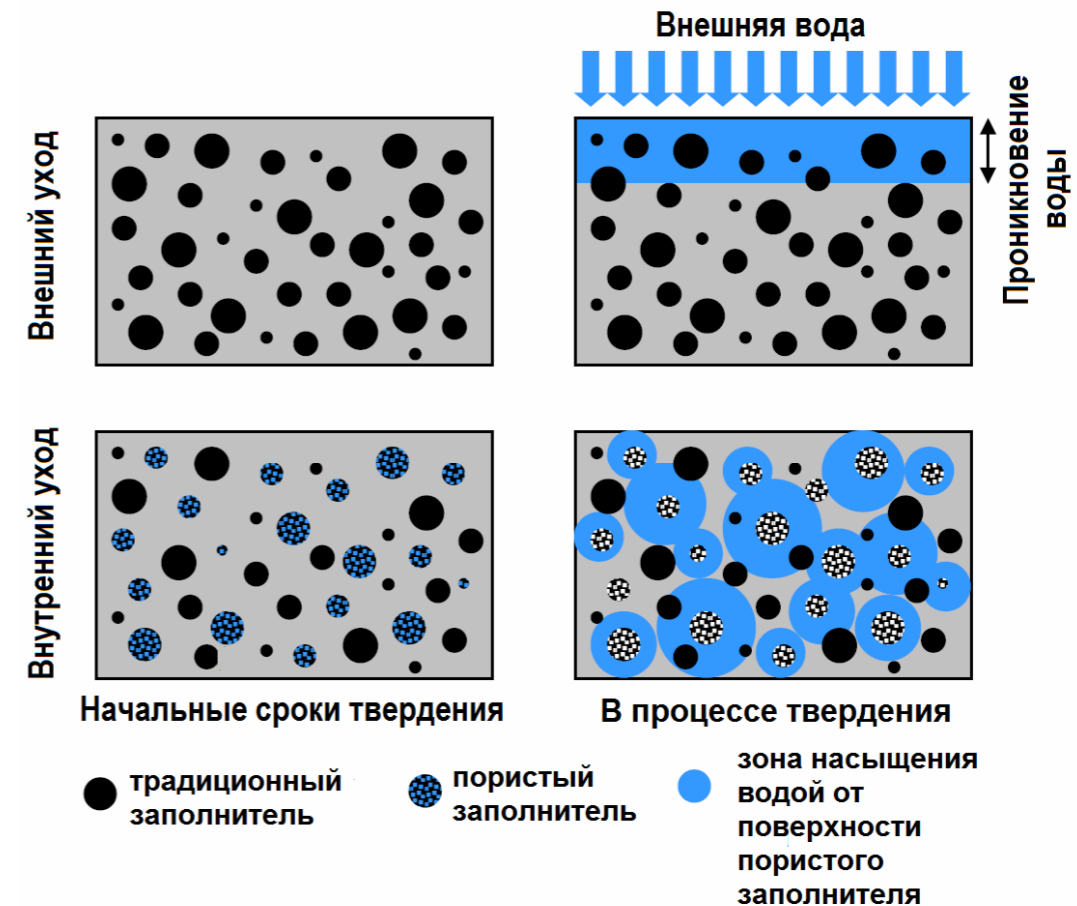


Рис. 1. Иллюстрация различных системы внутреннего и внешнего ухода в бетонах [6]

Пористая структура природных минералов служит резервуаром, содержащим свободную воду. Дополнительная вода восполняет воду в обезвоженных порах матрицы бетона, способствуя снижению внутренних напряжений и дальнейшему протеканию процессов гидратации. Это минимизирует развитие аутогенной усадки, поскольку напряжение усадки контролируется размером пустых пор согласно уравнению Кельвина – Лапласа [12]. Пористый заполнитель отдает воду, образуя на своей поверхности насыщенные водой гидратируемые оболочки переменной толщины, так называемые «зоны гидратации». В связи с чем, для восполнения необходимого количества воды по всему объему гидратируемой системы вяжущего, важной задачей является обеспечение близости обезвоженной структуры бетона к поверхности пористых частиц внутренних резервуаров.

Система внутреннего ухода особенно актуальна в регионах с острой нехваткой воды. В то же время страны Ближнего Востока обладают огромными запасами природного туфа. Вулканический туф является пористой горной породой. В породе преобладают сверхкапиллярные поры, имеющие диаметр $d > 10^{-4}$ м, капиллярные поры с $d = 10^{-7} - 10^{-4}$ м и субкапиллярные поры $d = 2 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-7}$ м [13]. В связи с этим цель данной работы направлена на изучение аутогенной усадки цементного вяжущего с применением туфа месторождения «Tel Rma» королевства Иордании.

Исходя из химического состава (табл. 1), основная масса туфа представлена кремнеземом, и эта порода может использоваться в качестве кремнеземсодержащего заполнителя.

Т а б л и ц а 1

Химический состав туфа, содержание, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
55.36	12.45	9.342	11.642	8.82	0.576	1.73

Физические свойства туфа и кварцевого песка представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Физические свойства туфа и кварцевого песка

Туф	
Водопоглощение, %	9,8
Истинная плотность, кг/м ³	1560-1800
Насыпная плотность, кг/м ³	1010
Кварцевый песок	
Модуль крупности	1,2
Истинная плотность, кг/м ³	2630
Насыпная плотность, кг/м ³	1680

В качестве вяжущего использовался портландцемент Туре ЦЕМ I 42,5 Н производства Саудовской Аравии. Количество воды подбирали по нормальной густоте цементного теста. Применяли кварцевый песок месторождения Иордании, отвечающий требованиям ГОСТ 8736–93.

Теоретическое обоснование выбора туфа заключается в пористой структуре, которая будет являться системой внутреннего ухода и выполнять функцию резервуара с водой. В связи с чем необходимо установить точную дозировку и оптимизировать размер частиц туфа для адекватной оценки его участия в системе внутреннего ухода. С этой целью изучали влияние различных дозровок туфа в составе композиционного вяжущего. Часть кварцевого песка заменяли от 5 до 50 % туфом с разной удельной поверхностью. Туф вводили в сухом виде. Проведенный предварительный анализ по результатам микрогранулометрического исследования показал: при удельной поверхности $S_{уд} = 350 \text{ м}^2/\text{кг}$ преобладает размер частиц в диапазоне 10–50 мкм, при $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$ – размер частиц 5–15 мкм. Цементный порошок с удельной поверхностью 350 м²/кг в основном состоит из зерен размером от 15–20 мкм. Кварцевый песок – из зерен размером 1,5–2 мм.

В табл. 3 представлены результаты физико-механических свойств композиционных вяжущих.

Т а б л и ц а 3

Физико-механические свойства композиционного вяжущего

№	Доля туфа при замене кварцевого песка в вяжущем, %	В/Ц	Предел прочности при сжатии, в возрасте, сут, МПа			Нормальная плотность, %	Сроки схватывания, час-мин	
			3	7	28		Начало	Конец
1	-	0,26	23,00	35,00	51,00	25,6	1-30	2-16
Удельная поверхность туфа 350 м ² /кг								
2	5	0,26	24,20	37,00	52,40	26,0	1-35	2-18
3	10	0,27	28,50	39,10	55,30	27,0	1-45	2-30
4	20	0,28	19,10	35,20	45,20	28,0	1-58	2-30
5	30	0,29	17,20	33,53	39,10	29,5	1-58	2-40
6	50	0,31	16,10	28,30	35,46	30,1	2-10	3-00
Удельная поверхность туфа 500 м ² /кг								
7	5	0,27	27,30	39,50	54,50	27,0	1-42	2-30
8	10	0,28	29,50	42,10	60,20	28,0	1-51	2-40
9	20	0,29	25,10	40,30	48,40	29,5	2-08	3-03
10	30	0,31	20,30	38,53	42,00	31,0	2-18	3-20
11	50	0,33	19,70	30,10	37,46	32,5	2-30	3-35

За контрольный принят состав №1 без содержания туфа. Анализируя полученные результаты, следует отметить, что с увеличением содержания туфа водопотребность возрастает пропорционально увеличению содержания высокодисперсного туфа, что подтверждает теоретические предположения. Наилучшими показателями обладают вяжущие композиции при замене кварцевого песка на 10 % туфа (составы №3 и №8). Максимальная прочность 60,20 МПа достигнута при введении 10 %-го туфа с удельной поверхностью 500 м²/кг, по сравнению с контрольным составом – 51 МПа. Сроки схватывания смесей вяжущего в присутствии туфа и с увеличением степени его дисперсности замедляются. Состав вяжущего при замене 10 % кварцевого песка на туф следует признать оптимальным для дальнейшего исследования аутогенной усадки бетона.

Аутогенную усадку бетона исследовали на образцах-призмах размером 40×40×160 мм при твердении вяжущего. Деформацию образцов определяли с помощью измерительных рычажно-зубчатых головок типа ИИГ (ГОСТ 18833) с ценой деления 0,001 мм. Исходя из известных данных, интервал времени интенсивной аутогенной усадки находится в пределах 12–36 часов с момента формирования цементной пасты и далее замедляется [8]. В данной работе проводили измерения в течение 24 часов от момента формирования образцов.

Исходя из полученных результатов очевидно, что в контрольном образце с В/Ц = 0,26 аутогенная усадка развивается наиболее интенсивно при достижении значения 134×10^{-6} через 24 часа гидратации (рис. 2). Дополнительная вода, находящаяся в порах туфа, служит агентом внутреннего ухода за бетоном и способствует снижению значения аутогенной усадки до 109×10^{-6} в образцах №3 (В/Ц = 0,27) и 92×10^{-6} в составе №8 (В/Ц = 0,28). Влагообмен между пористым заполнителем и цементной матрицей стабилизирует влажность внутри вяжущей системы, что сопровождается снижением показателей аутогенной усадки.

Согласно теоретическим представлениям (см. рис. 1) для формирования максимального количества «защищенных зон» гидратированной матрицы бетона частицы пористого заполнителя должны быть равномерно распределены по всему объему. Для решения этого вопроса и оценки дальности прохождения воды, извлекаемой из пористого заполнителя, в гидратируемую систему была построена 2D-модель распределения частиц туфа в структурной матрице композиционного вяжущего (рис. 3). Построение производили с помощью программы, разработанной для характеристики систем воздушных пустот в бетоне [14]. Входными параметрами для построения модели служили: распределение частиц по размерам (объем / количество) заполнителей традиционного (кварцевый песок) и пористого (туф), водоцементное отношение вяжущего, водопоглощение пористого заполнителя.

Количественный анализ показывает, что для двух совокупных композиций вяжущего с одинаковой объемной долей пористого заполнителя, но при различной фракции его частиц и различном В/Ц существенно изменяется расстояние защитной зоны от поверхности пористого заполнителя (см. рис. 3). На изображениях ясно видно, что равномерное распределение в системе мелкодисперсных частиц с удельной поверхностью 500 м²/кг при В/Ц = 0,28 (состав №8) способствует максимальной гидратации всего объема вяжущего (рис. 3, а). В данном случае гидратируемая зона (синего цвета) охватывает расстояние 0,2 мм от поверхности пористых частиц. В другом случае из-за более низкой площади поверхности пористого заполнителя (350 м²/кг) объемная доля частиц размещается менее равномерно, тем самым не обеспечивается достаточное количество дополнительной воды для гидратации с появлением незащищенных зон (белый цвет) (рис. 3, б), таким образом, не в полной мере защищена система от аутогенной усадки. Водопоглощение пористого заполнителя составляет 9,8 % (см. табл. 2), и согласно построенным моделям данного количества дополнительной воды достаточно, чтобы обеспечить максимальную область внутреннего ухода за бетоном на расстоянии до 2 мм от поверхности пористых заполнителей.

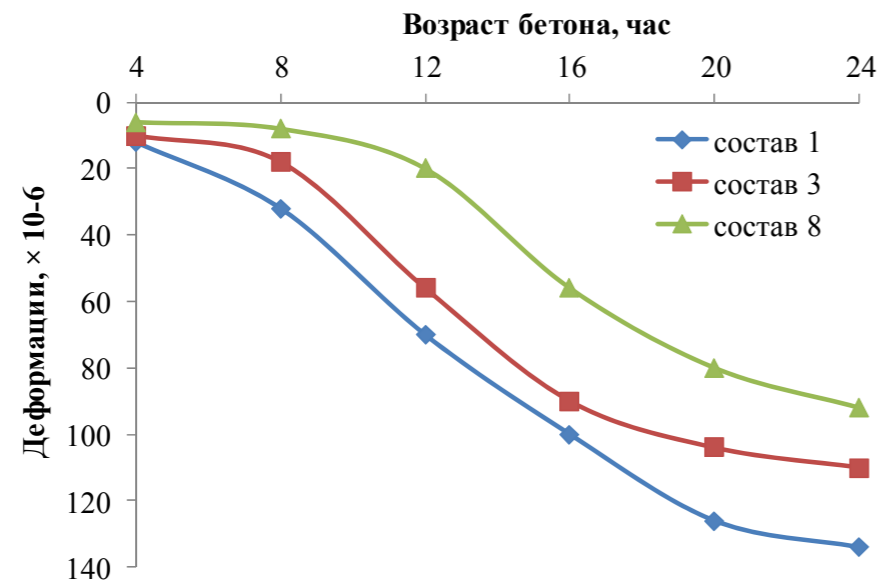


Рис. 2. Кинетика процесса изменения аутогенной усадки композиционного вяжущего. Номера составов соответствуют табл. 3

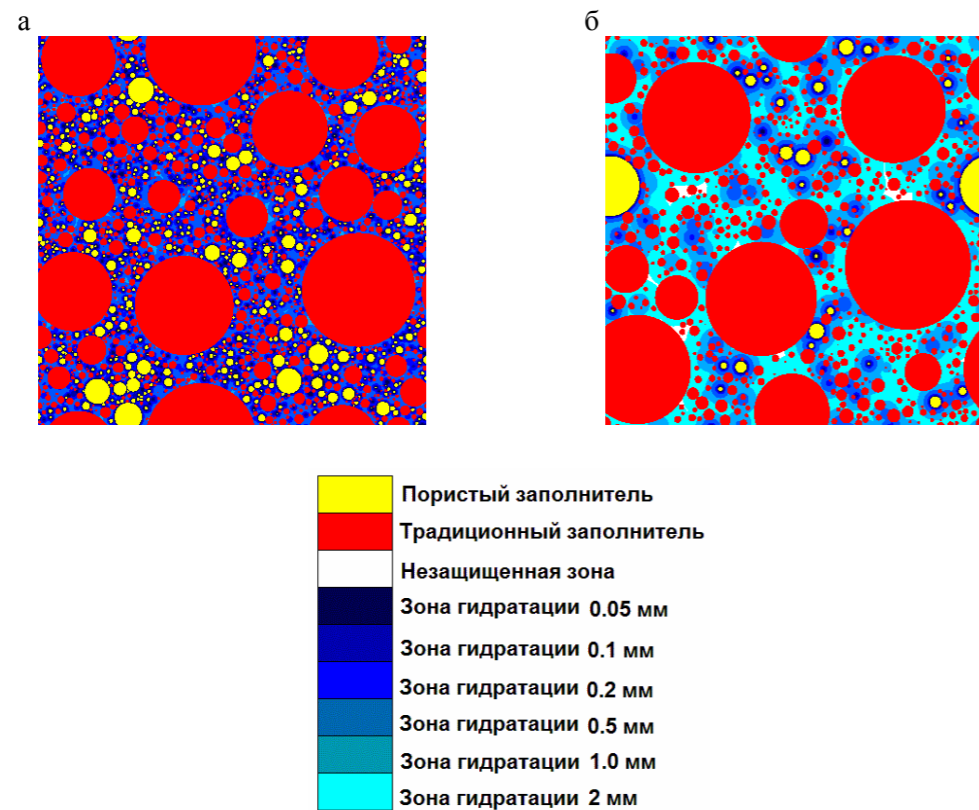


Рис. 3. Модель 2-D изображения гидратируемой зоны на расстоянии от поверхности пористого заполнителя (формат 3×3 см):

а – состав №8; б – состав №3 в соответствии с табл. 1. Красный цвет – частицы кварцевого песка, желтый – частицы туфа, concentрические кольца различных оттенков синего цвета указывают на гидратирующий цементный раствор на различных расстояниях от поверхности пористого заполнителя

Таким образом, доказана возможность организовать систему внутреннего ухода бетона и снизить развитие аутогенной усадки смеси вяжущего за счет применения туфа Иордании. Данная технология может обеспечить получение надежных и долговечных конструкций из бетонов в условиях сухого и жаркого климата.

Список литературы

1. Ibrahim, M. Effect of curing methods on strength and durability of concrete under hot weather conditions / M. Ibrahim, M. Shameem, M. Al-Mehthel, M. Maslehuddin // *Cement and Concrete Composites*. – 2013. – Vol. 41. – P. 60–69.
2. Koroteev, D. Strength of Modified Concretes Curing without Care in Dry and Hot Climate Conditions / D. Koroteev, M. Kharun, V.V. Galishnikova, N.A. Stashevskaya // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 753. – P. 337–342.
3. Marusic, E. Autogenous shrinkage and expansion related to compressive strength and concrete composition / E. Marusic, N. Stirmer // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2016. – Vol. 14. – P. 489–501.
4. Коровкин, М.О. Влияние аутогенной усадки на кинетику твердения бетона / М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина // *Образование и наука в современном мире. Инновации*. – 2016. – № 6–2. – С. 239–244.
5. Gowripalan, N. Autogenous shrinkage of concrete at early ages / N. Gowripalan // *25th Australasian Conference on Mechanics of Structures and Materials (ACMSM25)*. – Australia, 2018. – 8 p.
6. Bentz, D.P. Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review / D.P. Bentz, William Jason Weiss. – National Institute of Standards and Technology, 2011. – 82 p.
7. Bentur, A. Prevention of Autogenous Shrinkage in High Strength Concrete by Internal Curing Using Wet Lightweight Aggregates / A. Bentur, S. Igarashi, K. Kovler // *Cement & Concrete Research*. – 2001. – Vol. 31. – P. 1587–1591.
8. Гувалов, А.А. Снижение аутогенной усадки высокопрочных бетонов / А.А. Гувалов, Т.В. Кузнецова // *Техника и технология силикатов*. – 2012. – Т. 19, № 4. – С. 12–16.
9. Зайченко, Н.М. Влияние дополнительной воды затворения на показатели полной усадки высокопрочных легких бетонов / Н.М. Зайченко, С.В. Лахтарина, Е.В. Егорова, В.Б. Мартынова, Т.П. Киценко // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. – 2018. – № 1 (129). – С. 41–47.
10. Лесовик, В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении / В.С. Лесовик. – Белгород: БГТУ, 2016. – 286 с.
11. Лесовик, В.С. Некоторые аспекты техногенного метасоматоза в строительном материаловедении / В.С. Лесовик, Е.В. Фомина, А.М. Айзенштадт // *Строительные материалы*. – 2019. – № 1–2. – С. 100–106.
12. Persson, B. Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology / B. Persson // *Materials and Structures*. – 1997. – Vol. 30, Iss. 5. – P. 293–305.
13. Шакарна, М.Х. Композиционные вяжущие с использованием вулканических туфов Иордании / М.Х. Шакарна // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2013. – №3. – С. 38–43.
14. Bentz, D.P. Protected paste volume in concrete: Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate / D.P. Bentz, K.A. Snyder // *Cement and Concrete Research*. – 1999. – Vol. 29, Iss. 11. – P. 1863–1867.

References

1. Ibrahim, M. Effect of curing methods on strength and durability of concrete under hot weather conditions / M. Ibrahim, M. Shameem, M. Al-Mehthel, M. Maslehuddin // *Cement and Concrete Composites*. – 2013. – Vol. 41. – P. 60–69.

2. Koroteev, D. Strength of Modified Concretes Curing without Care in Dry and Hot Climate Conditions / D.Koroteev, M.Kharun, V.V. Galishnikova, N.A. Stashevskaya // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 753. – P. 337–342.
3. Marusic, E. Autogenous shrinkage and expansion related to compressive strength and concrete composition / E. Marusic, N. Stirmer // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2016. – Vol. 14. – P. 489–501.
4. Korovkin, M.O. Influence of autogenous shrinkage on the kinetics of concrete hardening / M.O. Korovkin, N.A. Eroshkina // *Education and Science in the Modern World. Innovations*. – 2016. – № 6–2. – P. 239–244.
5. Gowripalan, N. Autogenous shrinkage of concrete at early ages / N. Gowripalan // *25th Australasian Conference on Mechanics of Structures and Materials (ACMSM25)*. – Australia, 2018. – 8 p.
6. Bentz, D.P. Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review / D. P. Bentz, William Jason Weiss. – National Institute of Standards and Technology, 2011. – 82 p.
7. Bentur, A. Prevention of Autogenous Shrinkage in High Strength Concrete by Internal Curing Using Wet Lightweight Aggregates / A. Bentur, S. Igarashi, K. Kovler // *Cement & Concrete Research*. – 2001. – Vol. 31. – P. 1587–1591.
8. Guvalov, A.A. Reduction of autogenous shrinkage of high-strength concrete / A.A. Guvalov, T.V. Kuznetsova // *Technique and technology of silicates*. – 2012. – Vol. 19, № 4. – P. 12–16.
9. Zaichenko, N.M. The effect of additional mixing water on the indicators of full shrinkage of high-strength lightweight concrete / N.M. Zaichenko, S.V. Lakhtarina, E.V. Egorova, V.B. Martynova, T.P. Kitsenko // *Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture*. – 2018. – № 1 (129). – P. 41–47.
10. Lesovik, V.S. Geonics (geomimetics). Examples of implementation in construction materials / V.S. Lesovik. – Belgorod: BSTU, 2016. – 286 p.
11. Lesovik, V.S. Some Aspects of Technogenic Metasomatosi In Construction Material Science / V.S. Lesovik, E.V. Fomina, A.M. Ayzenshtadt // *Construction Materials*. – 2019. – № 1–2. – P. 100–106.
12. Persson, B. Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology / B. Persson // *Materials and Structures*. – 1997. – Vol. 30, Iss. 5. – P. 293–305.
13. Shakarna, M. Kh. Composite binders using volcanic tuffs of Jordan / M.Kh. Shakarna // *Bulletin of BSTU*. V.G. Shukhov. – 2013. – №3. – P. 38–43.
14. Bentz, D.P. Protected paste volume in concrete: Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate / D.P. Bentz, K.A. Snyder // *Cement and Concrete Research*. – 1999. – Vol. 29, Iss. 11. – P. 1863–1867.

УДК 624.04

Акционерное общество «Атомэнергопроект»
(АО «Атомэнергопроект»)

Россия, 107996, г. Москва,
ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1,
тел.: (499) 962-81-89

Саргсян Акоп Егишович,
доктор технических наук, профессор,
академик МАИ при ООН,
начальник НИОДиС

Гукова Елена Геннадьевна,
главный специалист

Joint Stock Company «Atomenergoproekt»
(JSC «Atomenergoproekt»)

Russia, 107996, Moscow, 7, str. 1,
Bakuninskaya St.,
tel.: (499) 962-81-89

Sargsyan Akop Egishovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Academician of IAI UN,
Head of the Department

Gukova Elena Gennadievna,
chief specialist

ОЦЕНКА ЛОКАЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ НА ПРОБИВАНИЕ ИЗ БЕТОНА РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПРИ СОУДАРЕНИИ С САМОЛЕТОМ

А.Е. Саргсян, Е.Г. Гукова

Произведена оценка прочности защитных оболочек, выполненных из различных типов бетона, при соударении с самолетом. Выполнен сравнительный анализ результатов расчетов, подтверждающий широкие возможности совершенствования конструктивных решений защитных оболочек путем реализации инновационных материалов, позволяющих существенно экономить материальные ресурсы при одновременном повышении надежности и безопасности сооружений в атомной энергетике.

Ключевые слова: локальная прочность, защитная оболочка, пробивание, падение самолета, фибробетон, сопоставительный анализ, результаты расчетов

EVALUATION OF THE LOCAL STRENGTH OF REINFORCED SAFETY CONTAINMENT FROM DIFFERENT TYPES OF CONCRETE TO PENETRATION DUE TO AIRCRAFT CRASH

A.E. Sargsyan, E.G. Gukova

The local strength of reinforced safety containment from various types of concrete to penetration due to aircraft crash is evaluated. A comparative analysis of the results is carried out, confirming the wide possibilities for improving the design solutions of safety containments by implementing innovative materials that can significantly save material resources while improving the reliability and safety of structures in nuclear technology.

Keywords: local strength, containment, penetration, aircraft crash, fiber-reinforced concrete, comparative analysis, calculation results.

Введение

В настоящее время для защиты особо ответственных сооружений от внешних техногенных воздействий используются защитные конструкции, в том числе оболочки. При этом функционально определяющим воздействием для установления технических параметров защитной конструкции являются нагрузки от падающего самолета.

Общие положения и методика расчета

Непосредственно вблизи наружной поверхности конструкции, вне зоны действия нагрузки соударения, выделяется область, характеризующаяся высоким уровнем интенсивности напряжений в условиях трехосного сжатия [1].

Вблизи нижней грани конструкции можно выделить следующие две зоны. Первая из них характеризуется интенсивными растягивающими напряжениями по меридиональным и кольцевым направлениям, а вторая – высоким уровнем растягивающих напряжений на площадках компонент главных напряжений. Тем самым такое напряженное состояние объясняет характер разрушения конструкции, который был обнаружен как при расчетных, так и при экспериментальных исследованиях [1].

Возникновение нормальных трещин по кольцевым и меридиональным направлениям на внутренней поверхности конструкции объясняется наличием интенсивных растягивающих напряжений на этих площадках.

В предельном состоянии образуется эллиптическая поверхность разрушения, проходящая в нижней зоне по площадкам главных растягивающих напряжений и верхней зоне по площадкам максимальных касательных напряжений, а также по переходной зоне, сопрягающей указанные площадки. При этом образование нормальных трещин по меридиональным и кольцевым направлениям происходит с относительно меньшим уровнем внешней нагрузки.

При дальнейшем росте внешней нагрузки, с развитием нормальных трещин, на площадках наиболее интенсивных главных растягивающих напряжений образуются и развиваются наклонные трещины. При более высоком уровне внешней нагрузки, вблизи ее краев, с достижением максимальными касательными напряжениями предельных значений наступает предельное состояние работы конструкции.

Характер разрушения и вид напряженного состояния, изложенные здесь, присущи и плоским элементам железобетонных конструкций при действии локальных нагрузок. Последний вывод подтверждается результатами сопоставления расчетных и экспериментальных значений разрушающих нагрузок, представленных в [1–4].

На рис. 1, 2 изображена схема разрушения железобетонных оболочек и плит, установленная экспериментально [1, 3, 4].

Наклон ломаных AB , BC принят равным $\alpha_1 = 45^\circ$ и $\alpha_2 = 60^\circ$, что достаточно точно описывает поверхность разрушения конструкции, полученную как по эксперименту, так и при расчете конструкции по МКЭ.

Ординаты эпюры напряжений, действующих на поверхности разрушения, в предельной стадии конструкции были определены с учетом соотношения главных напряжений, т.е. вида объемного напряженного состояния по теории прочности А.В. Яшина [5, 6].

На аппроксимированной площадке AB с максимальными касательными напряжениями установлены соотношения главных напряжений $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 0,1 : 1,0 : 1,0$. Характерными точками обеих ломаных являются: точка A , расположенная на внешней поверхности оболочки у края нагрузки; точка B , в которой нормальные напряжения на поверхности разрушения меняют знак, и точка C , расположенная в вершине наклонной трещины, где нормальные напряжения $\sigma = R_{bt}$.

Введены следующие обозначения: $\sigma^{(i)}, \tau^{(i)}$ – аппроксимированные значения функций нормальных и касательных напряжений, $i = 1$ отнесено к площадкам максимальных касательных напряжений (AB), $i = 2$ – к зоне перехода (BC), R_b – прочность бетона при одноосном сжатии; R_{bt} – прочность бетона при одноосном растяжении.

На основе соотношения $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 0,1 : 1,0 : 1,0$, используя следующие известные соотношения $\sigma^{(1)} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$; $\tau^{(1)} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ из условия прочности А.В. Яшина [5,6] с учетом $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 0,1 : 1,0 : 1,0$, получаем:

$$\sigma^{(1)} = \frac{0,1\sigma_3 + \sigma_3}{2} = -1,1R_b;$$

$$\tau^{(1)} = \frac{0,1\sigma_3 - \sigma_3}{2} = 0,9R_b. \quad (1)$$

Так как в точке B , отнесенной к ломаной BC , нормальные напряжения равны нулю, то следует предполагать, что в этой точке разрушение должно происходить за счет сдвига. Предельное значение касательных напряжений при $\sigma = 0$ можно определить с помощью геометрической интерпретации кругов Мора:

$$\tau^2 + \left[\sigma - \frac{1}{2}(R_b - R_{bt}) \right]^2 = \left[\frac{1}{2}(R_b + R_{bt}) \right]^2. \quad (2)$$

Принимая $\sigma = 0$, получаем формулу для определения касательного напряжения в точке B :

$$\tau_e^{(2)} = \tau = \sqrt{R_b R_{bt}}. \quad (3)$$

Последняя точка C переходной зоны расположена на вершине наклонной трещины. Следовательно, в этой точке имеем:

$$\sigma_c^{(2)} = R_{bt}; \quad \tau_c^{(2)} = 0. \quad (4)$$

Принимаем, что эпюры нормальных и касательных напряжений в зоне перехода изменяются по параболическому закону с коэффициентом усреднения 3/4. Обобщив формулы (3) и (4), получим:

$$\tau^{(2)} = \frac{3}{4}\sqrt{R_b R_{bt}}, \quad \sigma^{(2)} = \frac{3}{4}R_{bt}. \quad (5)$$

Здесь \bar{x}_0 – высота сечения над нормальной трещиной в момент возникновения наклонной трещины; x_1, x_0 – соответственно высота сечения над наклонной и нормальной трещинами в режиме предельного состояния конструкции. Эти величины определяются следующим образом:

$$\frac{\bar{x}_0}{h_0} = - \left(n\mu_s - \frac{\sigma_{\text{фп}}}{R_b} \mu_s \right) + \sqrt{\left(n\mu_s - \frac{\sigma_{\text{фп}}}{R_b} \mu_s \right)^2 + 2n\mu_s} \quad (6)$$

$$\frac{x_0}{h_0} = \frac{0,5n\mu_s + L_1 - \left(\frac{\sigma_{\text{фп}}^{\text{нк}}}{R_b} \mu_s - \frac{\sigma_{s'}}{R_b} \mu_{s'} \right)}{0,5n\mu_s + L - \left(\frac{\sigma_{\text{фп}}^{\text{нк}}}{R_b} \mu_s - \frac{\sigma_{s'}}{R_b} \mu_{s'} \right)}$$

$$\frac{x}{h_0} = 2L - \frac{x_0}{h_0},$$

$$\mu_s = \frac{A_s}{bh_0}; \quad L_1 = \frac{M}{0,8R_b bh_0^2} - \frac{\sigma_{s'}}{R_b} \mu_{s'};$$

$$\mu_{s'} = \frac{A_{s'}}{bh_0}; \quad \sigma_{s'} = nR_b; \quad n = \frac{E_s}{E_b};$$

$$M = \frac{1}{2}R_b bh_0 \left(h_0 - \frac{1}{3}\bar{x}_0 \right) + nR_b (h - a') A_{s'}. \quad (7)$$

Влияние кривизны конструкции при определении высоты сечения над наклонной трещиной в формулах А.С. Залесова [3] можно отразить как некоторую добавку $\sigma_{\text{фф}}$ к предварительным напряжениям в нормальном сечении, проходящем через вершину наклонной трещины.

Приближенное значение $\sigma_{\text{фф}}$ по уточненной теории толстых оболочек С. Лукасевича [1] записывается в виде:

$$\sigma_{\text{фф}} = \frac{P_{1\text{max}}}{8h_0} \sqrt{3(1-\nu^2)}.$$

Значение $\sigma_{\text{фф}}$ для плоских элементов принимается равным нулю.

Для определения положения характерной точки В в [1] была установлена зависимость:

$$\frac{x_1}{h_0} = \frac{\frac{N_s}{bh_0} - \frac{N_{s'}}{bh_0} - \frac{x}{h_0} (\tau^{(2)} \text{tg} \alpha_2 - \sigma^{(2)})}{\sigma^{(1)} + \tau^{(1)} - (\tau^{(2)} \text{tg} \alpha_2 - \sigma^{(2)})}. \quad (8)$$

Плоское напряженное состояние присуще балочным элементам конструкций в зоне обжатия. Вид напряженного состояния в этом случае определяется следующим соотношением компонент главных напряжений: $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 0 : 0,05 : 1,0$ [1]. Соответственно, для точки В:

$$\sigma_1 = 0; \quad \sigma_2 = 0,055R_b; \quad \sigma_3 = 1,1R_b.$$

Следовательно,

$$\tau^{(1)} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = 0,55R_b; \quad \sigma^{(1)} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = -0,55R_b. \quad (9)$$

Усилие $N_{s'}$ в продольной арматуре в зоне сжатия, пересекающей поверхность разрушения, равно $N_{s'} = F_s \sigma_{s'}$. Напряжение $\sigma_{s'}$ можно определить из условия полного сцепления между бетоном и арматурой. Приняв напряжение в нормальном сечении равным $\sigma_{b'} = R_b$ и воспользовавшись соотношением $\sigma_{s'} = n\sigma_{b'}$, получим:

$$N_{s'} = nF_s R_b. \quad (10)$$

Остается определить $N_s = A_s \sigma_s$.

В первом приближении принимаем $\sigma_s \approx 0,9R_s$. Следовательно, усилие N_s можно записать в виде:

$$N_s = 0,9A_s R_s. \quad (11)$$

Из совместного рассмотрения (8) ÷ (11) получим:

$$\frac{x_1}{h_0} = \frac{0,9\mu_s R_s - n\mu_{s'} R_b - \frac{3}{4} \frac{x}{h_0} (\sqrt{R_b R_{bt}} \text{tg} \alpha_2 - R_{bt})}{1,1R_b - \frac{3}{4} (\sqrt{R_b R_{bt}} \text{tg} \alpha_2 - R_{bt})}. \quad (12)$$

Для определения условия прочности оболочек и плит были применены расчетные схемы, представленные на рис. 1 и 2 [1, 2].

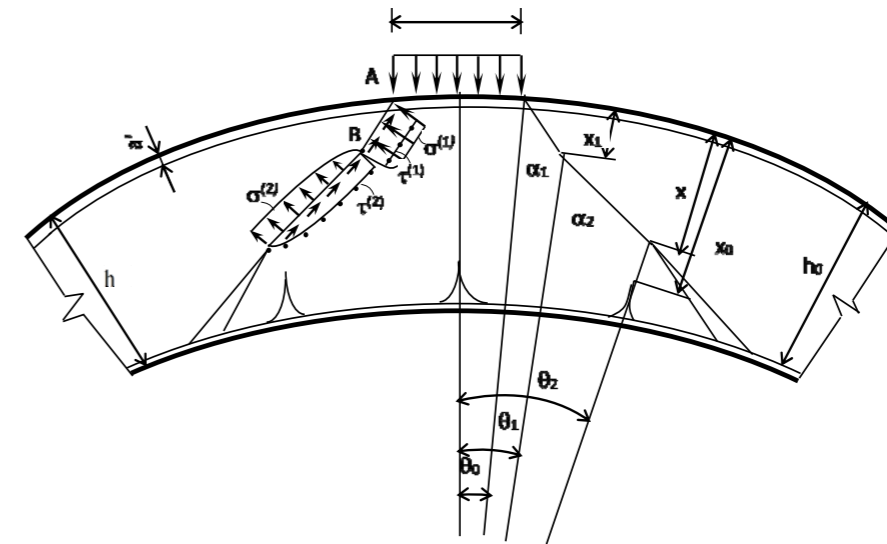


Рис. 1. Расчетная схема железобетонных оболочек при действии локальных нагрузок

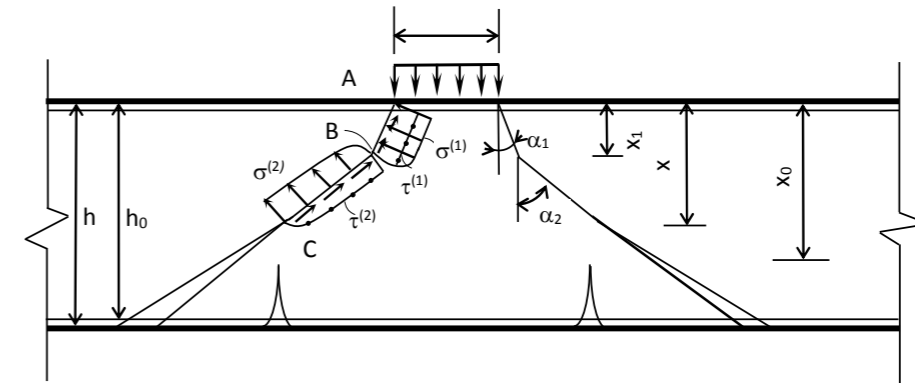


Рис. 2. Расчетная схема железобетонных плит при действии локальных нагрузок

Условием прочности конструкций служит уравнение равновесия выделенного блока при разрушении оболочки в предельном состоянии. В правую часть уравнения равновесия введем максимальное значение модуля вектора нагрузки $P_{1\text{max}}$, а в левую часть – несущую способность поверхности разрушения по направлению вектора внешней нагрузки:

$$\sum_{i=1}^2 (\tau^{(i)} \cos \alpha_i + \sigma^{(i)} \sin \alpha_i) \cdot S_i + P_{sw} = P_{1\text{max}}, \quad (13)$$

где P_{sw} – интегральное значение усилия от хомутов, пересекающих поверхность разрушения конструкции; S_1 – площадь боковой поверхности усеченного конуса высотой x_1 , меньшим основанием которого служит площадь действия нагрузки; S_2 – площадь боковой поверхности усеченного конуса высотой $(x - x_1)$, боковая поверхность которого образуется в зоне перехода от площадок максимальных касательных напряжений к площадкам главных растягивающих напряжений.

Выражение интегрального значения усилия, возникающего от хомутов P_{sw} , пересекающих поверхность разрушения конструкции, запишем в следующем виде:

$$P_{sw} = 0,8N_{sw} A_{sw} R_{sw}, \quad (14)$$

где коэффициент 0,8 учитывает фактор одновременности достижения напряжениями в хомутах предела текучести; R_{sw} – расчетное сопротивление поперечной арматуры; $A_{sw} = \pi d_{sw}^2 / 4$ – площадь сечения поперечной арматуры; d_{sw} – диаметр сечения поперечной арматуры; N_{sw} – количество поперечной арматуры, пересекающей поверхность разрушения.

Обозначив шаг хомутов по меридиональным и по кольцевым направлениям через u_{x1} и u_{x2} , согласно рис. 2, получим:

$$N_{sw} = \frac{1}{u_{x1}u_{x2}} \left\{ \pi(h_0 - x) \operatorname{tg} \alpha_2 [d + 2x_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + (h_0 - x) \operatorname{tg} \alpha_2] + \sum_{i=1}^2 S_i \sin \alpha_i \right\}. \quad (15)$$

Выражения S_i ($i=1,2$) для оболочек определяются на основе расчетной схемы:

$$S_1 = \pi AB(d + AB \sin \alpha_1);$$

$$S_2 = \pi BC(d + 2x_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + BC \operatorname{tg} \alpha_2), \quad (16)$$

где $AB = \left(R + \frac{h}{2} - x_1 \right) \frac{\sin(\Theta_1 - \Theta_0)}{\sin(\alpha_1 - \Theta_0)}$; $BC = \left(R + \frac{h}{2} - x_1 \right) \frac{\sin(\Theta_2 - \Theta_1)}{\sin(\alpha_2 - \Theta_1)}$;

$$\Theta_0 = \arcsin\left(\frac{d}{2R+h}\right);$$

$$\Theta_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha_1 - \arccos \left[\sin(\alpha_1 + \Theta_0) \frac{R + \frac{h}{2}}{R + \frac{h}{2} - x_1} \right];$$

$$\Theta_2 = \frac{\pi}{2} - \alpha_2 - \arccos \left[\sin(\alpha_2 + \Theta_1) \frac{R + \frac{h}{2} - x_1}{R + \frac{h}{2} - x} \right]. \quad (17)$$

Значения S_i ($i=1,2$) для плит определяются на основе расчетной схемы, представленной на рис. 2:

$$S_1 = \pi(d + x_1 \operatorname{tg} \alpha_1)x_1; \quad S_2 = \pi[d + 2x_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + (x - x_1) \operatorname{tg} \alpha_2](x - x_1). \quad (18)$$

Возвращаясь к выражению (13), можно сделать вывод, что локальную прочность плоских и криволинейных элементов железобетонных конструкций при действии локальных нагрузок можно считать удовлетворенной, если соблюдается условие

$$\sum_{i=1}^2 (\tau^{(i)} + \cos \alpha_i + \sigma^{(i)} \sin \alpha_i) \cdot S_i + P_{sw} \geq P_{1\max}. \quad (19)$$

При соблюдении знака равенства в (19) определяется величина модуля вектора внешней нагрузки $P_{раз}$, при которой конструкция по изложенной схеме полностью исчерпывает несущую способность:

$$P_{раз} = \sum_{i=1}^2 (\tau^{(i)} \cos \alpha_i + \sigma^{(i)} \sin \alpha_i) \cdot S_i + P_{sw}. \quad (20)$$

При отсутствии поперечной арматуры в конструкции, в зоне действия нагрузки, в (19) и (20) следует принимать $P_{sw} = 0$.

В настоящее время имеется большое количество научно-исследовательских работ, посвящённых разработке высокопрочных бетонов и фибробетонов [7–14].

Расчетные прочностные характеристики обычного бетона марки В50, В110, высокопрочного бетона В110 и фибробетона обобщены в табл. 1 [10, 11, 15, 16].

Т а б л и ц а 1

Расчетные характеристики различных типов бетона

№ п/п	Вид и класс бетона по прочности на сжатие	Характеристики бетонов			Модуль упругости, ГПа
		Прочность, МПа			
		кубиковая	призменная	осевое растяжение	
1	Обычный В50	65	36	1,6	38
2	Обычный В100	130	71	2,2	43
3	Высокопрочный В110	140	90	3,5	45
4	Фибробетон В110	140	105	10	48
5	Фибробетон В120	150	110	11	49

Выполним оценку прочности купола наружной защитной оболочки, изготовленной из бетона марки В50, В100, высокопрочного порошкового бетона В110 и фибробетона В110, В120, при падении военного самолета типа «Фантом», рекомендованного МАГАТЭ.

Площадь приложения нагрузки при наружной поверхности оболочки равна 14 м^2 .

Максимальное значение силы соударения $P_{\max} = 11 \cdot 10^4 \text{ кН}$.

Оценка прочности наружной защитной оболочки из обычного бетона марки В50

Исходные данные:

– начальный модуль деформации бетона марки В50 $E_b = 38000 \text{ МПа}$;

– расчетные сопротивления бетона марки В50: $R_b = 36 \text{ МПа}$; $R_{bt} = 1,6 \text{ МПа}$;

– модуль упругости арматуры $E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$;

– $n = \frac{E_s}{E_b} = 5,26$;

– расчетные значения сопротивления арматуры класса А500: $R_s = 435 \text{ МПа}$;

$R_{sw} = 300 \text{ МПа}$; $R_{sc} = 400 \text{ МПа}$;

– радиус кривизны оболочки $R = 26,15 \text{ м}$;

– толщина оболочки $h = 1,5 \text{ м}$;

– толщина защитного слоя $a = a' = 0,05 \text{ м}$;

– коэффициент армирования $\mu_s = \mu_s' = 2,12 \cdot 10^{-3}$;

– площадь поперечного сечения конструкции единичной ширины $A = 1,45 \text{ м}^2$;

– номинальный диаметр стержней продольной и поперечной арматуры соответственно $d_s = 28 \text{ мм}$; $d_{sw} = 25 \text{ мм}$;

$u_{sw1} = 0,4 \text{ м}$ и $u_{sw2} = 0,4 \text{ м}$ – шаг хомутов по меридиональным и по кольцевым направлениям;

$R_{sw} = 300 \text{ МПа}$ – расчетное сопротивление поперечной арматуры;

d_x – диаметр сечения поперечной арматуры;
 $A_{sw} = \pi d_{sw}^2 / 4 = 490 \text{ мм}^2$ – площадь сечения поперечной арматуры.

$$\sigma^{(1)} = \frac{0,1\sigma_3 + \sigma_3}{2} = -1,1R_b = -39,6 \text{ МПа};$$

$$\tau^{(1)} = \frac{0,1\sigma_3 - \sigma_3}{2} = 0,9R_b = 32,4 \text{ МПа};$$

$$\tau_s^{(2)} = \tau = \sqrt{R_b R_{bt}} = 7,59 \text{ МПа};$$

$$\sigma_c^{(2)} = R_{bt} = 1,6 \text{ МПа}; \quad \tau_c^{(2)} = 0; \quad \sigma^{(2)} = 1,2 \text{ МПа}; \quad \tau^{(2)} = 5,6925 \text{ МПа};$$

$$\sigma_s' = nR_b = 189,36 \text{ МПа};$$

$$A_s = A_{s'} = 5 \frac{\pi d_s^2}{4} = 0,00308 \text{ м}^2;$$

$$M = \frac{1}{2} R_b b h_0 \left(h_0 - \frac{1}{3} \bar{x}_0 \right) + n R_b (h - a') A_{s'} = 37438 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$L_1 = \frac{M}{0,8 R_b b h_0^2} - \frac{\sigma_s'}{R_b} \mu_{s'} = 0,607;$$

$$\sigma_{\text{фп}} = \frac{P_{1\text{max}}}{8h_0} \sqrt{3(1-\nu^2)} = 15668 \text{ кПа};$$

$$\frac{\bar{x}_0}{h_0} = - \left(n \mu_s - \frac{\sigma_{\text{фп}}}{R_b} \mu_s \right) + \sqrt{\left(n \mu_s - \frac{\sigma_{\text{фп}}}{R_b} \mu_s \right)^2 + 2n \mu_s} = 0,144; \quad (21)$$

$$\frac{x_0}{h_0} = \frac{0,5n\mu_s + L_1^2 - \left(\frac{\sigma_{\text{фп}}}{R_b} \mu_s - \frac{\sigma_s'}{R_b} \mu_{s'} \right)}{0,5n\mu_s + L_1 - \left(\frac{\sigma_{\text{фп}}}{R_b} \mu_s - \frac{\sigma_s'}{R_b} \mu_{s'} \right)} = 0,617;$$

$$\frac{x}{h_0} = 2L_1 - \frac{x_0}{h_0} = 0,597; \quad (22)$$

$$\frac{x_1}{h_0} = \frac{0,9\mu_s R_s - n\mu_{s'} R_b - \frac{3}{4} \frac{x}{h_0} \left(\sqrt{R_b R_{bt}} \text{tg} \alpha_2 - R_{bt} \right)}{1,1R_b - \frac{3}{4} \left(\sqrt{R_b R_{bt}} \text{tg} \alpha_2 - R_{bt} \right)} = -0,153 < 0 = 0.$$

Определим несущую способность защитной оболочки.

$$\Theta_0 = \arcsin \left(\frac{d}{2R+h} \right) = 4^{\circ}30';$$

$$\Theta_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha_1 - \arccos \left[\sin(\alpha_1 + \Theta_0) \frac{R + \frac{h}{2}}{R + \frac{h}{2} - x_1} \right] = 4^{\circ}30';$$

$$\Theta_2 = \frac{\pi}{2} - \alpha_2 - \arccos \left[\sin(\alpha_2 + \Theta_1) \frac{R + \frac{h}{2} - x_1}{R + \frac{h}{2} - x} \right] = 9^{\circ};$$

$$AB = \left(R + \frac{h}{2} - x_1 \right) \frac{\sin(\Theta_1 - \Theta_0)}{\sin(\alpha_1 - \Theta_0)} = 0,0 \text{ м};$$

$$P_{sw} = 0,8 N_{sw} A_{sw} R_{sw} = 54422 \text{ кН}.$$

Модуль вектора внешней нагрузки $P_{\text{раз}}$, при которой конструкция по изложенной схеме полностью исчерпывает несущую способность:

$$P_{\text{раз}} = \sum_{i=1}^2 \left(\tau^{(i)} \cos \alpha_i + \sigma^{(i)} \sin \alpha_i \right) \cdot S_i + P_x = 311988 \text{ кН} > 110000 \text{ кН}.$$

Следовательно, в данном случае при падении самолета не произойдет пробивания защитной оболочки, так как максимальное значение внешней силы в 2,84 раза ниже несущей способности защитной оболочки.

Оценка прочности защитной оболочки из высокопрочного бетона В110

Исходные данные:

– начальный модуль деформации бетона $E_b = 45000 \text{ МПа}$;

– расчетные сопротивления высокопрочного бетона марки В110: $R_b = 90 \text{ МПа}$;

$R_{bt} = 3,5 \text{ МПа}$;

– модуль упругости арматуры $E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$;

$$n = \frac{E_s}{E_b} = 4,44;$$

$A_{sw} = \pi d_{sw}^2 / 4 = 490 \text{ мм}^2$ – площадь сечения поперечной арматуры.

Определим несущую способность защитной оболочки.

Модуль вектора внешней нагрузки $P_{\text{раз}}$, при которой конструкция по изложенной схеме полностью исчерпывает несущую способность:

$$P_{\text{раз}} = \sum_{i=1}^2 \left(\tau^{(i)} \cos \alpha_i + \sigma^{(i)} \sin \alpha_i \right) \cdot S_i + P_x = 647191 \text{ кН} \gg 110000 \text{ кН}.$$

Следовательно, в данном случае при падении самолета на защитную оболочку прочность конструкции на пробивание обеспечена с большим запасом в 5,88 раза.

Оценка прочности защитной оболочки из фибробетона марки В120

Исходные данные:

– начальный модуль деформации бетона $E_b = 49000 \text{ МПа}$;

– расчетные сопротивления сталефибробетона: $R_b = 110 \text{ МПа}$; $R_{bt} = 11 \text{ МПа}$;

– модуль упругости арматуры $E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$;

$$n = \frac{E_s}{E_b} = 4,08;$$

Определим несущую способность защитной оболочки.

Модуль вектора внешней нагрузки $P_{\text{раз}}$, при которой конструкция по изложенной схеме полностью исчерпывает несущую способность:

$$P_{\text{раз}} = \sum_{i=1}^2 \left(\tau^{(i)} \cos \alpha_i + \sigma^{(i)} \sin \alpha_i \right) \cdot S_i + P_x = 1016273 \text{ кН} \gg 110000 \text{ кН}.$$

Следовательно, в данном случае при падении самолета на защитную оболочку прочность конструкции на пробивание обеспечена с большим запасом в 9,24 раза.

**Обобщение и сравнительный анализ результатов расчетов
локальной прочности защитной оболочки**

В табл. 2 обобщены результаты расчетов прочности защитной оболочки из различных материалов при падении самолета типа «Фантом».

Т а б л и ц а 2

Обобщение результатов расчетов локальной прочности купольной части защитной оболочки из различных материалов при падении самолета типа «Фантом»

Толщина стенки h , м	Материал	Максимальное значение силы соударения, 10^5 кН	Несущая способность P_{1max} , 10^5 кН
1,5	Бетон марки В50	1,1	3,12
1,5	Высокопрочный бетон В110	1,1	6,47
1,5	Фибробетон марки В120	1,1	10,79

Как показывают результаты расчетов, при идентичных исходных данных в случае замены обычного бетона класса В50 на высокопрочный бетон В110 прочность защитной оболочки возрастает в $\frac{6,47}{3,12} = 2,1$ раза.

При идентичных исходных данных в случае замены обычного бетона класса В50 на фибробетон марки В120 прочность защитной оболочки возрастает в $\frac{10,79}{3,12} = 3,46$ раза.

Заключение

Представленные результаты расчетов подтверждают широкие возможности совершенствования конструктивных решений защитных оболочек путем реализации инновационных материалов, позволяющих существенно экономить материальные ресурсы при одновременном повышении надежности и безопасности сооружений в атомной энергетике.

Из полученных результатов следует, что в случае замены обычного бетона класса В50 на высокопрочный бетон В110, без ущерба прочности, надежности и безопасной эксплуатации защитной оболочки, можно экономить материальные ресурсы, как минимум, в два раза. В случае замены обычного бетона класса В50 на высокопрочный фибробетон марки В120, без ущерба прочности, надежности и безопасной эксплуатации защитной оболочки, достигается экономия материальных ресурсов, как минимум, в три раза.

При этом следует заметить, что для выработки окончательных решений по обоснованию целесообразности реализации высокопрочных бетонов и фибробетона необходимо проводить комплексные исследования сооружений в целом в различных потенциально возможных режимах эксплуатации с учетом требований прочности, устойчивости и надежности конструктивных элементов строительных конструкций, оборудования и основания сооружения.

Список литературы

1. Кириллов, А.П. Напряженно-деформированное состояние железобетонной оболочки при действии локальной кратковременной нагрузки / А.П. Кириллов, А.Е. Саргсян // Информэнерго, Сер. Атомные электростанции. – М., 1984. – Вып. 3. – 72 с.
2. Нормы проектирования железобетонных конструкций локализирующих систем безопасности атомных станций. ПНАЭ Г-10-007-89. – М., 1991. – 40 с.
3. Залесов, А.С. Переход от разрушения по наклонному сечению к продавливанию / А.С. Залесов, К.Е. Ермуханов // Сборник трудов НИИЖБ. – М., 1980. – С. 66–84.

4. Качановский, С.Г. Прочность плит с поперечной арматурой на продавливание / С.Г. Качановский // Сборник трудов НИИЖБ. – М., 1982. – С. 96–105.
5. Яшин, А.В. Влияние неоднородных (сложных) напряженных состояний на прочность и деформацию бетона, включая область, близкую к разрушению / А.В. Яшин // Прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных конструкций. – М., 1979. – С. 187–202.
6. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 414 с.
7. Калашников, В.И. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – №4 (688). – С. 30–37.
8. Калашников, В.И. Концепция стратегического развития пластифицированных порошковоактивированных бетонов нового поколения / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов, В.П. Архипов // Высокопрочные цементные бетоны: технологии, конструкции, экономика (ВПБ-2016): сборник тезисов докладов Междунар. науч.-техн. конф. – Казань, 2016. – С. 36.
9. Либлани, П. Влияние технологии перемешивания на свойства сверхпрочных бетонов / Петер Либлани, Даниэль Рингвельски. // СРІ – Международное бетонное производство. – 2012. – №3. – С. 32–35.
10. Каприелов, С.С. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций / С.С. Каприелов, И.А. Чилин // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: науч. тр. III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону (Москва, 12-16 мая 2014 г.). – М., 2014. – Т. 3. – С. 158–164.
11. Сильвер Део. Аспекты применения неметаллической фибры. Исследование применения фибры для изделий из бетона / Сильвер Део // СРІ – Международное бетонное производство. – 2011. – №4. – С. 46–56.
12. Калашников, В.И. Высокоэффективные самоуплотняющиеся порошково-активированные песчаные бетоны и фибробетоны / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, В.М. Володин, Д.А. Абрамов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1–2. – URL: <https://www.science-education.ru/pdf/2015/1-2/237.pdf>
13. Баженов, Ю.М. Современная технология бетона / Ю.М. Баженов // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: науч. тр. III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону (Москва, 12-16 мая 2014 г.). – М., 2014. – Т. 7. – С. 23–28.
14. Фаликман, В.Р. Строительно-технические свойства особо высокопрочных быстротвердеющих бетонов / В.Р. Фаликман, Ю.В. Сорокин, О.О. Калашников // Бетон и железобетон. – 2004. – №5. – С. 5–10.
15. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. – М., 2004. – 54 с.
16. Саргсян, А.Е. Динамика и сейсмостойкость сооружений атомных станций / А.Е. Саргсян // РФЯЦ-ВНИИЭФ. – Саров, 2013. – 550 с.

References

1. Kirillov, A.P. Stress-strain state of reinforced concrete containment under local short-term load / A.P. Kirillov, A.E. Sargsyan // Informenergo, Series Nuclear Power Plants. – М., 1984. – Iss. 3. – 72 p.
2. PNAEG-10-007-89. Standards for the design of reinforced concrete structures of localizing safety systems of nuclear power plants. – М., 1991. – 40 p.
3. Zalesov, A.S. The transition from destruction along an inclined section to punching / A.S. Zalesov, K.E. Ermukhanov // Collection of works of NIIZHB. – М., 1980. – P. 66–84.
4. Kachanovsky, S.G. The strength of plates with transverse reinforcement for punching / S.G. Kachanovsky // Collection of works of NIIZHB. – М., 1982. – P. 96–105.

5. Yashin, A.V. The influence of uniaxial (complex) stresses on the strength and deformation of concrete, including the area close to destruction / A.V. Yashin // Strength, rigidity and crack resistance of reinforced concrete structures. – M., 1979. – P. 187–02.
6. Karpenko, N.I. General models of reinforced concrete mechanics / N.I. Karpenko. – M.: Stroyizdat, 1996. – 414 p.
7. Kalashnikov, V.I. Suspension-filled concrete mixes for powder-activated concrete of a new generation / V.I. Kalashnikov, V.T. Erofeev, O.V. Tarakanov // News of higher educational institutions. Construction. – 2016. – No4 (688). – P. 30–37.
8. Kalashnikov, V.I. The concept of strategic development of plasticized powder-activated concrete of a new generation / V.I. Kalashnikov, V.T. Erofeev, O.V. Tarakanov, V.P. Arkhipov // High-strength cement concrete: technology, construction, economics (VPB-2016): collection of abstracts of international reports. Scientific-technical. conf. – Kazan, 2016. – P. 36.
9. Liblani, P. The influence of mixing technology on the properties of heavy-duty concrete / Peter Liblani, Daniel Ringwelski. // CPI – International Concrete Production. – 2012. – No3. – P. 32–35.
10. Kapriylov, S.S. Ultra-high-strength, self-compacting fiber-reinforced concrete for monolithic structures / S.S. Kapriylov, I.A. Chilin // Concrete and reinforced concrete – a look into the future: scientific papers of the III All-Russian (II International) conference on concrete and reinforced concrete (Moscow, May 12-16, 2014). – M., 2014. – Vol. 3. – P.158–164.
11. Silver Deo. Aspects of the use of non-metallic fiber. Study of the use of fiber for concrete products / Silver Deo // CPI – International Concrete Production. – 2011. – No4. – P. 46–56.
12. Kalashnikov, V.I. Highly effective self-compacting powder-activated sand concrete and fiber concrete / V.I. Kalashnikov, V.T. Erofeev, V.M. Volodin, D.A. Abramov // Modern problems of science and education. – 2015. – No. 1–2. – URL: <https://www.science-education.en/pdf/2015/1-2/237.pdf>
13. Bazhenov, Y.M. Modern technology of concrete / Y.M. Bazhenov // Concrete and reinforced concrete – a look into the future: scientific papers of the III All-Russian (II International) conference on concrete and reinforced concrete (Moscow, May 12-16, 2014). – M., 2014. – Vol. 7. – P. 23–28.
14. Falikman, V.R. Building-technical properties of especially high-strength quick-hardening concrete / V.R. Falikman, Y.V. Sorokin, O.O. Kalashnikov // Concrete and reinforced concrete. – 2004. – No5. – P. 5–10.
15. SP 52-101–2003. Concrete and reinforced concrete structures without prestressing reinforcement. – M., 2004. – 54 p.
16. Sargsyan, A.E. Dynamics and seismic stability of nuclear power plants / A.E. Sargsyan // RFNC-VNIIEF. – Sarov, 2013. – 550 p.

УДК 691.3

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

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

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

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

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

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

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

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

ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ КОМПЛЕКСНЫХ ДОБАВОК НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МИКРОСТРУКТУРУ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

О.В. Тараканов, Е.А. Белякова, Е.С. Утюгова

Изучено влияние компонентов комплексных добавок для бетонных смесей и бетонов на характер изменения состава гидратных фаз цементного камня, кинетику начального структурообразования и дальнейшего твердения бетонной смеси. Выявлено, что традиционные ускорители твердения бетона оказывают существенное влияние не только на фазовый состав продуктов гидратации цементного камня, но и на кинетику начального структурообразования. Установлено, что в зависимости от дозировок неорганических компонентов добавок происходит активация образования гидросиликатных и гидроалюминатных фаз. При повышенных дозировках, вследствие формирования на частицах вяжущего гидратных оболочек, происходит замедление начального структурообразования. Выполненные рентгенофазовые исследования образцов цементного камня с добавками хлористых солей показали, что характерной особенностью является увеличение интенсивности отражений $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в большей степени для образцов с добавками CaCl_2 и NaCl . Определено, что введение неорганических добавок даже в небольших дозировках приводит к существенным изменениям в соотношении гидратных фаз, имеющих различную кристаллическую структуру и плотность.

Ключевые слова: цементный камень, комплексные добавки, фазовый состав, микроструктура, влияние

THE INFLUENCE OF COMPLEX ADDITIVES COMPONENTS ON PHASE COMPOSITION AND MICROSTRUCTURE OF CEMENT STONE

O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova, E.S. Utyugova

The influence of the components of complex additives for concrete mixtures and concrete on the nature of changes in the composition of the hydrated phases of cement stone, the kinetics of the initial structure formation and further hardening of the concrete mixture is studied. It is revealed that traditional concrete hardening accelerators have a significant effect not only on the phase composition

of cement stone hydration products, but also on the kinetics of the initial structure formation. It has been established that, depending on the dosages of inorganic components of the additives, the formation of hydrosilicate and hydroaluminat phases is activated. At elevated dosages, due to the formation of binder hydrate shells on the particles, the initial structure formation slows down. The performed X-ray phase studies of cement stone samples with the addition of chloride salts show that a characteristic feature is an increase in the intensity of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reflections to a greater extent for samples with CaCl_2 and NaCl additives. It is determined that introduction of inorganic additives even in small doses leads to significant changes in the ratio of hydrated phases having different crystalline structure and density.

Keywords: cement stone complex additives, phase composition microstructure, hydrated phases, influence

Современные бетоны как традиционные, так и высокопрочные нового поколения изготавливаются с применением супер- и гиперпластификаторов (СП и ГП) в комплексе с минеральными тонкомолотыми компонентами с целью повышения эффективности пластифицирующих добавок и связывания гидратной извести в гидросиликатные структуры. Кроме указанных компонентов многие производители вводят в состав добавок ускорители твердения с целью нейтрализации замедляющего влияния СП и ГП, а также повышения ранней прочности, плотности, морозостойкости бетона. Вместе с тем характер влияния комплексных добавок на состав продуктов гидратации и формирование начальной структуры во многом определяет физико-механические свойства бетона при последующем твердении, в том числе его долговечность.

Исследования направлены на изучение характера влияния традиционных ускорителей твердения бетона на фазовый состав продуктов гидратации цементного камня и кинетику начального структурообразования.

В качестве добавок были приняты химические соединения, наиболее часто применяемые в составе комплексных, а также некоторых противоморозных добавок: Na_2SO_4 , K_2SO_4 , CaCl_2 , NaCl и др. Вещества, различающиеся катионами в добавках, были приняты с целью уточнения характера их влияния на фазовый состав гидратов цементного камня. Добавки вводились с водой затворения в количестве от 1 до 7 % от массы цемента. Исследования проводились в период 3-60 суток нормального твердения. Рентгенофазовые исследования выполняли на дифрактометре ДРОН 3М в интервале углов $2\theta=10-80^\circ$ при длине волны рентгеновского излучения $\lambda=1,5418 \text{ \AA}$.

Анализ состава продуктов гидратации цементного камня с добавками Na_2SO_4 и K_2SO_4 в возрасте 28 суток показал, что характерной особенностью является увеличение интенсивности отражений $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (СН) в ранние сроки твердения. Однако к 28 суткам интенсивность отражений СН на рентгенограммах образцов с добавкой K_2SO_4 заметно снижается. Интенсивность отражений безводных силикатов в образцах с добавками Na_2SO_4 и K_2SO_4 заметно ниже, чем в контрольном образце, что косвенно свидетельствует об активации гидратации силикатных фаз цемента в присутствии добавок. Характерно, что существенного различия в параметрах интенсивностей отражения АFm-фаз и этtringита в присутствии обеих добавок не обнаружено. Однако анализ прочностных показателей образцов свидетельствует о том, что в большей степени повышение прочности характерно для добавки K_2SO_4 .

Известно, что этtringит может существовать в контакте с растворами сульфата и нитрата натрия, хлорида кальция, а также с некоторыми другими солями, но разлагается в присутствии карбоната и сульфата магния. Следует также иметь в виду, что в растворах сульфатов и хлоридов кальция и натрия моногидросульфалюминат кальция (ГСАК1) переходит в этtringит [1].

В ходе экспериментов характерных отражений ГСАК1 в цементном камне с добавками Na_2SO_4 и K_2SO_4 практически не обнаружено. Кроме того, можно предположить, что в присутствии традиционных ускорителей твердения происходят поляризация межслоевой воды в гидратах АFm-фаз и их легирование, вследствие чего изменяется скорость кристаллизации и последующей перекристаллизации гидроалюминатов кальция. Таким образом, зная состав добавок, можно в определенной степени прогнозировать образование АFm- и АFt-фаз и, соответственно, оценить их влияние на процессы гидратации и твердения цементных систем.

Выполненные рентгенофазовые исследования образцов цементного камня с добавками хлористых солей показали, что характерной особенностью является увеличение интенсивности отражений СН в большей степени для образцов с добавками CaCl_2 и NaCl . В отношении гидроалюминатных фаз следует отметить, что хлористые соли способствуют активации образования фаз C_3AH_6 и C_3AH_3 . На рентгенограммах образцов цементного камня с добавками хлористых солей в период твердения 3-28 сут обнаружены также стабильные отражения этtringита и ГСАК1, что свидетельствует о том, что они могут присутствовать в структуре независимо друг от друга.

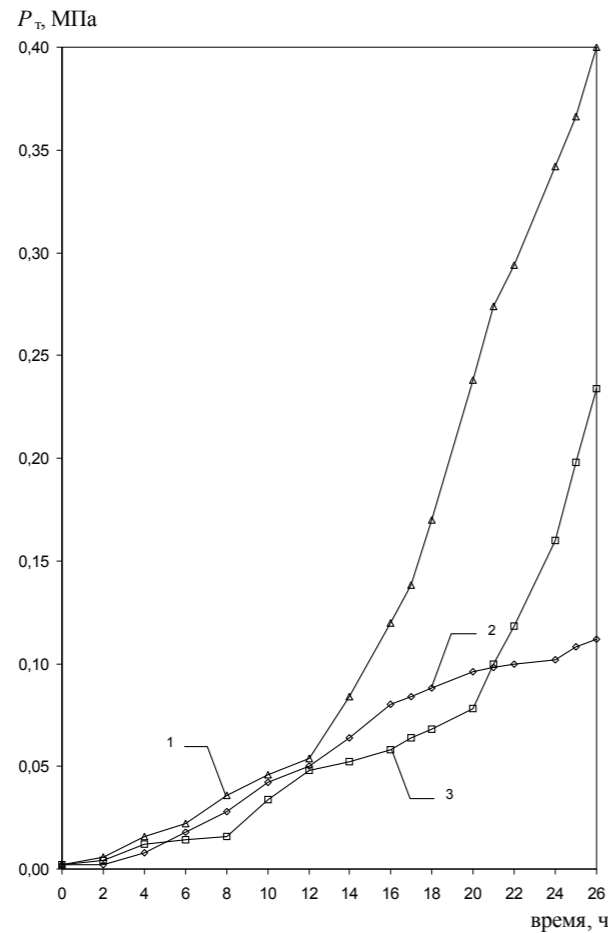
Отмечается [1], что процессы гидратации и твердения цементных систем с повышенным содержанием ускорителей твердения протекают с образованием кристаллизационного каркаса из игольчатых кристаллов двойных и основных солей-гидратов, уплотняющих и упрочняющих структуру цементного камня. Однако при анализе выполненных рентгенофазовых исследований образцов цементного камня с добавками 1 % хлористых солей характерные отражения двойных и основных солей обнаружены лишь в отдельных случаях, интенсивность их невелика и составляет лишь 10-15 % от наиболее интенсивных линий. Это позволяет сделать предположение, что при небольших дозировках подобные соли не оказывают существенного влияния на повышение прочности, а основной причиной являются структурные изменения гидросиликатных и гидроалюминатных фаз и изменение соотношения этих фаз и извести в твердеющей системе. Следует иметь в виду, что характер влияния добавок на формирование гидросиликатной структуры цементного камня по значениям $d=3,03-3,06 \text{ \AA}$ и $d=2,78-2,80 \text{ \AA}$ оценить достаточно сложно вследствие того, что в процессе гидратации в присутствии добавок как хлоридов, так и сульфатов происходит искажение кристаллических решеток гидросиликатов кальция (ГСК) и СН под воздействием катионов и анионов добавок, что приводит к изменениям межплоскостных расстояний и наложению отражений фаз CSH (3,07; 2,80 \AA) на отражения алита (3,0393; 2,7761; 2,744 \AA) и кальцита (3,029 \AA). Вместе с тем резкое увеличение интенсивности отражений СН на рентгенограммах C_3S , гидратированного в присутствии хлористых солей, свидетельствует об активации процессов гидролиза и гидратации безводных силикатов и, как следствие, о выходе в систему ионов Ca^{2+} , а также образовании СН и ГСК [2, 3].

Неорганические добавки применяются в составе комплексных, как правило, в небольших дозировках (1-1,5 % от массы цемента), и лишь при использовании их в составе противоморозных (хлориды, нитраты, нитриты, ацетаты, формиаты кальция и натрия) дозировка может быть увеличена до 3-7 %. В случае повышенных дозировок в цементных системах, с одной стороны, может происходить активация образования ГСК и гидроалюминатов кальция, а с другой – процесс структурообразования может быть замедлен вследствие формирования на частицах вяжущих гидратных оболочек, препятствующих гидратации.

С целью установления характера влияния обычных и повышенных дозировок хлористых солей была выполнена серия экспериментов по оценке изменения пластической прочности (Рт) цементно-песчаных растворов (Ц : П =1:2) с комплексными добавками на основе замедлителя твердения сахарозы и хлористых солей. Сахароза вводилась в количестве 0,7 % от массы цемента с целью замедления гидратации силикатных фаз цемента, поскольку на алюминатные фазы сахара практически не оказывают отрицательного влияния.

Установлено, что при дозировках хлористых солей (CaCl_2 , NaCl и KCl) в количестве 2-5 % отмечается незначительное повышение пластической прочности в период 6-8 часов после водозатворения. Дальнейшее увеличение дозировок хлористых солей (до 7 %) приводит к резкому замедлению кинетики начального структурообразования (см. рисунок).

По данным рентгенофазового анализа образцов C_4AF , гидратированных в присутствии хлористых солей, ранее установлено, что подобные добавки при небольших дозировках приводят к активации образования АFm-фаз и C_3AH_6 (табл. 1, 2).



Изменение пластической прочности цементно-песчаного раствора 1:2, В/Ц = 0,53, Старооскольский ПЦ 400Д0:
 1 – с добавкой сахарозы (0,7 %); 2 – с добавкой сахарозы + NaCl (0,7 % + 7 %);
 3 – с добавкой сахарозы + CaCl₂ (0,7 % + 7 %)

Т а б л и ц а 1

Расчетные данные дифрактограммы образца C₄AF, гидратированного без добавки

2α, °	d, Å	I, %	I, мм	Фаза
1	2	3	4	5
11.55	7.6613	25	10	3CaOAC ₂ O ₃ Ca CO ₃ 12H ₂ O
12.20	7.2546	25	10	CAH ₁₀
17.25	5.1405	100	40	C ₃ AH ₆
19.96	4.4482	75	30	C ₃ AH ₆
23.75	3.7463	8	3	CAH ₁₀
24.40	3.6479	13	5	CAH ₁₀
25.43	3,5025	8	3	CAH ₁₀
26.55	3.3572	55	22	C ₃ AH ₆
28.35	3.1480	53	21	C ₃ AH ₆
31.05	2.8802	5	2	CAH ₁₀ ; C ₄ AH ₁₉
31.80	2.8139	75	30	C ₃ AH ₆
32.15	2.7841	15	6	C ₄ AH ₁₉
32.81	2.7296	5	2	C ₄ AH ₁₉
33.50	2.6749	15	6	C ₂ AH ₈ ; CAH ₁₀ ; C ₄ AH ₁₉
33.95	2.6405	50	20	Ca(OH) ₂
34.95	2.5672	23	9	CAH ₁₀ ; C ₂ AH ₈

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
36.40	2.4682	25	10	CAH ₁₀
39.25	2.2953	83	33	C ₃ AH ₆
44.35	2.0425	83	33	C ₃ AH ₆
45.60	1.9893	10	4	C ₄ AF
47.10	1.9294	13	5	Ca(OH) ₂
50.25	1.8156	13	5	3CaOAC ₂ O ₃ SiO ₂
52.33	1.7482	30	12	C ₂ AH ₈
53.50	1.7127	23	9	C ₂ AH ₈
54.45	1.6851	50	20	C ₃ AH ₆
57.62	1.5997	5	2	C ₃ AH ₆
58.65	1.5740	23	9	C ₃ AH ₆

Т а б л и ц а 2

Расчетные данные дифрактограммы образца C₄AF, гидратированного с добавкой 1 % CaCl₂

2α, °	d, Å	I, %	I, мм	Фаза
17.25	5.1405	100	65	C ₃ AH ₆
19.20	4.6226	6	4	C ₃ AH ₆
19.96	4.4482	54	35	C ₃ AH ₆
26.50	3.3634	62	40	C ₃ AH ₆
28.40	3.1426	55	36	C ₃ AH ₆
31.80	2.8139	85	55	C ₃ AH ₆
32.12	2.7866	51	33	C ₄ AH ₁₉
33.50	2.6749	5	3	CAH ₁₀ ; C ₂ AH ₈ ; C ₄ AH ₁₉
33.90	2.6443	5	3	Ca(OH) ₂
34.95	2.5672	23	15	CAH ₁₀ ; C ₂ AH ₈
36.40	2.4682	34	22	CAH ₁₀
39.25	2.2953	98	64	C ₃ AH ₆
41.42	2.1799	3	2	3CaOAl ₂ O ₃ CaCl ₂ 10H ₂ O
44.38	2.0412	92	60	C ₃ AH ₆
45.60	1.9893	8	5	CAH ₁₀
47.18	1.9263	3	2	Ca(OH) ₂
50.40	1.8106	8	5	3CaOAC ₂ O ₃ SiO ₂₂
52.40	1.7461	31	20	C ₂ AH ₈
53.50	1.7127	18	12	C ₂ AH ₈
54.55	1.6822	52	34	C ₃ AH ₆
57.60	1.6002	5	3	CAH ₁₀
58.76	1.5713	6	4	C ₃ AH ₆

При увеличении количества добавок в смеси процесс активации может приводить к формированию гидроалюминатных оболочек на частицах вяжущего, что, в свою очередь, способствует снижению скорости образования гидроалюминатного каркаса и интенсивности роста пластической прочности. Кроме того, возможна стабилизация гидратов AFm-фаз. Однако следует иметь в виду, что параллельно с кристаллизацией AFm- и AFt-фаз в цементной системе протекают процессы их перекристаллизации с выделением избыточной воды и разуплотнением структуры, что может способствовать снижению скорости начального структурообразования и кинетики твердения, особенно при повышенных дозировках добавок.

Основные выводы:

1. Использование неорганических добавок даже в небольших дозировках (не говоря о повышенных) приводит к существенным изменениям в соотношении гидратных фаз, имеющих различную кристаллическую структуру и плотность.

2. В связи с тем, что в состав большинства модификаторов входят пластифицирующие добавки, способствующие замедлению гидратации основных носителей прочности гидросиликатов кальция, использование минеральных солей в составе комплексных смесей может активировать гидратацию. Но, с другой стороны, превышение дозировок (особенно в составе противоморозных добавок свыше 3-5 % от массы вяжущего) может привести к замедлению процессов раннего структурообразования и твердения.

3. При проектировании состава добавок необходимо учитывать влияние всех индивидуальных компонентов на процессы структурообразования и состав гидратных фаз цементных систем. В противном случае возможно получение отрицательных эффектов, таких, как замедление кинетики начального структурообразования либо резкое ускорение схватывания.

4. В период последующего твердения перекристаллизация гидроалюминатной составляющей цементного камня при изменении температурных условий эксплуатации может приводить к спадам прочности и появлению характерного пилообразного профиля кинетики твердения цементных материалов, что является важным фактором при прогнозировании эксплуатационных свойств бетонных конструкций.

Список литературы

1. Тараканов, О.В. Противоморозные добавки на основе суперпластификаторов, минеральных и ускоряющих модификаторов / О.В. Тараканов, Е.А. Белякова, В.И. Горшков // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 1. – С. 53–58.
2. Тараканов, О.В. Влияние замедляющих добавок на формирование структуры цементных композиций / О.В. Тараканов, Р.С. Логинов // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – № 1. – С. 45–52.
3. Тараканов, О.В. Рациональное применение полифункциональных добавок в технологии зимнего бетонирования / О.В. Тараканов, Т.В. Пронина // Строительные материалы. – 2009. – № 2. – С. 10–13.

References

1. Tarakanov, O.V. Antifreeze additives based on superplasticizers, mineral and accelerating modifiers / O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova, V.I. Gorshkov // Regional architecture and engineering. – 2014. – №1. – P. 53–58.
2. Tarakanov, O.V. The effect of retardants on the formation of the structure of cement compositions / O.V. Tarakanov, R.S. Loginov // Regional architecture and engineering. – 2009. – №1. – P. 45–52.
3. Tarakanov, O.V. Rational use of multifunctional additives in winter concreting technology / O.V. Tarakanov, T.V. Pronina // Building Materials. – 2009. – № 2. – P. 10–13.

УДК 519.7:691

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

Будылина Евгения Александровна,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Инфокогнитивные
технологии»
E-mail: bud-ea@yandex.ru

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

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

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

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

Penza State University of Architecture
and Construction

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

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

Danilov 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

ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ МОДУЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

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

На основе опыта разработки технических систем различной природы, в том числе управляемых в пространстве эргатических систем, предлагаются методологические принципы управления качеством сложных систем модульной структуры. Определяющим для получения качественных моделей является описание различных взаимодействий факторов, создающих системный эффект влияния факторов на моделируемый критерий качества. Основное внимание уделяется формированию иерархической системы целей, многокритериальности, объективному анализу эффективности системы, выбору наиболее рационального варианта, определению глобального критерия качества, отражающего всю совокупность свойств рассматриваемой системы. Приводится реализация предлагаемых принципов при разработке композиционных материалов специального назначения, а также при оценке управляющих воздействий оператора эргатической системы с разработкой соответствующих функционалов качества.

Ключевые слова: композиты, сложные системы, управление качеством, принципы управления, функционалы качества, управляющие воздействия оператора

COMPLEX SYSTEMS OF MODULAR STRUCTURE: QUALITY CONTROL PRINCIPLES

Е.А. Budylina, I.A. Garkina, A.M. Danilov

Based on the experience of developing technical systems of various nature, including space-controlled ergatic systems, the methodological principles of quality management of complex systems of modular structure are proposed. The determining factor for obtaining high-quality models is the description of various interactions of factors creating a systemic effect of the influence of factors on the simulated quality criterion. The main attention is paid to the formation of a hierarchical system of goals, multi-criteria, an objective analysis of the effectiveness of the system, the choice of the most

rational option, the definition of a global quality criterion that reflects the totality of the properties of the system in question. The implementation of the proposed principles is given in the development of composite materials for special purposes, as well as in assessing the control actions of the operator of an ergatic system with the development of appropriate quality functionals.

Keywords: composites, complex systems, quality management, management principles, quality functionals, operator control actions

Качество системы определяется совокупностью свойств системы и их синергизмом; оценивается по отношению к качествам других аналогичных однородных систем или *эталонной системы*. Сравнение производится на основе *моделирования системы с пошаговой корректировкой модели (гомеостатическая концепция моделирования)* включением в модель программных механизмов адаптации и интерпретации и возможностью диалога с исследователем. В циклическом обучающем процессе нулевое приближение – *каркас модели*; первое – *модельный эксперимент*; второе – приближение на основе корректировки первого и т.д.

Оценка модели на основе *качественных критериев* производится из условий простоты использования, тестируемости и возможности применения на ранних стадиях когнитивного моделирования слабоструктурированных систем и в других проблемных областях. Промежуточное положение между количественными и качественными критериями занимают *критерии с балльными шкалами*. Определяющим для получения качественных моделей является описание различных взаимодействий факторов, *создающих системный эффект влияния факторов на моделируемый критерий качества* [1...3].

Представления о формировании структуры и свойств системы всегда приближенные, поэтому невозможно точно рассчитать и реализовать *гарантированное качество* в рамках какой-либо теории (всегда в описании системы что-то будет оставаться неучтенным; нельзя получить абсолютно точные результаты измерений и т.д.). Для обеспечения гарантированного качества необходимо, чтобы значения показателей лежали в *обоснованных допустимых пределах*. *Подтверждаемость* связана с возможностью экспериментальной проверки *модельных показателей качества*. Основными проблемами управляемости являются формирование иерархической системы целей, многокритериальность, объективный анализ эффективности системы, выбор наиболее рационального варианта, определение глобального критерия качества, отражающего всю совокупность свойств рассматриваемой системы. Они решаются с применением вероятностных методов (корреляционный анализ, экспертные оценки, ранговая корреляция и т.д.). *Численное выражение* каждого из контролируемых параметров является результатом измерения и *количественного оценивания* (измеряемые величины могут быть как размерными, так и безразмерными). *Объективные сведения* о свойствах системы получаются на этапе метрологического измерения свойств. Выбор же эталона качества, с данными которого сопоставляются сведения о свойствах исследуемой системы, является *субъективным*, равно как и *итоговая характеристика уровня качества* систем [4...5]. При оценке качества должны учитываться как отдельные свойства в их совокупности, так и характеристики внутренней определенности: уровень внутренней структурированности, устойчивости структуры и ее элементов и/или их приспособляемости к изменяющимся условиям функционирования и т.п. С метрологической (в частности с квалиметрической) позиции достаточно учесть только внешние проявления качества (качество-образующие свойства). Полученный квалиметрический результат (*численный показатель уровня качества исследованного объекта по отношению к качеству эталона*) – это еще не окончательная оценка качества, а лишь основа оценки качества. *Никакой выбранный эталон качества не может удовлетворить всех* (остается открытым вопрос, в какой степени полученным уровнем качества определяется соответствие интересам или потребностям).

Низший иерархический уровень показателей определяется единичными показателями простейших свойств, формирующих качество. Показателем качества высшего иерархического уровня является интегральный показатель. Показатель любого обоб-

щения, кроме самого нижнего (исходного) уровня, предопределяется соответствующими показателями предшествующего иерархического уровня.

При комплексной оценке качества недопустимо использование взаимообусловленных, дублирующих показателей одного и того же свойства. Разноразмерные показатели свойств должны быть приведены к одной размерности или выражены в безразмерных единицах измерения. В комплексном показателе качества каждый показатель отдельного свойства должен быть скорректирован коэффициентом его весомости (сумма численных значений коэффициентов весомостей всех показателей качества на любых иерархических ступенях оценки имеет одинаковое значение). В этом случае появляется возможность использования *аддитивного глобального критерия в виде линейной свертки*

$$q(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^m c_j q_j(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Возможна *нормировка частных критериев*, например при $n = 2$:

$$q(x_1, x_2) = c_1 \frac{q_1(x_1, x_2) - \bar{q}_1}{S_{q_1}} + c_2 \frac{q_2(x_1, x_2) - \bar{q}_2}{S_{q_2}};$$

здесь $\bar{q}_1 = \frac{1}{S} \iint_S q_1(x_1, x_2) dx_1 dx_2$, $\bar{q}_2 = \frac{1}{S} \iint_S q_2(x_1, x_2) dx_1 dx_2$ – средние значения q_1, q_2 в

рассматриваемой области; $S_{q_1} = \sqrt{\frac{1}{S} \iint_S (q_1 - \bar{q}_1)^2 dx_1 dx_2}$, $S_{q_2} = \sqrt{\frac{1}{S} \iint_S (q_2 - \bar{q}_2)^2 dx_1 dx_2}$ –

средние отклонения q_1, q_2 от \bar{q}_1, \bar{q}_2 ; S – площадь рассматриваемой области.

Превентивное или корректирующее воздействия на объект с целью изменения качества осуществляются по результатам оптимизации показателей свойств и качества в целом; прогнозирования качества; определения конкурентоспособности и др. Естественно, указанными выше методологическими принципами не исчерпываются все концептуальные положения оценки качества. Однако они являются основополагающими.

Приведем некоторые результаты практической реализации авторами приведенных *принципов управления качеством сложных систем модульной структуры (с трансфером методов из одной отрасли в другую)*.

С учетом простоты и получения приемлемой точности описания управляющих воздействий оператора транспортного самолета представим обобщенный вектор управления [6...8], состоящий из компонент: A_i – амплитуда импульсов управления; T_i – длительность импульсов; n – число импульсов при заданной длительности реализаций T_0 (рис. 1).

Обычно справедлива гипотеза Милсама – Миллера об импульсном характере управления человека-оператора. При фиксированной длительности T_0 реализации *чем больше n , тем выше активность и соответственно психофизиологическая напряженность оператора*. Ясно, что активность человека-оператора не может быть нулевой (*оператор в процессе управления не только действует в импульсном режиме, но и опрашивает объект в процессе управления*); она не может быть и бесконечной.

Поэтому нормированное значение $\frac{T_0}{n}$ (нормировку можно производить делением на

среднее квадратичное отклонение) должно принадлежать некоторому оптимальному интервалу. Если полагать, что весовые константы аддитивного глобального критерия качества все положительны, то из сказанного вытекает, что частными критериями

качества целесообразно принять как нормированные значения $\frac{T_0}{n}$, так и $\frac{n}{T_0}$ (будут ограничены как сверху, так и снизу; их оптимальные значения зависят от заданной длительности T).

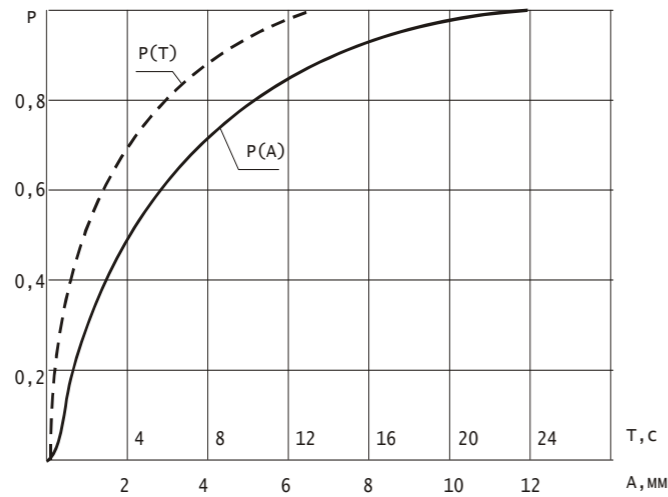


Рис. 1. Вероятности амплитуды и длительностей импульсных управляющих движений оператора

Энергетические затраты на стабилизацию программного управления должны быть минимальными. Строго говоря, они должны быть оптимальными: при очень малых затратах система будет «вялой», а слишком большие затраты также недопустимы; очевидна необходимость включения в число частных критериев нормированных значений $\frac{A_i}{T_i}$ (при положительных безразмерных весовых константах!). В известном смысле $\frac{A_i}{T_i}$ характеризует перегрузки в системе. Поэтому в первом приближении можно ограничиться включением в число частных критериев нормированной величины $\max_i \frac{A_i}{T_i}$.

Таким образом, предлагаемый функционал качества системы будет иметь вид

$$\Phi = a_1 \max_i \left(\frac{\tilde{A}_i}{\tilde{T}_i} \right) + a_2 \sum_i \tilde{S}_i + a_3 \frac{\tilde{T}_0}{n} + a_4 \frac{n}{\tilde{T}_0}; \left(\sum_i a_i = 1; \sim - \text{знак нормировки} \right).$$

Выбор весовых констант легко осуществляется по степени корреляционных связей между значениями Φ и частными критериями качества (в первом приближении весовые константы можно принять одинаковыми). Функционал не претендует на полноту; его можно уточнить, введя дополнительные частные критерии.

Эффективно использовалась свертка и при синтезе композиционных материалов введением метрики в пространстве целевых функций. В результате решения однокритериальной задачи

$$q_j(\mathbf{x}) \rightarrow \max, j = \overline{1, m}$$

в каждой j -й задаче определялся вектор $\mathbf{x} = \mathbf{x}_j$, доставляющий максимальное значение критерию $q_j(\mathbf{x})$:

$$q_j(\mathbf{x}_j) = \hat{q}_j.$$

Совокупность скалярных величин \hat{q}_j в пространстве критериев определяет точку «абсолютного максимума» $(\hat{q}_1, \hat{q}_2, \dots, \hat{q}_m)$. При различных $\mathbf{x}_j, j = \overline{1, m}$ не существует выбора, позволяющего достичь этой точки; $(\hat{q}_1, \hat{q}_2, \dots, \hat{q}_m)$ является недостижимой в пространстве критериев.

Рассмотрим скалярную функцию векторного аргумента

$$h(\mathbf{x}) = \sqrt{\sum_{jk} r_{jk} (q_j(\mathbf{x}) - \hat{q}_j)(q_k(\mathbf{x}) - \hat{q}_k)},$$

где $\mathbf{R} = (r_{ij})$ – положительно определенная матрица. При $\mathbf{R} = \mathbf{E}$ имеем

$$h(\mathbf{x}) = \sqrt{\sum_j (q_j(\mathbf{x}) - \hat{q}_j)^2}$$

– евклидово расстояние от точки $(q_1(\mathbf{x}), q_2(\mathbf{x}), \dots, q_m(\mathbf{x}))$ до точки $(\hat{q}_1, \hat{q}_2, \dots, \hat{q}_m)$ в пространстве критериев.

Минимизация скалярного критерия качества $h(\mathbf{x})$ позволяет определить предельные возможности достижения «абсолютного максимума».

В рассматриваемой области изменения факторов $0,5 \leq x_1 \leq 0,6$; $0,35 \leq x_2 \leq 0,4$ наименьшее значение пористости

$$q_1(x_1, x_2) = 196,9 - 1217x_1 + 623,6x_2 - 1064 + 1532x_1^2$$

достигается в точке $M_0(0,519; 0,35)$, $\hat{q}_1 = 2,73$; наибольшее значение прочности на сжатие

$$q_2(x_1, x_2) = -305,3 + 1188x_1 + 57,20x_2 - 1148x_1^2$$

достигается в точке $M_1(0,518; 0,4)$, $\hat{q}_2 = 25,1$.

Решение задачи $q_1(x_1, x_2) \rightarrow \min$, $q_2(x_1, x_2) \rightarrow \max$ при $R = E$ сводится к определению в области $0,5 \leq x_1 \leq 0,6$; $0,35 \leq x_2 \leq 0,4$ наименьшего значения

$$h_1(x_1, x_2) = \sqrt{(q_1(x_1, x_2) - 2,73)^2 + (q_2(x_1, x_2) - 25,1)^2},$$

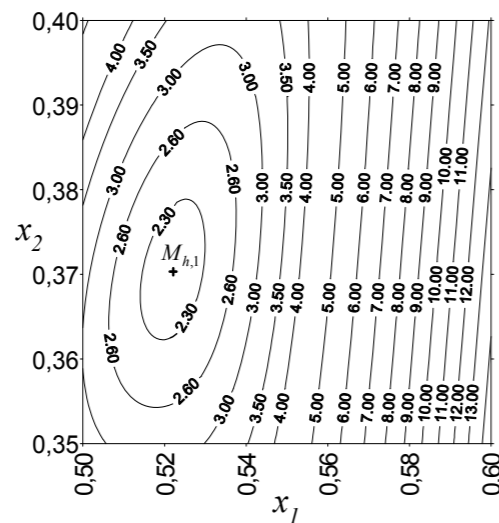
(задача нелинейного программирования $h(x_1, x_2) \rightarrow \min$ при ограничениях $0,5 \leq x_1 \leq 0,6$; $0,35 \leq x_2 \leq 0,4$); $h_{1,\min} = h_1(0,522; 0,370) = 2,194$.

Отметим, что ограничения $q_1 \leq 4\%$, $q_2 \geq 22$ МПа не входят в заданную область. Поэтому не следует ожидать, что эти ограничения всегда будут выполнены для точки минимума; действительно, в этой точке $q_1 = 4,14\% > 4\%$. Учет ограничений может быть выполнен явно введением штрафной функции или изменением метрики в пространстве критериев качества.

Введение штрафной функции смещает точку (условного) минимума к положению $M_h(0,522; 0,368)$ (для этой точки $q_1 = 4,0\%$, $q_2 = 23,3$ МПа, $h_{\min} = 2,201$).

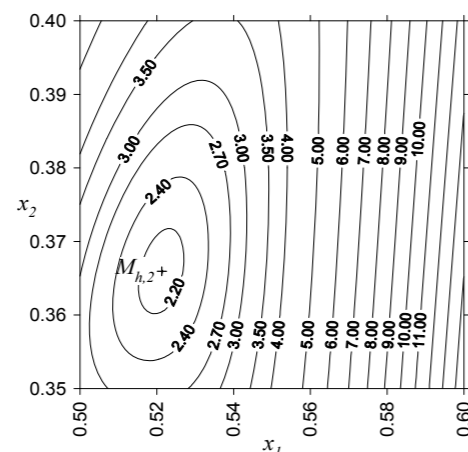
Изменение метрики сводится к замене единичной матрицы на диагональную, элементы главной диагонали которой представляют собой весовые коэффициенты, выражающие предпочтения разработчика. На матрицу $\mathbf{R} = (r_{ij})$ естественно наложить условие $|\mathbf{R}| = 1$. Минимум достигается в точке $M_{h,2}(0,521; 0,366)$, для которой

$$q_1 = 3,84\%, q_2 = 23,2 \text{ МПа}, h_{2,\min} = 2,14.$$

Рис. 2. Линии $h_1(x_1, x_2) = \text{const}$

Минимум достигается в точке $M_{h,2}(0,521; 0,366)$, для которой

$$q_1 = 3,84 \%, \quad q_2 = 23,2 \text{ МПа}, \quad h_{2,\min} = 2,14.$$

Рис. 3. Линии $h_2(x_1, x_2) = \text{const}$

Минимум достигается в точке $M_{h,2}(0,521; 0,366)$, для которой

$$q_1 = 3,84 \%, \quad q_2 = 23,2 \text{ МПа}, \quad h_{2,\min} = 2,14.$$

Выводы

1. Приводятся основные методологические принципы управления качеством сложных систем модульной структуры.
2. Предложены принципы управления свойствами композитов как сложных систем.
3. Дается формализованная оценка управляющих воздействий оператора.

Список литературы

1. Garkina, I.A. Analytical design of building materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.
2. Garkina, I.A. Methodological principles design of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.A. Budylna // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 11. – P. 2524–2527.

3. Гарькина, И.А. Сложные системы модульной структуры: композиты, автономные исследования сепаратных подсистем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.И. Ермолаева, А.М. Зарезкий // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – № 1 (15). – С. 152–156.

4. Garkina, I.A. Property modelling and durability of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 032004.

5. Данилов, А.М. Формализация кинетических процессов и обобщенный критерий качества композитов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 4 (29). – С. 28–32.

6. Данилов, А.М. Методы теории эргатических систем в материаловедении / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 3 (36). – С. 71–74.

7. Гарькина, И.А. Транспортные эргатические системы: информационные модели и управление / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, С.А. Пылайкин // Мир транспорта и технологических машин. – 2013. – № 1 (40). – С. 113–120.

8. Гарькина, И.А. Тренажеры модульной архитектуры для подготовки операторов транспортных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, И.А. Прошин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. – 2013. – № 12 (16). – С. 37–42.

References

1. Garkina, I.A. Analytical design of building materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.

2. Garkina, I.A. Methodological principles design of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.A. Budylna // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 11. – P. 2524–2527.

3. 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 // Bulletin of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2011. – № 1 (15). – P. 152–156.

4. Garkina, I.A. Property modelling and durability of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 032004.

5. Danilov, A.M. Formalization of kinetic processes and a generalized quality criterion for composites / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2016. – № 4 (29). – P. 28–32.

6. Danilov, A.M. Methods of the theory of ergatic systems in materials science / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 3 (36). – P. 71–74.

7. Garkina, I.A. Ergatic transport systems: information models and management / I.A. Garkina, A.M. Danilov, S.A. Pylyaykin // World of transport and technological machines. – 2013. – № 1 (40). – P. 113–120.

8. Garkina, I.A. Simulators of modular architecture for training operators of transport systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, I.A. Proshin // XXI century: results of the past and problems of the present. – 2013. – № 12 (16). – P. 37–42.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 69

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

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

Penza State University of Architecture
and Construction

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

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

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

УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ, ПОЛУЧИВШИХ НЕДОПУСТИМЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ ПОЖАРЕ

И.С. Гучкин, Н.Н. Ласьков

Приводится опыт усиления пустотных железобетонных плит перекрытий, поврежденных высокотемпературным нагревом при пожаре. Анализируется напряженно-деформированное состояние пустотной плиты с учетом распределения градиента температур по высоте сечения при нагреве снизу. Рассматриваются данные обследования плиты, расчет ее несущей способности до и после усиления. Предлагается комплексная конструкция усиления плиты посредством добавочной арматуры и бетона в пустотах вблизи опор. Даются последовательность монтажа элементов усиления и способ включения в работу.

Ключевые слова: железобетонная пустотная плита, нагрев бетона и арматуры при пожаре, прочность сцепления арматуры с бетоном, анкеровка арматуры, расчет, усиление

REINFORCEMENT OF REINFORCED CONCRETE HOLLOW FLOOR SLABS THAT HAVE RECEIVED UNACCEPTABLE DAMAGE AT FIRE

I.S. Guchkin, N.N. Laskov

The experience of reinforcing hollow reinforced concrete floor slabs damaged by high-temperature heating at fire is given. The stress-strain state of a hollow floor slabs is analyzed taking into account the distribution of the temperature gradient along the section height at heating from the bottom. The data of the slab survey, the calculation of the bearing capacity before and after

reinforcement are considered. A complex construction of slab reinforcement by means of additional strengthening and concrete in the voids near the supports is proposed. The sequence of mounting the strengthening elements is given.

Keywords: reinforced concrete hollow core slab, heating of concrete and armature tours in case of fire, bond strength of reinforcement with concrete, reinforcement anchoring, calculation, reinforcement

Повреждения плит перекрытий при пожарах происходят в результате воздействия высоких температур. При этом ухудшаются эксплуатационные качества плит, снижается прочность бетона и арматуры. При продолжительном пожаре в арматуре появляются значительные пластические деформации. В результате этого плиты получают недопустимые прогибы и чрезмерно раскрытые трещины, а также частично или полностью утрачивают несущую способность. **Решающее значение имеет прочность сцепления бетона с рабочей арматурой, которая при сильном нагреве значительно снижается, и возможно проскальзывание арматуры, сопровождаемое внезапным обрушением плиты [1, 2].**

Замена поврежденных плит – трудоемкий процесс, особенно когда плиты расположены в междуэтажном перекрытии функционирующего жилого или общественного здания. Поэтому плиты целесообразно усиливать, передавая большую часть (или 100 %) нагрузки на элементы конструкции усиления. Следует отметить, что при расчете усиления пустотных плит проектировщиками не всегда учитывается влияние формы поперечного сечения на характер распределения градиентов температур по его высоте, и это приводит к ошибкам [3]. Так, при нагреве снизу условно таврового (расчетного) сечения плиты верхняя полка, в отличие от нижней, нагревается значительно слабее (рис. 1), и снижение прочности бетона в этой зоне, как правило, небольшое.

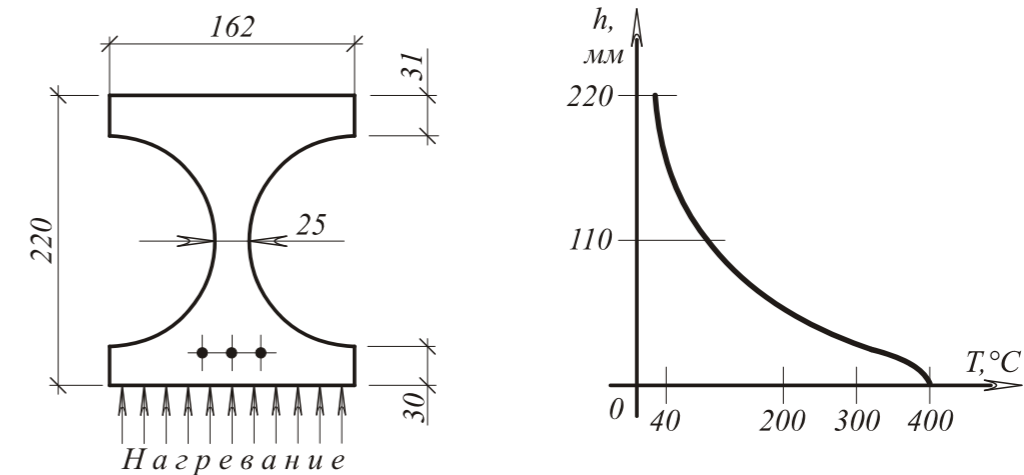


Рис. 1. Распределение градиента температур по высоте таврового сечения

Традиционным способом усиления пустотных плит является вскрытие полки над пустотами и их заполнение на всю длину бетоном с последующим армированием каркасами. Недостатками усиления являются существенное утяжеление плиты и уменьшение приведенной полезной высоты сечения, что в целом приводит к увеличению расхода арматуры и бетона.

Базируясь на опыте обследования плит после пожара, авторы при участии сотрудников кафедры СК ПГУАС разработали метод их радикального усиления, позволяющий с небольшими затратами восстановить несущую способность и эксплуатационные качества. При этом учитываются технология изготовления плит, способ армирования и эпюра распределения температур в сечении при нагреве снизу.

В отличие от вышеизложенного способа усиления, пустоты заполняются бетоном лишь на участках 0,25 длины пролета, с торцов, и армируются каркасами из холод-

нотянутой проволоки класса В500 диаметром 4(5) мм, а рабочая арматура размещается снизу плиты и крепится анкерами на концах (рис. 2).

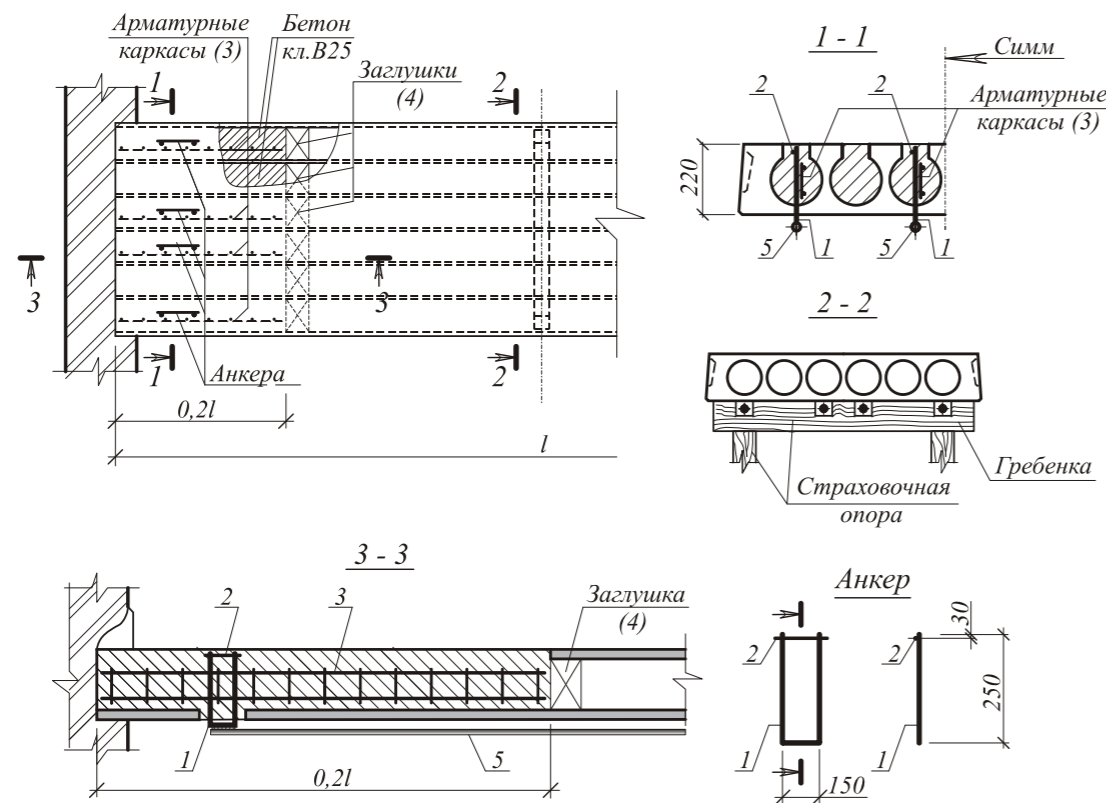


Рис. 2. Конструкция усиления пустотной плиты перекрытия

Порядок выполнения работ по усилению плиты:

- обследуется потолочная поверхность плиты в зоне пожара. Устанавливается температура нагрева бетона и арматуры. Выполняется поверочный расчет прочности плиты. Изготавливаются элементы (поз. 2...6) конструкции усиления;
- с помощью пескоструйного аппарата и металлических щеток очищается от пыли и копоти потолочная поверхность плиты;
- под плитой устанавливается страховочная опора с заранее размещенными в гребенке рабочими стержнями усиления;
- продувается сжатым воздухом и увлажняется контактная зона бетона;
- устанавливаются в проектное положение анкеры (1, 2), каркасы (3) и заглушки (4);
- заполняются пластичным бетоном вскрытые пустоты;
- после набора бетоном прочности устанавливаются в проектное положение стержни усиления (5) и привариваются к анкеру сначала одним концом, а затем, после нагрева до температуры 100...150°C, другим концом;
- демонтируется страховочная опора;
- стержни усиления покрываются слоем торкретбетона с обеспечением необходимой толщины защитного слоя и сцепления торкретбетона с бетоном усиливаемой плиты.

Поверочный расчет несущей способности плиты

Исходные данные

Плита сборная железобетонная пустотная толщиной 220 мм, выполнена из тяжелого бетона класса В25 (М300) на гранитном щебне. $R_b = 14,5$ МПа, $R_{bt} = 1,05$ МПа. Рабочая продольная арматура стержневая предварительно напряженная 10 Ø 10A1У,

$A_{s,f} = 5,18$ см², $R_s = 510$ МПа. Полезная высота сечения $h_{01} = 0,19$ м. Нормативная нагрузка на 1 м² плиты 6,0 кПа. Полная погонная расчетная нагрузка $q = 13,0$ кПа.

По результатам натурального обследования перекрытия и акта о пожаре было установлено, что на потолочной поверхности плиты имеется сеть хаотично расположенных трещин с шириной раскрытия 0,05...0,15 мм, а также наблюдается отслоение (местами) защитного слоя бетона (рис. 3). Цвет бетона на поверхности плиты розоватый, до красного, свидетельствует о высокой температуре нагрева (300...400 °С). Пожар тушился водой в течение 1,5...2 часов. Прочность бетона, определяемая прибором ОНИКС-2,3, составила в верхней полке плиты 28,0...32,0 МПа, в нижней 8,5...11,0 МПа, что примерно соответствует классам В25 и В7,5.



Рис. 3. Потолочная поверхность пустотной плиты после пожара. Наличие трещин, отслоение защитного слоя (местами)

Расчет прочности плиты по нормальному и наклонному сечениям производился в соответствии с нормами проектирования железобетонных конструкций (актуализированная редакция СНиП 52-01-2003). Расчетная схема плиты до и после усиления представлена на рис. 4.

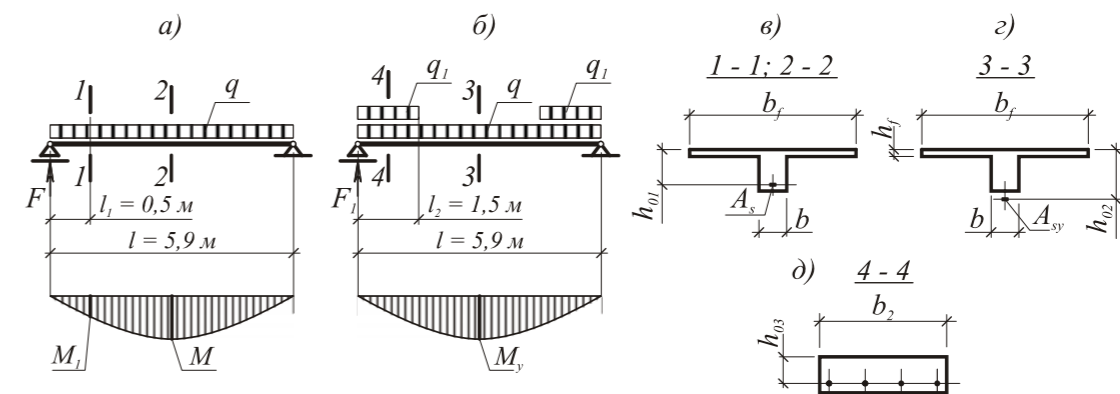


Рис. 4. Расчетная схема плиты: а, в – до усиления; б, г, д – после усиления

Изгибающий момент плиты в середине пролета

$$M = 0,125ql^2 = 0,125 \cdot 13 \cdot 5,9^2 = 56,6 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Опорная реакция $F = 0,5ql = 0,5 \cdot 13 \cdot 5,9 = 38,35 \text{ кН}$.

Изгибающий момент на расстоянии 0,5 м от опоры

$$M_1 = F \cdot l_1 - q \cdot l_1^2 / 2 = 38,35 \cdot 0,5 - 13 \cdot 0,5^2 / 2 = 17,55 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Находим требуемую площадь сечения арматуры в сечении 1-1.

Поскольку $M_1 = 17,55 \text{ кН}\cdot\text{м} < R_b b_f h_f (h_{01} - 0,5h_f) = 14,5 \cdot 10^3 \cdot 1,2 \cdot 0,03 \cdot (0,19 - 0,5 \cdot 0,03) = 91,35 \text{ кН}\cdot\text{м}$, сжатая зона располагается в пределах полки, и сечение рассчитываем как прямоугольное с шириной b_f .

$$\alpha_0 = M_1 / R_b b_f h_{01}^2 = 17,55 / 14,5 \cdot 10^3 \cdot 1,2 \cdot 0,19^2 = 0,028; \nu = 0,987.$$

При количестве стержней $n = 7$ шт. требуемая площадь сечения стержня составит:

$$A_{S,mp} = M_1 / R_s h_0 \nu n = 17,55 \cdot 10^4 / 510 \cdot 10^3 \cdot 0,19 \cdot 0,987 \cdot 7 = 0,262 \text{ см}^2.$$

Фактическая площадь сечения стержня диаметром 10 мм $A_{S,f} = 0,785 \text{ см}^2$.

Находим базовую длину анкеровки стержня:

$$l_{0,an} = R_s \cdot A_{S,f} / R_{bond} \cdot u_s = 510 \cdot 0,785 / 0,617 \cdot 3,14 = 206,6 \text{ см},$$

где $u_s = 3,14 \text{ см}$ – периметр сечения стержня; R_{bond} – расчетное сопротивление сцепления арматуры с бетоном,

$$R_{bond} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot R_{bt,T} = 2,5 \cdot 1,0 \cdot 0,247 = 0,617 \text{ МПа};$$

здесь $\eta_1 = 2,5$ – коэффициент, учитывающий вид арматуры; $\eta_2 = 1,0$ – то же, при диаметре арматуры менее 32 мм; $R_{bt,T}$ – расчетное сопротивление бетона растяжению с учетом нагрева при пожаре,

$$R_{bt,T} = m_{bt1} \cdot m_{bt2} \cdot m_{bt3} \cdot m_{bt4} \cdot R_{bt} = 0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 1,05 = 0,247 \text{ МПа},$$

где $m_{bt1}, m_{bt2}, m_{bt3}$ – коэффициенты условий работы в соответствии с действующими «Рекомендациями по оценке состояния и усилению строительных конструкций промышленных зданий и сооружений» (М.: Стройиздат, 1989, табл. 4): $m_{bt1} = 0,7$ – учитывает снижение призмочной прочности пропаренного бетона при нагреве; $m_{bt2} = 0,8$ – учитывает снижение прочности нагретого бетона при охлаждении водой; $m_{bt3} = 0,7$ – вводится для оценки длительной прочности бетона, испытывавшего нагрев до 400 °С.

Так как коэффициенты, корректирующие снижение прочности бетона на растяжение при нагреве-охлаждении, в «Рекомендациях...» отсутствуют, назначаем их такими же, какие используются для учета призмочной прочности, однако, учитывая имеющиеся исследования НИИЖБ (Э.Ф. Панюков, В.В. Соломонов и др.), вводим поправочный коэффициент $m_{bt4} = 0,6$.

Находим требуемую расчетную длину анкеровки стержней с учетом конструктивного решения элемента:

$$l_{an} = \alpha l_{0,an} A_{S,mp} / A_{S,f} = 1,0 \cdot 206,6 \cdot 0,262 / 0,785 = 69 \text{ см (0,69 м)}.$$

Фактическая длина анкеровки

$$l_{inf} = l_1 + 0,05 = 0,5 + 0,05 = 0,55 \text{ м}; l_{inf} < l_{an}, 0,55 < 0,69 \text{ (м)}.$$

Расчет показал, что фактическая длина анкеровки рабочих стержней l_{inf} меньше требуемой l_{an} и высока вероятность их проскальзывания в бетоне. Поэтому необходимость радикального усиления плиты очевидна [4].

Расчет конструкции усиления плиты

Плиту усиливаем дополнительной рабочей арматурой в виде затяжки, размещаемой снизу, под плитой – рис. 2, 4.

Уточняем нагрузку на плиту от бетона, расположенного в пустотах:

$$q_1 = 0,25 \pi d^2 D \gamma_f n = 0,25 \cdot 3,14 \cdot 0,159^2 \cdot 25 \cdot 1,2 \cdot 6 = 3,57 \text{ кН/м},$$

где d – диаметр отверстия; D – плотность железобетона; γ_f – коэффициент надежности по нагрузке.

Опорная реакция $F_1 = 0,5 q l + q_1 l_2 = 0,5 \cdot 13 \cdot 5,9 + 3,57 \cdot 1,5 = 43,7 \text{ кН}$.

Изгибающий момент

$$M_y = 0,5 F l - q_1 (0,5 l - 0,5 l_2) l_2 - 0,125 q l^2 = 0,5 \cdot 43,7 \cdot 5,9 - 3,57 (0,5 \cdot 5,9 - 0,75) \cdot 1,5 - 0,125 \cdot 13 \cdot 5,9^2 = 60,54 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Находим требуемую площадь сечения рабочей арматуры усиления, без учета существующей арматуры:

$$\alpha_0 = M_y / R_b b_f h_{02}^2 = 60,54 / 14,5 \cdot 10^3 \cdot 1,2 \cdot 0,25^2 = 0,056; \xi = 0,058;$$

$x = \xi h_{02} = 0,058 \cdot 0,25 = 0,01 \text{ м} < h_f = 0,03$ – следовательно, нейтральная ось проходит в полке. Тогда $\nu = 0,972$, $A_{Sy} = M_y / R_s h_{02} \nu = 60,54 \cdot 10^4 / 365 \cdot 10^3 \cdot 0,25 \cdot 0,972 = 6,83 \text{ см}^2$.

Принимаем арматуру 2 Ø 14 АIII + 2 Ø 16 АIII с площадью

$$A_{S,f} = 3,08 + 4,02 = 7,1 \text{ см}^2.$$

Расчет прочности усиленной плиты на действие поперечной силы

$$Q_{max} = F_1 = 43,7 \text{ кН}.$$

В запас учитываем в расчете только бетон усиления, расположенный в пустотах. Заменяем круглые сечения пустот на эквивалентные квадратные, тогда

$$b_2 = 0,9 d n = 0,9 \cdot 0,159 \cdot 6 = 0,86 \text{ м}, h_{03} = 0,11 \text{ м}.$$

Проверка прочности усиленной плиты по бетонной полосе между наклонными трещинами из условия $Q_{max} < 0,3 R_b b_2 h_{03}$:

$$43,7 < 0,3 \cdot 14,5 \cdot 10^3 \cdot 0,86 \cdot 0,11 = 411,51 \text{ кН} – \text{условие выполняется}.$$

Проверка прочности плиты по поперечной силе

При оценке прочности плиты по поперечной силе принимаем минимально допустимую величину поперечной силы, воспринимаемую бетоном в наклонном сечении [5].

$$Q_b = 0,5 R_{bt} b_2 h_{03} = 0,5 \cdot 1,05 \cdot 103 \cdot 0,86 \cdot 0,11 = 49,66 \text{ кН}.$$

Проверяем условие прочности $Q_b > Q_{max}$,

$49,66 > 43,7 \text{ (кН)} – \text{условие выполняется}.$

Выводы

1. Дается анализ напряженно-деформированного состояния пустотных плит с учетом распределения градиента температур по высоте сечения при нагреве снизу.

2. Разработаны эффективная малозатратная и нетрудоемкая конструкция усиления плиты и способ ее включения в работу.

3. Представлены примеры расчета прочности нормального и наклонного сечений усиленной плиты, где учтены снижение прочности бетона и силы сцепления с арматурой при нагревании в диапазоне температур 300...400°C.

Исполнение комплекса перечисленных мероприятий гарантирует безопасную работу усиленной плиты на длительный период в соответствии с требованиями действующего ГОСТа [4].

Список литературы

1. Гучкин, И.С. Техническая эксплуатация и реконструкция зданий / И.С. Гучкин. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 342 с.

2. СТО 36554501-006–2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. – М., 2006.

3. 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.

4. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – М., 2014.

5. СП 63, 13330, 2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М., 2012.

References

1. Guchkin, I.S. Technical operation and reconstruction of buildings / I.S. Guchkin. – M.: DIA Publishing House, 2016.

2. STO 36554501-006–2006. Rules for ensuring fire resistance and ognissanti concrete structures. – M., 2006.

3. 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.

4. GOST 27751–2014. Reliability of building structures and foundations. Fundamentals. – M., 2014.

5. SP 63, 13330, 2012. Concrete and reinforced concrete constructures. Actualized edition SNiP 52-01–2003. – M., 2012.

УДК 519.633

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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 ПЛОСКОЙ ОДНОМЕРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ИДЕАЛЬНО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЁННОМ СОСТОЯНИИ

С.В. Бакушев

Получены дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях для плоского одномерного идеально упругопластического деформирования сплошных сред при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений с учётом и без учёта геометрической нелинейности в декартовой системе координат. На основе гипотезы о независимости, вообще говоря, друг от друга диаграмм нелинейного объёмного и идеально упругопластического сдвигового деформирования рассмотрено пять основных случаев физических зависимостей, зависящих от взаимного расположения точек излома билинейных диаграмм объёмного и сдвигового деформирования. Физические зависимости основаны на вычислении секущих модулей объёмного и сдвигового деформирования. На первом участке диаграмм секущий модуль и объёмного, и сдвигового деформирования постоянен, на втором участке – секущий модуль объёмного деформирования является функцией объёмной деформации, а секущий модуль сдвига является функцией интенсивности деформаций сдвига. Модуль упрочнения при сдвиге идеально упругопластической среды принимается равным нулю. Путём подстановки соответствующих билинейных физических уравнений в дифференциальные уравнения равновесия сплошной среды с учётом и без учёта геометрической нелинейности получены разрешающие дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях для плоской одномерной идеально упругопластической деформации в декартовой системе координат. Приведённые в статье дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях могут использоваться при определении напряженно-деформированного состояния сплошных сред, которые находятся в условиях плоского одномерного идеально упругопластического деформирования с учётом и без учёта геометрической нелинейности и физические соотношения для которых аппроксимированы билинейными функциями.

Ключевые слова: сплошная среда, дифференциальные уравнения равновесия, плоская одномерная деформация, идеальная пластичность, билинейные замыкающие уравнения

DIFFERENTIAL EQUATIONS OF EQUILIBRIUM OF ONE-DIMENSIONAL PLANAR DEFORMATION FOR ELASTIC-PERFECTLY-PLASTIC CONTINUUM AT COMBINED STRESS STATE

S.V. Bakushev

There have been received displacement differential equations of equilibrium for planar one-dimensional elastic-perfectly-plastic deformation of continuum at bilinear approximation of closing equations regarding and not regarding geometrical nonlinearity in Cartesian reference system. Bearing

in mind the hypothesis about independence of nonlinear volume deformation diagram and elastic-perfectly-plastic shearing deformation diagram, there have been analyzed five main cases of physical dependences, depending on mutual arrangement of breaking points of bilinear diagrams of volume and shearing deformation. Physical dependences are based on calculation of secant modulus of volume and shearing deformation. On the first part of the diagram the secant module of both volume and shearing deformation is constant; at the second part the secant module of volume deformation is a function of volume deformation, whereas the secant module of shearing is a function of shearing deformation intensity. Hardening module at shearing of elastic-perfectly-plastic continuum is considered to be equal to zero. Putting corresponding bilinear physical equations into differential equations of equilibrium of continuum regarding and regardless geometrical nonlinearity, resolving differential equations of equilibrium in displacements for planar one-dimensional elastic-perfectly-plastic deformation at Cartesian reference system are received. Provided in the present article differential equations of equilibrium in displacements can be used at determination of strain-stress state of continuum at planar one-dimensional elastic-perfectly-plastic deformation regarding and regardless geometrical nonlinearity, relations of which are approximated by bilinear functions.

Keywords: solid massive body, differential equations of equilibrium, flat one-dimensional deformation, perfect plasticity, trailing bilinear equations

Введение. В работах [1–4] рассматривались вопросы построения дифференциальных уравнений равновесия в перемещениях для деформируемых твёрдых тел, находящихся в условиях сложного напряжённо-деформированного состояния, в частности в условиях плоской деформации, осесимметричной и центрально-симметричной деформации. Замыкающие уравнения произвольного, вообще говоря, вида аппроксимировались при этом билинейными функциями. Вопросы определения оптимального расположения точек излома билинейных диаграмм объёмного и сдвигового деформирования на основе метода наименьших квадратов рассматривались в работе [5].

Для деформируемых тел, находящихся в условиях сложного напряжённо-деформированного состояния, замыкающие уравнения представляются двумя зависимостями [6]. Первая зависимость устанавливает связь между первыми инвариантами нелинейных тензоров напряжений и деформаций и механически интерпретируется как взаимосвязь между объёмной деформацией и средним напряжением, то есть определяет изменение объёмной деформации в процессе нагружения тела. Вторая зависимость с механической точки зрения определяет деформацию сдвига, то есть изменение, вообще говоря, формы тела в процессе его деформирования. Эта зависимость устанавливает функциональную взаимосвязь между вторыми инвариантами нелинейных девиаторов напряжений и деформаций.

Описав в самом общем виде физические уравнения в нелинейной теории упругости на основе тензорных свойств понятий «напряжение» и «деформация», В.В. Новожилов, вопрос о характере замыкающих уравнений оставил открытым, что придало его нелинейной теории упругости универсальный характер. Отсюда следует возможность использования данных физических уравнений для описания механического поведения деформируемых тел с самыми различными диаграммами объёмного и сдвигового деформирования.

В данной работе представлено построение дифференциальных уравнений равновесия в перемещениях для случая плоского одномерного деформирования $u_x = u(x)$, $u_y = 0$, $u_z = 0$ идеально упругопластической в отношении сдвиговых деформаций сплошной среды при аппроксимации замыкающих уравнений, описывающих диаграммы объёмного и сдвигового деформирования билинейными функциями без учёта (рис. 1 и 2) и с учётом (рис. 3 и 4) геометрической нелинейности. Аппроксимируемая диаграмма объёмного деформирования принимается нелинейной (на рис. 1 и 3 показана пунктирной линией). Аппроксимируемая диаграмма сдвигового деформирования принимается также нелинейной с протяжённой площадкой текучести (на рис. 2 и 4 показана пунктирной линией).

Физические уравнения для геометрически линейной модели. В соответствии с рис. 1 и 2 секущие модули объёмного расширения (сжатия) $K = K(\varepsilon, \Gamma)$ и сдвига

$G = G(\varepsilon, \Gamma)$ для геометрически линейной модели на первом прямолинейном участке диаграмм $\sigma \approx \varepsilon$ и $T \approx \Gamma$ будут величинами постоянными:

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

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

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:

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

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

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

В соответствии с рис. 2 модуль упрочнения при сдвиге идеально упругопластической среды принимается равным нулю.

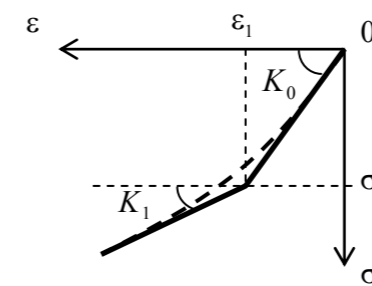


Рис. 1. Диаграмма $\sigma \approx \varepsilon$

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

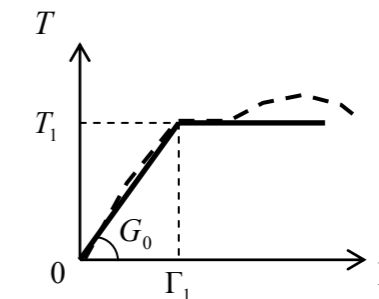


Рис. 2. Диаграмма $T \approx \Gamma$

Figure 2. Chart $T \approx \Gamma$

При плоском одномерном деформировании сплошной среды для геометрически линейной модели $\varepsilon = \varepsilon_{xx}$; $\Gamma = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{xx}^2}$, причём $\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}$ и, следовательно,

$$\Gamma = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2}. \text{ Тогда } \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial x} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \text{ и } \frac{\partial \Gamma}{\partial x} = \frac{4}{3\Gamma} \varepsilon_{xx} \frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial x} = \frac{4}{3\Gamma} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

Поскольку $\Gamma = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{\varepsilon^2}$, то графики билинейных диаграмм $\sigma \approx \varepsilon$ и $T \approx \Gamma$ при плоском одномерном деформировании связаны друг с другом. Ввиду этого, рассмотрим пять основных случаев физических зависимостей.

Случай 1: $K_0 \neq K_1$. Точки излома графиков на диаграммах объёмного и сдвигового деформирования совпадают, то есть $|\varepsilon_1| = \frac{\sqrt{3}}{2}\Gamma_1$. При этом $0 \leq |\varepsilon| \leq |\varepsilon_1|$ и $0 \leq \Gamma \leq \Gamma_1$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| < \Gamma_1$. При этом $0 \leq |\varepsilon| \leq |\varepsilon_1|$ и $0 \leq \Gamma \leq \frac{2}{\sqrt{3}}|\varepsilon_1|$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| > \Gamma_1$. При этом $0 \leq |\varepsilon| \leq \frac{\sqrt{3}}{2}\Gamma_1$ и $0 \leq \Gamma \leq \Gamma_1$.

В этом случае физические уравнения плоской одномерной идеально упругопластической деформации сплошной среды с учётом формул (1) и (2) будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \left(\frac{1}{3}K_0 + \frac{4}{3}G_0\right)\varepsilon_{xx}; \\ \sigma_{yy} = \sigma_{zz} &= \left(\frac{1}{3}K_0 - \frac{2}{3}G_0\right)\varepsilon_{xx}.\end{aligned}\quad (5)$$

Случай 2: $K_0 \neq K_1$. Точки излома графиков на диаграммах объёмного и сдвигового деформирования не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| < \Gamma_1$. При этом $|\varepsilon_1| \leq |\varepsilon| \leq \frac{2}{\sqrt{3}}|\varepsilon_1|$ и $\frac{2}{\sqrt{3}}|\varepsilon_1| \leq \Gamma \leq \Gamma_1$.

В этом случае физические уравнения плоской одномерной идеально упругопластической деформации сплошной среды с учётом формул (2) и (3) будут иметь вид:

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

Случай 3: $K_0 \neq K_1$. Точки излома графиков на диаграммах объёмного и сдвигового деформирования не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| > \Gamma_1$. При этом $\frac{\sqrt{3}}{2}\Gamma_1 \leq |\varepsilon| \leq |\varepsilon_1|$ и $\Gamma_1 \leq \Gamma \leq \frac{2}{\sqrt{3}}|\varepsilon_1|$.

В этом случае физические уравнения плоской одномерной идеально упругопластической деформации сплошной среды с учётом формул (1) и (4) будут иметь вид:

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

Случай 4: $K_0 \neq K_1$. Точки излома графиков на диаграммах объёмного и сдвигового деформирования совпадают, то есть $|\varepsilon_1| = \frac{\sqrt{3}}{2}\Gamma_1$. При этом $|\varepsilon| \geq |\varepsilon_1|$ и $\Gamma \geq \Gamma_1$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| < \Gamma_1$. При этом $|\varepsilon| \geq \frac{\sqrt{3}}{2}\Gamma_1$ и $\Gamma \geq \Gamma_1$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| > \Gamma_1$. При этом $|\varepsilon| \geq |\varepsilon_1|$ и $\Gamma \geq \frac{2}{\sqrt{3}}|\varepsilon_1|$.

В этом случае физические уравнения плоской одномерной идеально упругопластической деформации сплошной среды с учётом формул (3) и (4) будут иметь вид:

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

Случай 5: $K_0 = K_1$. Точка излома на графике объёмного деформирования отсутствует. При этом, если $0 \leq \Gamma \leq \Gamma_1$, то физические уравнения плоского одномерного идеально упругопластического деформирования будут иметь вид (5); если $\Gamma \geq \Gamma_1$, то физические уравнения плоского одномерного идеально упругопластического деформирования будут иметь вид (7).

Построение дифференциальных уравнений для геометрически линейной модели. Подставив физические уравнения (5)–(8) в дифференциальное уравнение равновесия плоского одномерного деформирования сплошной среды:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + F_x = 0, \quad (9)$$

получим четыре вида разрешающих уравнений в перемещениях:

1. Для физических уравнений (5) дифференциальное уравнение равновесия в перемещениях получает вид:

$$\left(\frac{1}{3}K_0 + \frac{4}{3}G_0\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + F_x = 0. \quad (10)$$

2. Для физических уравнений (6) дифференциальное уравнение равновесия в перемещениях запишется так:

$$\left(\frac{1}{3}K_1 + \frac{4}{3}G_0\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + F_x = 0. \quad (11)$$

3. Для физических уравнений (7) дифференциальное уравнение равновесия в перемещениях запишется в следующем виде:

$$\left\{\frac{1}{3}K_0 + \frac{4}{3}G_0\frac{\Gamma_1}{\Gamma}\left[1 - \frac{4}{3\Gamma}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\right]\right\}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + F_x = 0. \quad (12)$$

4. Для физических уравнений (8) дифференциальное уравнение равновесия в перемещениях получает вид:

$$\left\{\frac{1}{3}K_1 + \frac{4}{3}G_0\frac{\Gamma_1}{\Gamma}\left[1 - \frac{4}{3\Gamma}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\right]\right\}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + F_x = 0. \quad (13)$$

Таким образом, дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях для плоского одномерного деформирования идеально упругопластической в отношении сдвиговых деформаций сплошной среды при билинейной аппроксимации физических соотношений без учёта геометрической нелинейности построены.

Построение физических уравнений для геометрически нелинейной модели. Аппроксимация замыкающих уравнений произвольной формы в отношении изменения объёма и замыкающих уравнений в отношении изменения формы, описывающих диаграмму сдвиговых деформаций с протяжённой площадкой текучести билинейными функциями для геометрически нелинейной модели сплошной среды, по В.В. Новожилову, представлена на рис. 3 и 4.

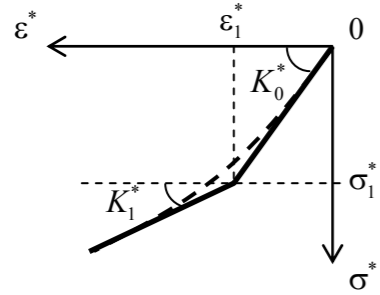


Рис. 3. Диаграмма $\sigma^* \approx \varepsilon^*$

Figure 3. Chart $\sigma^* \approx \varepsilon^*$

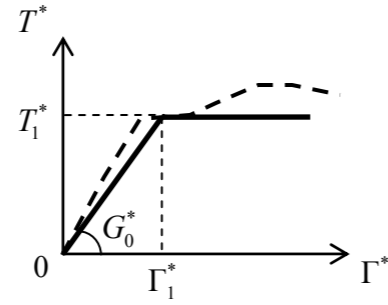


Рис. 4. Диаграмма $T^* \approx \Gamma^*$

Figure 4. Chart $T^* \approx \Gamma^*$

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

$$K^* = \frac{1}{3} K_0^* = \text{const}, \quad (14)$$

$$G^* = G_0^* = \text{const}. \quad (15)$$

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:

$$K^* = K^*(\varepsilon^*) = \frac{1}{3} \left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \neq \text{const}, \quad (16)$$

$$G^* = G^*(\Gamma^*) = G_0^* \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \neq \text{const}. \quad (17)$$

Здесь K_0^* – геометрически нелинейный аналог начального модуля объёмного расширения (сжатия); G_0^* – геометрически нелинейный аналог начального модуля сдвига; K_1^* – геометрически нелинейный аналог модуля упрочнения при объёмном расширении (сжатии); σ^* – первый инвариант тензора обобщённых напряжений; ε^* –

первый инвариант тензора нелинейных деформаций; T^* – интенсивность обобщённых касательных напряжений; Γ^* – интенсивность нелинейных деформаций сдвига.

В соответствии с рис. 4 геометрически нелинейный аналог модуля упрочнения при сдвиге идеально упругопластической среды равен нулю.

При плоском одномерном деформировании сплошной среды для геометрически нелинейной модели $\varepsilon^* = \varepsilon_{xx}^*$; $\Gamma^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{xx}^{*2}}$, причём $\varepsilon_{xx}^* = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2$ и,

следовательно, $\Gamma^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right]^2}$. Тогда $\frac{\partial \varepsilon^*}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_{xx}^*}{\partial x} = \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ и

$$\frac{\partial \Gamma^*}{\partial x} = \frac{4}{3\Gamma^*} \varepsilon_{xx}^* \frac{\partial \varepsilon_{xx}^*}{\partial x} = \frac{4}{3\Gamma^*} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

Рассмотрим пять основных случаев физических зависимостей для геометрически нелинейной модели.

Случай 1: $K_0^* \neq K_1^*$. Точки излома графиков на диаграммах объёмного и сдвигового деформирования совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| = \frac{\sqrt{3}}{2} \Gamma_1^*$. При этом $0 \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_1^*|$ и $0 \leq \Gamma^* \leq \Gamma_1^*$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| < \Gamma_1^*$. При этом $0 \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_1^*|$ и $0 \leq \Gamma^* \leq \frac{2}{\sqrt{3}} |\varepsilon_1^*|$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| > \Gamma_1^*$. При этом $0 \leq |\varepsilon^*| \leq \frac{\sqrt{3}}{2} \Gamma_1^*$ и $0 \leq \Gamma^* \leq \Gamma_1^*$.

В этом случае физические уравнения плоской одномерной идеально упругопластической деформации геометрически нелинейной сплошной среды с учётом формул (14) и (15) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^* &= \left(\frac{1}{3} K_0^* + \frac{4}{3} G_0^* \right) \varepsilon_{xx}^*; \\ \sigma_{yy}^* = \sigma_{zz}^* &= \left(\frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_0^* \right) \varepsilon_{xx}^*. \end{aligned} \quad (18)$$

Случай 2: $K_0^* \neq K_1^*$. Точки излома графиков на диаграммах объёмного и сдвигового деформирования не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| < \Gamma_1^*$. При этом $|\varepsilon_1^*| \leq |\varepsilon^*| \leq \frac{2}{\sqrt{3}} |\varepsilon_1^*|$ и $\frac{2}{\sqrt{3}} |\varepsilon_1^*| \leq \Gamma^* \leq \Gamma_1^*$.

В этом случае физические уравнения плоской одномерной идеально упругопластической деформации геометрически нелинейной сплошной среды с учётом формул (15) и (16) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^* &= \frac{1}{3} \left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \varepsilon^* + 2G_0^* \left(\varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right); \\ \sigma_{yy}^* = \sigma_{zz}^* &= \frac{1}{3} \left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \varepsilon^* + 2G_0^* \left(\varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right). \end{aligned} \quad (19)$$

Случай 3: $K_0^* \neq K_1^*$. Точки излома графиков на диаграммах объёмного и сдвигового деформирования не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| > \Gamma_1^*$. При этом $\frac{\sqrt{3}}{2}\Gamma_1^* \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_1^*|$ и $\Gamma_1^* \leq \Gamma^* \leq \frac{2}{\sqrt{3}}|\varepsilon_1^*|$.

В этом случае физические уравнения плоской одномерной идеально упругопластической деформации геометрически нелинейной сплошной среды с учётом формул (14) и (17) будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^* &= \frac{1}{3}K_0^*\varepsilon^* + 2G_0^*\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*}\left(\varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right); \\ \sigma_{yy}^* &= \sigma_{zz}^* = \frac{1}{3}K_0^*\varepsilon^* + 2G_0^*\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*}\left(\varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right).\end{aligned}\quad (20)$$

Случай 4: $K_0^* \neq K_1^*$. Точки излома графиков на диаграммах объёмного и сдвигового деформирования совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| = \frac{\sqrt{3}}{2}\Gamma_1^*$. При этом $|\varepsilon^*| \geq |\varepsilon_1^*|$ и $\Gamma^* \geq \Gamma_1^*$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| < \Gamma_1^*$. При этом $|\varepsilon^*| \geq \frac{\sqrt{3}}{2}\Gamma_1^*$ и $\Gamma^* \geq \Gamma_1^*$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| > \Gamma_1^*$. При этом $|\varepsilon^*| \geq |\varepsilon_1^*|$ и $\Gamma^* \geq \frac{2}{\sqrt{3}}|\varepsilon_1^*|$.

В этом случае физические уравнения плоской одномерной идеально упругопластической деформации геометрически нелинейной сплошной среды с учётом формул (16) и (17) будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^* &= \frac{1}{3}\left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*)\frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*}\right]\varepsilon^* + 2G_0^*\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*}\left(\varepsilon_{xx}^* - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right); \\ \sigma_{yy}^* &= \sigma_{zz}^* = \frac{1}{3}\left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*)\frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*}\right]\varepsilon^* + 2G_0^*\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*}\left(\varepsilon_{yy}^* - \frac{1}{3}\varepsilon^*\right).\end{aligned}\quad (21)$$

Случай 5: $K_0^* = K_1^*$. Точка излома графика на диаграмме объёмного деформирования отсутствует. При этом, если $0 \leq \Gamma^* \leq \Gamma_1^*$, то физические уравнения плоского одномерного идеально упругопластического деформирования будут иметь вид (18); если $\Gamma^* \geq \Gamma_1^*$, то физические уравнения плоского одномерного идеально упругопластического деформирования будут иметь вид (20).

Построение дифференциальных уравнений для геометрически нелинейной модели. Подставив физические уравнения (18)–(21) в дифференциальное уравнение равновесия плоского одномерного деформирования сплошной среды при учёте геометрической нелинейности [6]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)\sigma_{xx}^*\right] + F_x^* = 0, \quad (22)$$

получим четыре вида разрешающих дифференциальных уравнений в перемещениях.

1. Для физических уравнений (18):

$$\left(\frac{1}{3}K_0^* + \frac{4}{3}G_0^*\right)\left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\right]\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)\left(1 + \frac{u}{x}\right)F_x^* = 0. \quad (23)$$

2. Для физических уравнений (19):

$$\begin{aligned}&\left\{\left(\frac{1}{3}K_1^* + \frac{4}{3}G_0^*\right)\left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\right] + \right. \\ &\left. + (K_0^* - K_1^*)\varepsilon_1^*\right\}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)\left(1 + \frac{u}{x}\right)F_x^* = 0.\end{aligned}\quad (24)$$

3. Для физических уравнений (20):

$$\begin{aligned}&\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\left\{\frac{1}{3}K_0^* + \frac{4}{3}G_0^*\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} - \frac{16}{9}G_0^*\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}}\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\right]^2\right\}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \\ &+ \left\{\frac{1}{3}K_0^*\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\right] + \frac{4}{3}G_0^*\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*}\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\right]\right\}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \\ &+ \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)\left(1 + \frac{u}{x}\right)F_x^* = 0.\end{aligned}\quad (25)$$

4. Для физических уравнений (21):

$$\begin{aligned}&\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\left\{\frac{1}{3}K_1^* + \frac{4}{3}G_0^*\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} - \frac{16}{9}G_0^*\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^{*3}}\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\right]^2\right\}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \\ &+ \left\{\frac{1}{3}K_1^*\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\right] + \frac{4}{3}G_0^*\frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*}\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\right]\right\} + \\ &+ (K_0^* - K_1^*)\varepsilon_1^*\left\{\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)\left(1 + \frac{u}{x}\right)F_x^* = 0.\end{aligned}\quad (26)$$

Таким образом, дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях для плоского одномерного идеально упругопластического деформирования в отношении сдвиговых деформаций сплошной среды при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений с учётом геометрической нелинейности построены.

Заключение.

1. В декартовых координатах получены дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях для сплошной среды, нелинейной в отношении изменения объёма и идеально упругопластической в отношении изменения формы, находящейся в условиях плоского одномерного деформирования, как с учётом, так и без учёта геометрической нелинейности.

2. Дифференциальные уравнения могут быть использованы при оценке напряжённо-деформированного состояния сплошных сред, которые находятся в условиях плоской одномерной идеально упругопластической деформации и физические соотношения для которых аппроксимированы билинейными функциями.

Список литературы

1. Бакушев, С.В. Дифференциальные уравнения равновесия сплошной среды для плоской деформации в декартовых координатах при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений (геометрически линейная модель) / С.В. Бакушев // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №1(38). – С.76–85.

2. Бакушев, С.В. Дифференциальные уравнения равновесия сплошной среды для плоской деформации в декартовых координатах при билинейной аппроксимации

закрывающих уравнений (геометрически нелинейная модель) / С.В. Бакушев // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №2(39). – С.86–100.

3. Бакушев, С.В. Дифференциальные уравнения равновесия осесимметричной деформации при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений / С.В. Бакушев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2019. – №1. – С.8–17.

4. Бакушев, С.В. Дифференциальные уравнения равновесия центрально-симметричной деформации при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений / С.В. Бакушев // Известия ВУЗов. Строительство. – 2018. – №11 (719). – С.5–19.

5. Бакушев, С.В. Аппроксимация диаграмм деформирования билинейными функциями / С.В. Бакушев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2019. – №2 (283). – С.2–11.

6. Бакушев, С.В. Геометрически и физически нелинейная механика сплошной среды: Плоская задача / С.В. Бакушев. – М.: Книжный дом «Либроком», 2013. – 312 с.

References

1. Bakushev, S.V. Differential equations of solid environment equilibrium for flat deformation in cartesian coordinates at bilinear approximation of trailing equations (geometrically linear model) / S.V. Bakushev // Regional architecture and engineering. – 2019. – N 1(38). – P.76–85.

2. Bakushev, S.V. Differential equations of solid environment equilibrium for flat deformation in cartesian coordinates at bilinear approximation of trailing equations (geometrically nonlinear model) / S.V. Bakushev // Regional architecture and engineering. – 2019. – N 2(39). – P.86–100.

3. Bakushev, S.V. Differential equations of equilibrium an the axially symmetric deformation at bilinear approximation trailing equations / S.V. Bakushev // Structure mechanics and analysis of constructions. – 2019. – N 1. – P.8–17.

4. Bakushev, S.V. Differential equations of equilibrium of central-symmetric deformation at bilinear approximation trailing equations / S.V. Bakushev // News of higher educational institutions. Construction. – 2018. – N 11 (719). – P.5–19.

5. Bakushev, S.V. Approximations of warp diagrams using bilinear functions / S.V. Bakushev // Structure mechanics and analysis of constructions. – 2019. – N 2 (283). – P. 2–11.

6. Bakushev, S.V. Geometrical and physic non-linear mechanic of continuous mediums: Plane problem / S.V. Bakushev. – М.: The Book House «LIBROCOM». Publ., 2013. – 312 p.

УДК 624.012.45/.072.2

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

Лаврова Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент 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

Lavrova Olga Vladimirovna, Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Building constructions» E-mail: stroyconst@pguas.ru

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОРОТКИХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ КАРКАСНО-СТЕРЖНЕВОЙ МОДЕЛИ

О.В. Лаврова

Предлагается методика расчета прочности и способы усиления поврежденных коротких балок при реконструкции на основе каркасно-стержневой модели, применяемой для расчета прочности железобетонных балок с малым пролетом среза. Методика базируется на копировании физической работы коротких балок, а также на предварительном определении функционального назначения каждого элемента новой конструкции усиления.

Предложена конструкция усиления поврежденных коротких балок. Эффективность данного усиления объясняется тем, что оно в полной мере повторяет характер работы указанных конструкций при нагружении и позволяет оценить несущую способность поврежденной конструкции.

Ключевые слова: короткая балка, прочность, реконструкция, усиление, каркасно-стержневая модель, опорные и грузовые площадки, сжатые наклонные полосы бетона, растянутый арматурный пояс, методика расчета прочности.

STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE SHORT BEAMS STRENGTHENED ON THE BASIS OF FRAME-ROD MODELS

O.V. Lavrova

Methods for calculation the strength and ways of strengthening damaged short beams during reconstruction are proposed, based on the frame-rod model used to calculate the strength of reinforced concrete beams with a small span of cut. The technique is based on copying physical work of short beams, as well as on a preliminary determination of the functional purpose of each element of the new structure.

A reinforcement design for damaged short beams is proposed. The effectiveness of this reinforcement is explained by the fact that it fully repeats the nature of the operation of these structures under loading and allows to evaluate the bearing capacity of the damaged structure.

Keywords: short beam, strength, reconstruction, reinforcement, frame-rod model, support and cargo platforms, compressed inclined strips of concrete, stretched reinforcing belt, method of calculating strength

В данной статье рассматриваются балки, имеющие отношение длины к высоте сечения меньше единицы и называемые в дальнейшем короткими.

Традиционно усиление коротких балок, имеющих повреждения, выполняется по аналогии с обычными балками. На рис. 1 приводится усиление приопорных участков балок, имеющих наклонные трещины, с помощью напряженных хомутов. Усиление балок предварительно напряженными хомутами производится с помощью обоймы,

состоящей из продольных уголков, расположенных по контуру сечения, и вертикальных хомутов. Для включения обоймы в работу крайние хомуты предварительно натягиваются с помощью гаек и привариваются к уголкам. Промежуточные хомуты привариваются к уголкам после нагрева с постоянным шагом (рис. 1,а). В других случаях натяжение хомутов производится струбцинами после приварки хомутов к уголкам металлической обоймы (рис. 1,б).

Данное усиление не является эффективным, так как нет расчетных зависимостей, позволяющих оценить степень участия каждого из элементов усиления поврежденных коротких балок.

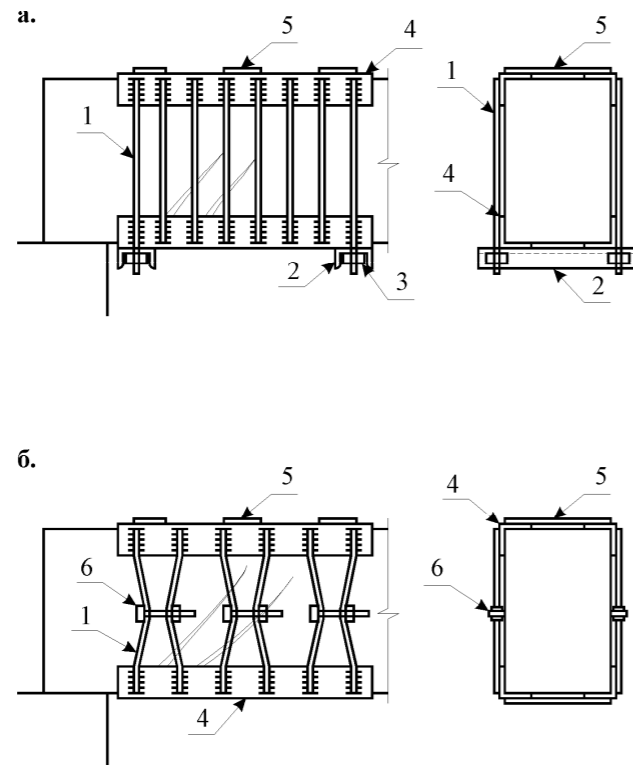


Рис. 1. Схема усиления приопорных участков балок напряженными хомутами:
1 – напряженные хомуты; 2 – швеллер; 3 – гайка; 4 – уголок; 5 – накладки; 6 – струбцина

Целесообразно рассмотреть конструкцию усиления поврежденных коротких балок при реконструкции, используя метод расчета на основе каркасно-стержневой модели, применяемой для расчета прочности железобетонных балок с малым пролетом среза, $a/h_0 \leq 1$ [1]. Данный метод базируется на предпосылках копирования физической работы коротких балок, а также на предварительном определении функционального назначения каждого элемента новой конструкции усиления.

Каркасно-стержневые модели для расчета прочности железобетонных балок с малым пролетом среза описывают два вида разрушения – по наклонной сжатой полосе бетона и растянутому арматурному поясу. Именно такого рода повреждения и аварийные разрушения возникают в коротких балках и в приопорных участках обычных балок (рис. 2,а). Следовательно, задачей усиления является повышение сопротивления указанных зон балок и их элементов.

В данной статье предлагается схема усиления коротких балок, изображенная на рис. 2,б. Усиление балки выполнено наклонными стержнями, состоящими из двух наклонных пакетов арматурных стержней, расположенных симметрично относительно оси действия силы. В нижней растянутой зоне балки они объединены горизонтальным стальным поясом из прокатных уголков. Таким образом пакет продольной арматуры будет осуществлять прямое участие в работе на сжатие вместе с поврежденной наклонной бетонной полосой. Для включения в работу продольные стержни привари-

ваются к металлическим косынкам из листовой или прокатной стали, расположенным под грузовой и опорными площадками. Кроме того, для обеспечения устойчивости сжатые продольные стержни объединяются в пакет с помощью поперечных стержней-хомутов. Расположение хомутов может быть принято параллельным либо в шахматном порядке.

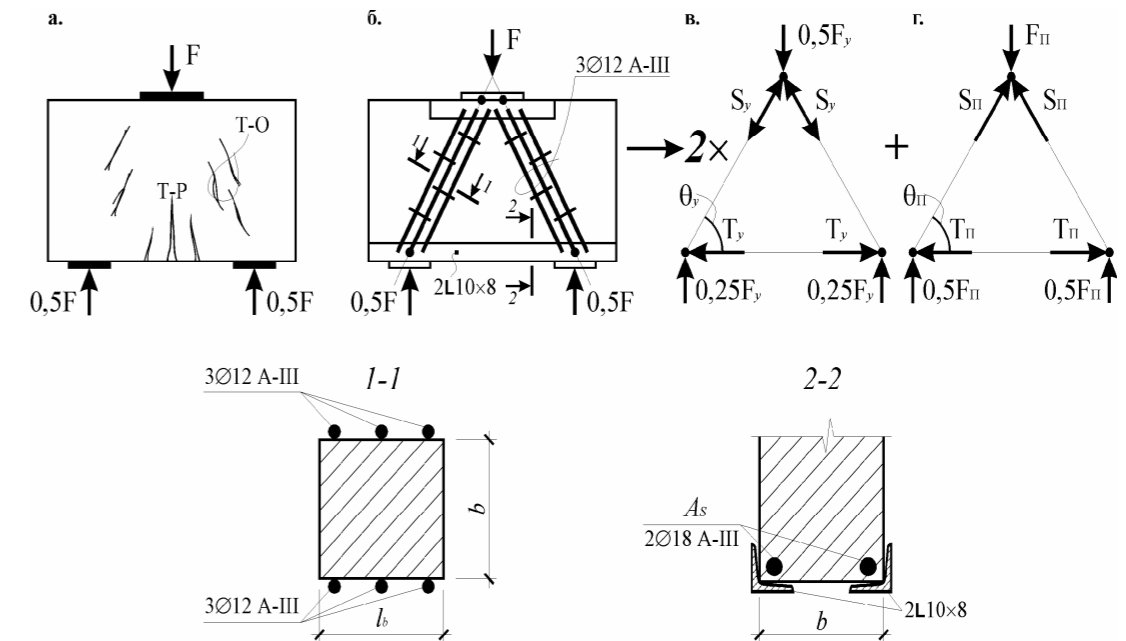


Рис. 2. Схема усиления балок (а, б) и расчетная модель усиления (в, г)

Расчет усиленных поврежденных балок заключается в определении усилий, передаваемых на новую стержневую систему.

При построении расчетных моделей усиленных балок использован принцип построения каркасно-стержневых моделей неповрежденных коротких балок.

Рассмотрим расчетную модель усиления КСМ-У поврежденной короткой балки при одновременном усилении наклонных сжатых полос бетона и растянутого арматурного горизонтального пояса (рис. 2,в,г). Модель включает в себя две симметрично расположенные плоские модели КСМ-У, являющиеся полной аналогией расчетных моделей КСМ неповрежденных балок. Угол наклона сжатых стержней модели КСМ определяется с учетом условий эксплуатации поврежденной балки. Ключевая точка модели поверху определяется пересечением наклонных осей, проходящих через центр тяжести пакетов арматурных стержней, с осью действия внешней силы. Ключевые точки модели понизу определяются точками пересечения осей арматурных пакетов с горизонтальной осью прокатных уголков.

Таким образом, расчетные модели КСМ-У усиления и модели КСМ-П поврежденной балки различаются количеством плоских моделей и углом наклона сжатых стержней.

Принцип и порядок построения модели КСМ-У не изменяется по сравнению с моделью КСМ [2, 3]. В результате искусственного увеличения размеров грузовой и опорных площадок возрастает расчетная ширина сжатых полос и уменьшается внешнее наклонное усилие сжатия за счет увеличения угла наклона сжатых полос (рис. 3).

Рассмотрим, как определяются усилия в расчетной модели усиления поврежденной балки. При расчете стержневой модели усиления КСМ-У сопряжение элементов в узлах принимается шарнирным. Величины усилий в стержнях определяются по зависимостям:

$$S = F_y / (2 \sin\theta),$$

$$T = F_y / (2 \operatorname{tg}\theta),$$

где S , T – суммарные усилия в наклонных и горизонтальных стержнях расчетных моделей симметрично расположенных систем усиления; $F_y = (F - F_{\Pi})$ – внешняя сила, передаваемая на симметрично расположенные конструкции усиления (F_{Π} – внешняя сила, передаваемая на поврежденный элемент; F – внешняя сила, передаваемая на элемент до его повреждения, либо внешняя планируемая сила при реконструкции).

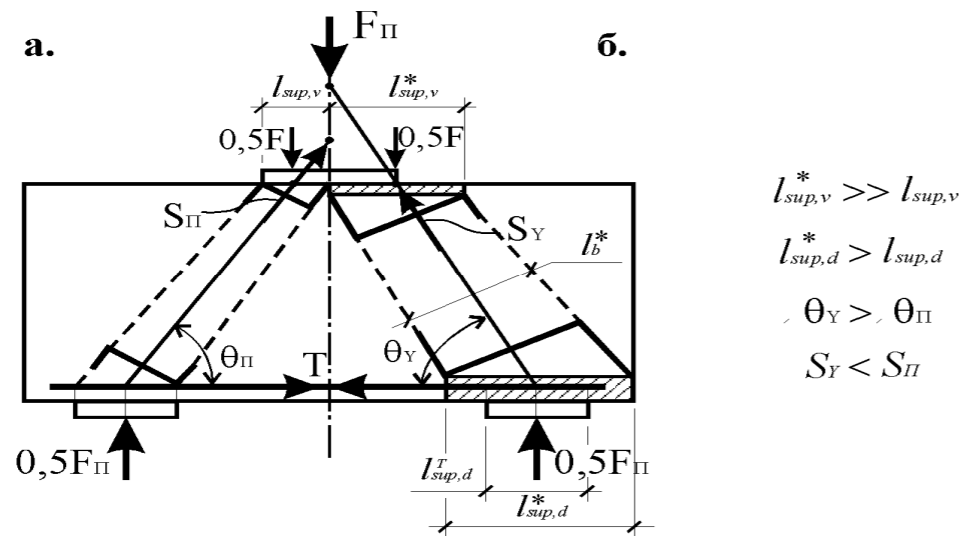


Рис. 3. Схема построения расчетной модели при увеличении размеров грузовых и опорных площадок

Величина внешней силы, передаваемой на поврежденный элемент, либо величина внешней силы, передаваемой на конструкцию усиления, определяется в зависимости от степени повреждения конструкции.

Для коротких балок в расчетной модели КСМ-У величины усилий определяются по зависимостям:

$$S = S_1 / (2 \sin\theta_p),$$

$$T = S_1 / \operatorname{tg}\theta_p,$$

где S_1 – усилие в вертикальных или наклонных стержнях расчетной модели КСМ коротких балок.

По величине предварительного обжатия T определяется величина внешней силы F_y , которая передается на разгружающую систему,

$$F_y = 2 T \sin\theta \operatorname{tg}\theta_p.$$

Расчет прочности сжатых бетонных полос элементов, в которых усиление сжатой зоны достигалось путем увеличения размеров грузовых либо опорных площадок, производится аналогично расчету неповрежденных элементов.

В общем случае прочность расчетных сжатых полос бетона коротких элементов, усиленных за счет предварительного обжатия, определяется по зависимости

$$S_y \leq \gamma_b^* R_b l_b b,$$

где $\gamma_b^* R_b$ – предельное сопротивление предварительно обжатой полосы бетона, определяемое по критерию прочности в зависимости от величины напряжений обжатия. Напряжения обжатия находятся по зависимости

$$\sigma_{об} = T_{об} / L,$$

где $T_{об}$ – равнодействующая усилий поперечного обжатия; L – длина сжатой бетонной полосы.

Экспериментально установлено, что предлагаемое решение конструкции усиления поврежденных коротких балок является эффективным, поскольку оно в полной мере повторяет характер работы указанных конструкций при нагружении и позволяет оценить несущую способность поврежденной конструкции.

ВЫВОДЫ

Установлено:

- расчетная каркасно-стержневая модель усиления коротких балок позволяет оценить прочность при разрушении как по наклонной сжатой полосе бетона, так и по растянутому арматурному поясу;
- предлагаемая методика расчета прочности при усилении поврежденных коротких балок в значительной степени совершенствует процесс проектирования при реконструкции;
- разработанные инженерные решения усиления являются эффективными, так как не изменяют характера работы коротких балок и работают совместно с поврежденной конструкцией;
- повышение несущей способности в результате усиления коротких балок на основе каркасно-стержневой модели может регулироваться при проектировании.

Список литературы

1. Лаврова, О.В. Прочность железобетонных коротких балок на основе каркасно-стержневых моделей / О.В. Лаврова // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 1 (36). – С. 91–96.
2. Лаврова, О.В. Закономерность изменения усилий образования трещин и разрушающих усилий при увеличении пролета среза, длины опорных и грузовых площадок / О.В. Лаврова, А.Д. Маслов, А.С. Клейменов // Эффективные строительные конструкции: теория и практика / XVI Международная научно-техническая конференция. – 2016. – С.91–96.
3. Лаврова, О.В. Расчет прочности железобетонных балок на основе каркасно-стержневой модели при изменении пролета среза / О.В. Лаврова // Эффективные строительные конструкции: теория и практика / XV Международная научно-техническая конференция. – 2015. – С. 81–84.

References

1. Lavrova, O.V. Strength of reinforced concrete short beams based on frame-rod models / O.V. Lavrova // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 1 (36). – P. 91–96.
2. Lavrova, O.V. The regularity of changes in the forces of cracking and destructive forces with an increase in the span of the shear, the length of the supporting and cargo platforms / O.V. Lavrova, A.D. Maslov, A.S. Kleimenov // Effective building structures: theory and practice/ XVI International Scientific and Technical Conference. – 2016. – P. 91–96.
3. Lavrova, O.V. Strength calculation of reinforced concrete beams based on the frame-rod model when changing the span of the slice / O.V. Lavrova // Effective building structures: theory and practice/ XV International Scientific and Technical Conference. – 2015. – P. 81–84.

УДК 624.01

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

Вдовин Вячеслав Михайлович,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Мартышкин Даниил Олегович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: historical95@mail.ru

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

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

Martyshkin Daniil Olegovich,
Postgraduate student of the department
«Building Structures»
E-mail: historical95@mail.ru

КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЕ НЕМАГНИТНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.М. Вдовин, Д.О. Мартышкин

Предлагается коррозионно-стойкое соединение с применением клеенных стеклопластиковых шайб. Описывается технология изготовления соединений. Приводятся результаты предварительных испытаний образцов, и отмечается достаточно высокая несущая способность предлагаемого соединения деревянных конструкций.

Ключевые слова: деревянные конструкции, соединение коррозионно-стойкое, стеклопластик КАСТ-В, шайба

CORRSION-RESISTANT NON-MAGNETIC CONNECTION OF WOODEN STRUCTURE ELEMENTS

V.M. Vdovin, D.O. Martyshkin

A corrosion resistant joint with glued fiberglass washers is proposed. The technology of manufacturing compounds is described, the results of preliminary tests of samples are obtained. A sufficiently high bearing capacity of the proposed connection of wooden structures is stated.

Keywords: wooden structures, corrosion-resistant connection, fiberglass KAST-V, washer

Соединения элементов деревянных конструкций выполняются с применением вкладышей, которые вставляются, ввинчиваются, впрессовываются или клеиваются в деревянные элементы, обеспечивая передачу усилий от одного элемента другому. Чаще всего такие вкладыши выполняются металлическими (гвозди, нагели, шпонки, шайбы, металлические зубчатые пластины (МЗП) и др.). Обладая достаточно большой несущей способностью, металлические рабочие вкладыши имеют существенные недостатки, одним из которых является то, что в отличие от дерева металлические вкладыши в процессе эксплуатации подвержены значительной коррозии. Это вызывает необходимость проведения дополнительных работ по защите металлических деталей от коррозии как в процессе эксплуатации, так и при изготовлении соединений.

Кроме того, к ряду несущих конструкций предъявляются требования немагнитности. Чистая древесина является немагнитным материалом, и наличие в ней металлических деталей в виде соединительных вкладышей нарушает это свойство. Поэтому не всегда в таких деревянных конструкциях можно использовать соединение с металлическими вкладышами.

Предлагается соединение немагнитное, коррозионно-стойкое и вместе с тем достаточно прочное. В основу данного соединения положена идея передачи сосредоточенного усилия, действующего на механические вкладыши, на достаточно большую площадь по сравнению с размером самой связи, и при этом сама связь должна быть выполнена из материала более прочного и жесткого, чем древесина, и, кроме того, химически стойкого и немагнитного. Таким материалом может стать стеклопластик КАСТ-В [1].

В основу предлагаемого соединения положена технология изготовления соединения на клеенных металлических шайбах (ККШ), описанная в работе [2].

Многие годы в деревянных конструкциях при передаче больших сосредоточенных усилий от одного элемента другому использовались различного рода шпонки и шайбы шпоночного типа. В дальнейшем с появлением клея и возможности изготовления клеевых соединений интерес к шпонкам угас. Однако и сегодня имеется необходимость в соединениях, способных к передаче больших усилий на сравнительно небольшой площади подобно шпонкам или шайбам. Но следует заметить, что в деревянных конструкциях использовались металлические шпонки, шайбы, которые не лишены недостатков, отмеченных выше.

Приняв в качестве материала шайб стеклопластик КАСТ-В и используя технологию изготовления, описанную в работе [2], получили соединение на клеенных стеклопластиковых шайбах (ВКСтШ), которое обладает высокой коррозионной стойкостью, немагнитностью и достаточно высокой несущей способностью и жесткостью. Однако до настоящего времени какие-либо исследования по этому вопросу не проводились.

Сущность предлагаемого соединения заключается в следующем. Сначала из листа стеклопластика КАСТ-В (армированного стеклотканью) специальной фрезой выбирают круглые диски определенного диаметра. Толщина дисков принимается согласно толщине листа КАСТ-В. В исследованиях принята толщина листов 6, 8, 10 и 12 мм. В соединениях деревянных заготовок выбирается гнездо по диаметру заготовленных дисков. Диаметр кольцевого гнезда в деревянных элементах соединения принимается на 2-3 мм больше, чем диаметр шайб для удобства вставки в него пластиковых дисков. Глубина кольцевого гнезда принимается равной толщине шайбы так, чтобы внешние плоскости шайбы и соединяемого элемента были в одном уровне.

Заготовленные диски-шайбы вставляются в гнезда, предварительно заполненные эпоксидным клеем. Излишки клея убираются, весь пакет соединяемых элементов соединяется болтом, и соединение выдерживается в течение 2-3 дней до полного отверждения клея. Таким образом стеклопластиковая шайба надежно клеивается в древесину соединяемых элементов.

Клеевая композиция, заполняющая гнездо, создает после ее отверждения монолитное соединение с шайбой и, кроме того, способствует уплотнению поверхности древесины по периметру с шайбой. Шайба в этом случае начинает работать не только на скалывание клеевого шва по поверхности, но и на смятие древесины по контуру шайбы. Все это, как показывают испытания, существенно увеличивает несущую способность и жесткость такого соединения. Предполагается, что работа соединения на ВКСтШ существенно зависит от $D_{ш}$, $t_{ш}$, S_1 , S_2 и h (соответственно диаметр, толщина шайбы, шаг расстановки шайб и толщина соединяемых элементов).

Была отработана технология изготовления соединений такого типа. Для соблюдения соосности гнезд предварительно высверливается центровочное отверстие $d=1-1,5$ см. Затем выбирается гнездо под болт, центр которого совпадает с ранее просверленным центровочным отверстием. Глубина гнезда принимается равной толщине шайбы, а диаметр – на 1-2 мм больше, чем $D_{ш}$. Отверстие под центровку болта сверлится на 1-2 мм больше, чем сам болт. В гнездо заливается клеевая композиция и вкладываются шайбы. После завершения всех операций образец выдерживается до полного отверждения клея.

Общий вид образца и деталей к нему показан на рис. 1.

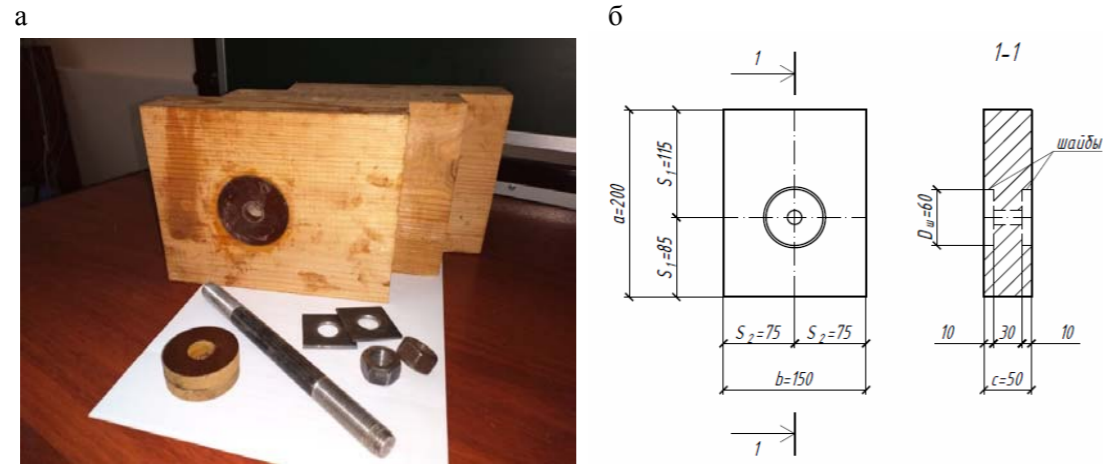


Рис.1. Общий вид образца и его деталей:

а – составляющие детали испытываемого образца; б – общий вид образца и его размеры

При изготовлении образцов использовались инструменты фирмы «Protool».

Диаметр сверл-фрез для выборки отверстий под шайбы рекомендуется от 50 до 130 мм с градацией 5 мм.

Заготовленные образцы были испытаны под нагрузкой. Схема испытаний показана на рис. 2.

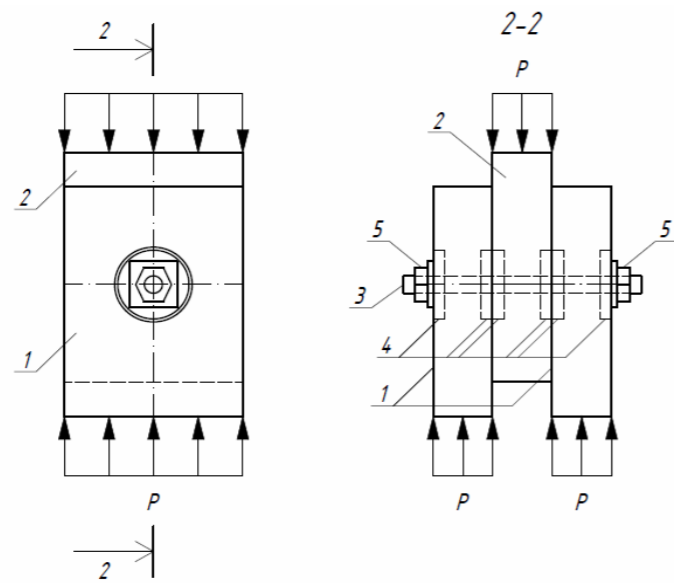


Рис. 2. Схема нагружения трехсоставного образца:

1 – крайний элемент; 2 – средний элемент; 3 – стяжной болт; 4 – клеенные шайбы; 5 – гайки

Испытания проводились на электромеханическом прессе ПТС-500, предназначенном для испытания материалов на прочность при сжатии с диапазоном нагрузки от 0 до 500 кН.

Пресс обеспечивает:

- ввод данных и управление с клавиатуры в диалоговом режиме;
- испытание образца по заданному алгоритму, полную автоматизацию процесса испытания, включая ускоренный подвод подвижной плиты к образцу с автоматическим переключением скорости с ускоренной на рабочую, а также быстрый автоматический возврат траверсы в исходное положение после разрушения образца;

– математическую обработку результатов испытания;

– выдачу информации о результатах испытаний на дисплей.

Внешний вид прессы показан на рис. 3.



Рис. 3. Испытательный пресс ПТС-500

Нагружение образцов на клеенных шайбах производилось поэтапно с величиной ступени 5 кН.

Результаты испытания образцов приведены в таблице, рис. 4, 5.

Результаты испытаний образцов соединений на клеенных шайбах

№ этапа нагр.	Марка образца	Параметры шайб		Размеры образца			Нагрузка P, кН	Время, мин
		D _ш , мм	t, мм	a, мм	b, мм	c, мм		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ВКСтШ-1	60	10	200	150	50	5,00	14:57
2							10,00	14:58
3							15,00	14:59
4							20,00	15:00
5							25,00	15:01
6							30,00	15:02
7							35,00	15:03
8							40,00	15:04
9							45,00	15:05
10							50,00	15:06
11							55,00	15:07
12							60,00	15:08
13							65,00	15:09
14							67,00	15:10
1	ВКСтШ-2	60	10	200	150	50	5,00	15:25
2							10,00	15:26
3							15,00	15:27
4							20,00	15:28
5							25,00	15:29
1							5,00	15:25

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2							10,00	15:26
3							15,00	15:27
4							20,00	15:28
5							25,00	15:29
6							30,00	15:30
7							35,00	15:31
8							40,00	15:32
9							45,00	15:33
10							50,00	15:34
11							55,00	15:35
12							60,00	15:36
13							65,00	15:37
14							70,00	15:38
15							75,00	15:39
16							78,00	15:40

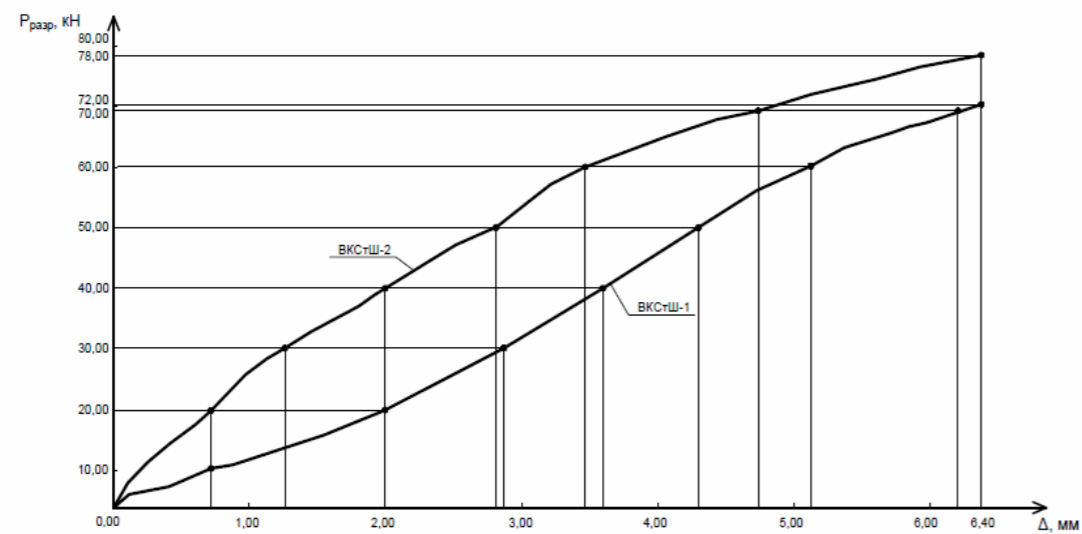


Рис. 4. Диаграмма испытаний образцов

Разрушающая нагрузка при испытании образца ВКСтШ-1 составила 6,7 кН, образца ВКСтШ-2 – 7,8 кН, максимальные перемещения при разрушающей нагрузке соответственно равны 6,40 мм и 6,40 мм.

Сравнивая эти величины с аналогичными для соединений на клеенных стальных шайбах [2], следует отметить, что в соединениях на ВКСтШ имеют место несколько пониженные величины разрушающей нагрузки. Очевидно, это связано прежде всего с пониженными значениями прочности и модуля упругости для стеклопластика КАСТ-В по сравнению с аналогичными характеристиками для металлических шайб.

Следует отметить, что на фактическую величину несущей способности испытанных соединений существенно повлиял недостаточный шаг S_1 и S_2 расстановки шайб в соединении (особенно S_1), о чем говорит то, что разрушение образцов было в результате раскалывания деревянных образцов на участке от торца до шайбы, т.е. на участке S_1 .

Рис. 5. Общий вид испытанных образцов:
а – ВКСтШ-1; б – ВКСтШ-2

Таким образом, результаты предварительных испытаний показали достаточно высокую несущую способность предлагаемого соединения и его перспективность в конструкциях коррозионно-стойких и немагнитных. Намечены исследования с более глубоким изучением действительной работы соединений и получением зависимости прочности и жесткости от параметров клеенных шайб и соединяемых элементов.

Список литературы

- ГОСТ 10292–74. Стеклотекстолит конструкционный. Технические условия. – М., 1974.
- Вдовин, В.М. Вклеенные кольцевые шайбы в соединениях деревянных конструкций: монография / В.М. Вдовин, М.В. Арискин. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 184 с.

References

- GOST 10292–74. Structural fiberglass. Technical conditions. – M., 1974.
- Vdovin, V.M. Glued ring washers in joints of wooden structures: monograph / V.M. Vdovin, M.V. Ariskin. – Penza: PGUAS, 2012. – 184 p.

УДК 624.07

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

Жуков Александр Николаевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: zhukov.penza@yandex.ru

Булавина Дарья Андреевна,
студент
E-mail: ms.pankina.97@gmail.com

Абрашитов Валентин Султанович,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»

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

Zhukov Alexander Nikolaevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Building Structures»
E-mail: zhukov.penza@yandex.ru

Bulavina Daria Andreevna,
Student
Email: ms.pankina.97@gmail.com

Abrashitov Valentin Sultanovich,
Candidate of Sciences, Professor of the
department «Building Structures»

УЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ АРЧНОГО АНГАРА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЕГО ОБОЛОЧКИ

А.Н. Жуков, Д.А. Булавина, В.С. Абрашитов

Выполнено исследование конструктивных особенностей, а также несущей способности арочной оболочки свода с оценкой устойчивости каркаса в зависимости от способа его закрепления. Сделаны выводы и рекомендации по обеспечению безопасной эксплуатации таких металлических систем. Проведен анализ несущей способности ангара с использованием метода конечных элементов в программах SCAD 21.1 и COSMIC 6.1.

Ключевые слова: ангар, продуктовый склад, металлические конструкции, несущая способность, расчет

DESIGN FEATURES OF AN ARCHED HANGAR AT DETERMINING THE CARRYING CAPACITY OF ITS SHELL

A.N. Zhukov, D.A. Bulavina, V.S. Abrashitov

The study of design features, as well as the carrying capacity of the arched shell of the arch with the assessment of the stability of the frame, depending on the method of its fastening, is carried out. The conclusions and recommendations for ensuring safe operation of such metal systems are also made. The analysis of the bearing capacity of the hangar using the finite element method in the software complexes SCAD 21.1 and COSMIC 6.1 is given.

Keywords: hangar, grocery warehouse, metal structures, bearing capacity, calculation

В настоящее время арочные бескаркасные ангары используются в промышленности в качестве складских помещений. Специфика расчета подобных конструкций такова, что статический расчет, расчет на устойчивость, расчет несущей способности производятся для общего анализа работоспособности конструкции. Проверка несущей способности выполняется в соответствии с СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции» и выявляет способности наиболее нагруженного места в конструкции арочного ангара, с учетом силовых нагрузок (снег, дождь, ветер и т.д.). В работе с конструкциями из рулонной оцинкованной стали рассматриваются два варианта расчета арочного ангара:

- расчет без учета действия нагрузок;
- расчет на основное сочетание нагрузок.

На основе результатов расчета арочного ангара делаются соответствующие выводы и документальные заключения о его работоспособности, долговечности, прочности, надежности и устойчивости при различных нагрузках, в соответствии с районом возведения сооружения.

В зимний период 2018 года два схожих по конструктивному решению ангара в Пензенской области обрушились из-за неравномерного распределения усилий от оболочки (гофры) на несущие элементы. Для рассмотрения и сравнения были приняты во внимание способы их закрепления (шарнирный и жесткий) и произведены расчеты при следующих геометрических и прочностных характеристиках: здание в плане имеет прямоугольное очертание 24×120 м и высоту 13,5 м. Конструкция состоит из вертикальных монолитных железобетонных стен высотой 3,5 м и арочного покрытия в виде серповидной двухшарнирной арки с очертанием в виде дуги окружности, радиус которой 12,706 м. Все несущие конструктивные элементы выполнены из металла. По металлическим опорам под оболочкой установлены сквозные арочные фермы (высота сечения 520 мм, шаг 7,25 м). Все стержни ферм имеют сечения поясов и решетки из уголков (50×5 по ГОСТ 8509–93). Эти фермы имеют размеры $f=10000$ мм и $l=24000$ мм (где f – высота дуги арки, l – пролет фермы). Плоские поддерживающие фермы между собой объединяются в одну пространственную систему через стержни-распорки, выполняемые также из уголков (50×5) в середине дуги арки и с раскосами, меняющими свое направление. Ниже отметки 0,000 в конструкции пола по всей ширине здания от оси А до оси Б устроены затяжки Т1 для восприятия распора в опорах арок. Затяжка выполнена из квадратного профиля (20×20 мм по ГОСТ 2591-88 из стали С345). Таких затяжек необходимо установить не менее 59 штук. Толщина оболочки составляет 1,52 мм.

Выполним предварительный расчет несущей способности конструкции в зависимости от способа закрепления в программном комплексе COSMIC 6.1 для следующих видов закрепления:

– при шарнирном закреплении оболочки происходит двукратный перегруз элементов, так как крутящий и изгибающий моменты превышают допустимые в 2,31 и 1,71 раза соответственно;

– жесткое закрепление позволяет контролировать ситуацию, увеличивая несущую способность, так как крутящий момент при таком способе опирания почти в 3 раза меньше, чем при шарнирном.

Применение дополнительных элементов, поддерживающих оболочку конструкций, здесь и далее не предусмотрено.

Для верификации результатов расчета проверку устойчивости конструкции выполним в программном комплексе SCAD 21.1. Результаты расчета пространственной модели при **шарнирном** опирании на контурную балку, размещение балки с эксцентриситетом от стены приведены на рис.1а.

На рис.1б по расчету мы получили вертикальные перемещения 230 мм, которые превышают нормативные в 10 раз (1/50 пролета приблизительно равна 13 мм), что приводит к дополнительным деформациям оболочки и концентрации опорной части оболочки – сжатые элементы с напряжением до 390 МПа, а в опорах шарнирного закрепления (растяжения) до 1050 МПа. При этом расчетное сопротивление выбранной нами стали равно 235 МПа. Обрушение произойдет в наиболее «слабой» части здания, где отсутствуют фермы жесткости, в осях с 55 по 61.

Результаты расчета пространственной модели при **жестком** опирании на контурную балку, «не деформируемую по длине», представлены на рис. 2а и 2б.

Второй вариант модели содержит жесткое защемление оболочки в опорном контуре. Под опорную балку «подведена» консоль железобетонной стены. Таким образом, опорная часть оболочки имеет незначительные вертикальные деформации. При этом максимальные вертикальные перемещения по оболочке составляют до 94 мм при расчетных нагрузках, что меньше нормативных максимально допустимых, равных 1/250 пролета, то есть 96 мм.

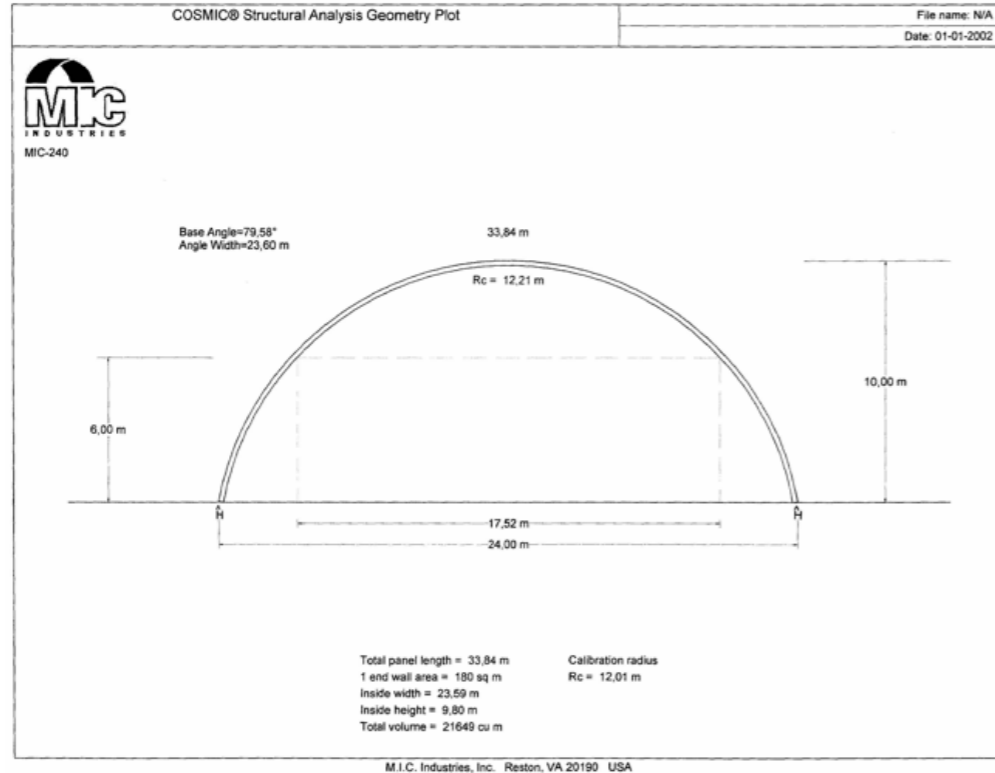


Рис. 1а. Шарнирный способ закрепления

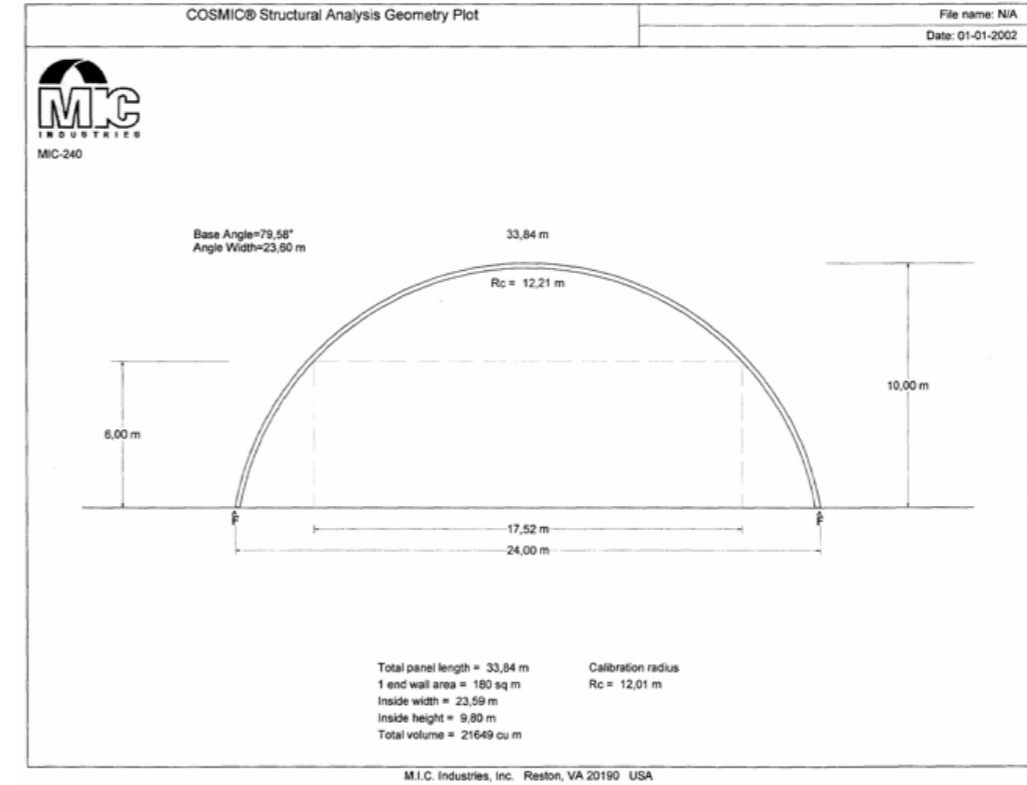


Рис. 2а. Жесткий способ закрепления

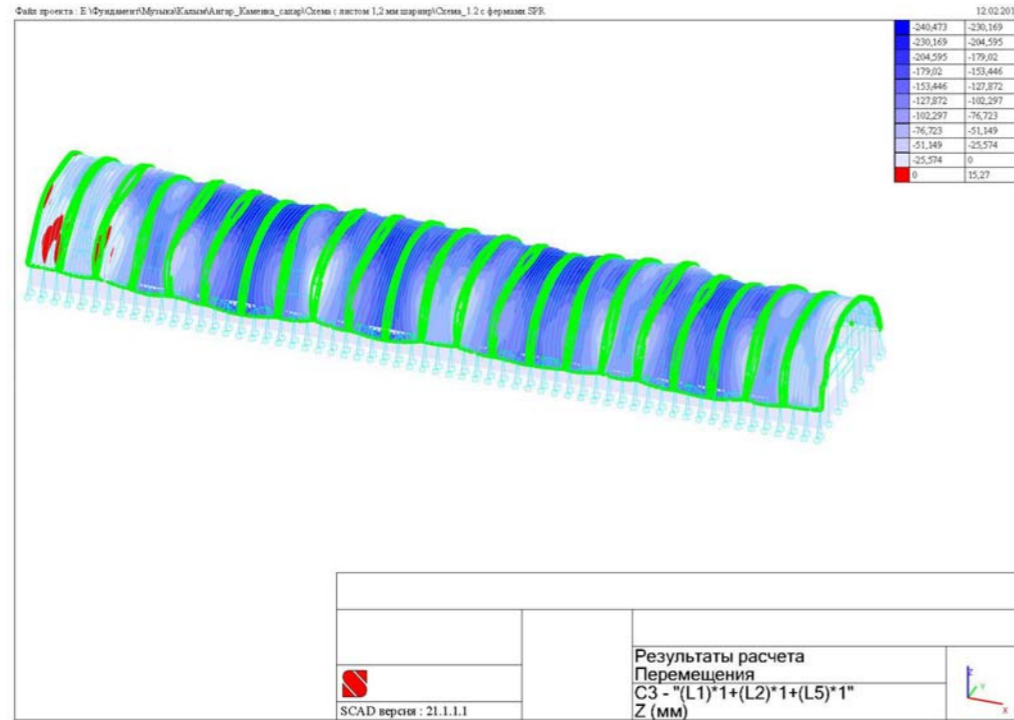


Рис. 1б. Вертикальные перемещения от нагрузок

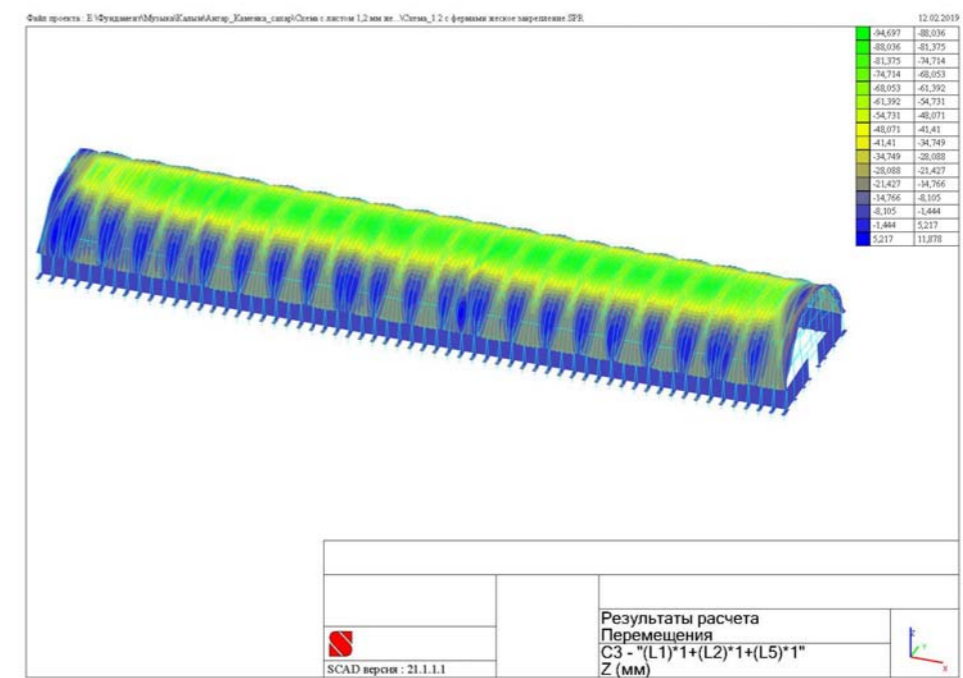


Рис. 2б. Вертикальные перемещения от нагрузок

Максимальные напряжения в элементах не превышают 230 МПа для наиболее нагруженных элементов, что не превышает расчетное сопротивление стали, равное 235 МПа, таким образом, прочность оболочки обеспечена.

В данной схеме учтена совместная с оболочкой работа арочных противоаварийных конструкций вместе с системой распорок и связей, обеспечивающих пространственную работу всей системы, т.е. при отсутствии данных элементов оболочка при тол-

щине 1,2 мм при снеговых нагрузках будет находиться в перегруженном (аварийном) состоянии.

Использование только ребер жесткости под гофрированной оболочкой меняет принцип работы пространственного блока, в этом случае нагрузка на несущие элементы передается неравномерно. Считаем целесообразным использование арочного каркаса из пространственных арочных ферм, объединенных системой прогонов и связей (противоаварийная система), в качестве компромиссного варианта. При этом для возможности частичного включения в совместную работу с оболочкой требуется жесткое крепление оболочки на опорном элементе. Вертикальная жесткость опорного элемента должна быть близка жесткости вертикальной железобетонной стенки. Горизонтальные деформации узла опирания не должны составлять более нескольких миллиметров (т.е. физически приближаться к параметру «несмещаемая опора»). Для снижения деформаций и напряжений в оболочке, а также для разгрузки арочных элементов рекомендуется уменьшить их шаг до 4,5 м.

Описанная выше деформированная схема хорошо отображает характер полученных разрушений, представленных на рис. 3 и 4.

На рис. 3а и 4а отражено обрушение арочного покрытия в осях с 55 по 61, в наиболее «слабой» части здания, где отсутствовали фермы жесткости, что привело к потере устойчивости профилированных листов типа МПС-240. Также стоит заметить, что расстояние между ближайшей фермой и торцом здания составляет 10,9 м. Отсутствуют связи по нижним поясам ферм, как и опорные элементы покрытия в торцах здания.

На рис. 3б и 4б представлено обрушение арочного покрытия в осях с 1 по 54. Оно обрушилось внутрь ангара в результате потери прочности арочного покрытия.



Рис. 3а. Фасад склада сахара в осях 1-61



Рис.3б. Фасад склада муки в осях 1-61



Рис. 4а. Вид обрушения фермы сахарного склада между осями 55-56



Рис. 4б. Общий вид обрушения арочного покрытия ангара с мукой со стороны оси А

Учет конструктивных особенностей арочных ангаров позволил:

- обеспечить требуемую несущую способность на основе заземления оболочки в опорном контуре;
- под опорную балку подвести консоль железобетонной стены таким образом, чтобы опорная часть оболочки получала минимальные вертикальные деформации;
- обеспечить пространственную жесткость путем добавления поддерживающих ферм, установив их с расстоянием не более 4,8 м, с постановкой системы связей в виде распорок между узлами ферм и постановкой связей по покрытию в крайних пролетах и посередине длины здания.

Список литературы

1. Технический регламент безопасности зданий и сооружений. Введен в действие Федеральным законом РФ №384-ФЗ от 30.12.2009 г.
2. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2015. – 16 с.
3. ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М., 2012. – 89 с.
4. СП 13-102–2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. – М.: Госстрой России, 2004. – 26 с.
5. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07 – 85*. – М., 2016. – 136 с.
6. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01–2003. – М., 2003. – 165 с.
7. СП 50-101–2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. – М., 2005. – 135 с.
8. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01 – 83*. – М., 2011. – 161 с.

References

1. Technical regulations for the safety of buildings and structures. Enacted by Federal Law of the Russian Federation No. 384-FZ of December 30, 2009
2. GOST 27751–2014. Reliability of building structures and bases. The main provisions. – M.: Standardinform, 2015. – 16 p.
3. GOST 31937–2011. Buildings and constructions. Rules of inspection and monitoring of technical condition. – M., 2012. – 89 p.
4. SP 13-102–2003. Rules for inspection of bearing building structures of buildings and structures. – M.: Gosstroy of Russia, 2004. – 26 p.
5. SP 20.13330.2016. Load and impact. Updated version of SNiP 2.01.07–85*. – M., 2016. – 136 p.
6. SP 63.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. Updated edition of SNiP 52-01–2003. – M., 2003. – 165 p.
7. SP 50-101–2004. Design and construction of foundations and foundations of buildings and structures. – M., 2005. – 135 p.
8. SP 22.13330.2011. The foundations of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01 – 83 *. – M., 2011 – 161 p.

УДК 692.1

Петрозаводский государственный университет

Россия, 185910, г.Петрозаводск, проспект Ленина, д.33

Селютина Любовь Федоровна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология и организация
строительства»
E-mail: selutinalf@mail.ru

Малашенко Александра Андреевна,
студент
E-mail: aieksandra.malashenko97@mail.ru

Petrozavodsk State University

Russia, 185910, Petrozavodsk, 33,
Lenin Avenue

Selyutina Lyubov Fedorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Technology
and organization of construction»
E-mail: selutinalf@mail.ru

Malashenko Alexandra Andreevna,
Student
E-mail: aieksandra.malashenko97@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ФУНДАМЕНТОВ

Л.Ф. Селютина, А.А. Малашенко

Исследовано влияние геологических условий Республики Карелия на технические параметры фундаментов гражданских зданий. Рассмотрены три варианта конструктивных систем зданий. Усилия определены в ПК «ЛИРА-САПР». Осадки рассчитаны в программе «ФУНДАМЕНТ». Изучено влияние различных факторов на технические показатели фундаментов.

Ключевые слова: геологические условия, ленточный фундамент, фундаментная плита, столбчатый фундамент, осадки основания, разность осадок, расход материалов

STUDY OF ENGINEERING-GEOLOGICAL CONDITIONS INFLUENCE ON TECHNICAL PARAMETERS OF FOUNDATIONS

L.F. Selutina, A.A. Malashenko

The influence of geological conditions of the Republic of Karelia on technical parameters of foundations of civil buildings is investigated. Three variants of structural systems of buildings are considered. Efforts are defined in LIRA-CAD PC. Precipitation is calculated in the FOUNDATION program. The influence of various factors on the technical performance of foundations is studied.

Keywords: geological conditions, continuous footing, pier foundation, precipitation of the base, difference in sediment, material consumption

Введение

Инженерно-геологические условия Карелии отличаются неоднородностью. Их особенностью является широкое развитие скальных грунтов в северо-западной и центральной частях региона и значительное развитие грунтов особого состояния и свойств. Варианты инженерно-геологических условий приняты по критерию сжимаемости грунтов: среднесжимаемые: коэффициент относительной сжимаемости $m_0 = 0,005 \div 0,05 \text{ МПа}^{-1}$, модуль деформации $E = 5 \div 20 \text{ МПа}$ (вариант 1); малосжимаемые: $m_0 < 0,05 \text{ МПа}^{-1}$, $E > 20 \text{ МПа}$ (вариант 2); сильно сжимаемые: $m_0 > 0,05 \text{ МПа}^{-1}$, $E < 5 \text{ МПа}$ (вариант 3).

Задачей исследования является изучение возможностей применения программных комплексов «САПФИР», «ЛИРА-САПР», «ФУНДАМЕНТ» для вариантного проектирования фундаментов.

Методология и методы исследования

Пространственные модели зданий созданы в программном комплексе «САПФИР». Расчет здания и сбор нагрузок на фундаменты произведен программным комплексом «ЛИРА-САПР 2013». Расчет осадок фундаментов выполнен с использованием программы «ФУНДАМЕНТ 12.3».

Характеристика конструктивных систем зданий

Здания перекрестно-стеновой конструктивной схемы рассмотрены в двух вариантах:

вариант 1: жилой 3-этажный дом, прямоугольный в плане, с размерами в осях 21,74x21,81 м, без подвала. Наружные стены – несущие; перекрытия и покрытие – сборные железобетонные плиты безопалубочного формования. Место строительства – г. Костомукша;

вариант 2: жилое здание, с размерами в осях 27,7x27,7 м, без подвала. Перекрытия – монолитные железобетонные плиты толщиной 220 мм. Место строительства – г. Петрозаводск.

Выбор зданий перекрестно-стеновой конструктивной системы определяется высокой пространственной жесткостью многоячейковой пространственной системы, образованной перекрытиями, стенами.

Вариант 3. Здание каркасной конструктивной системы с автостоянкой в цокольном этаже. Место строительства – г. Петрозаводск.

Здание переменной этажности: 3–4 этажа. Максимальная высота парапета составляет 13,9 м и 10,6 м. Перекрытия – сборные железобетонные плиты, уложенные по металлическим балкам.

Каркасная конструктивная система: по способу обеспечения прочности, устойчивости и жесткости является рамной.

В осях «1»–«3» располагается четырехэтажная часть здания с административными помещениями. В цокольном этаже размещаются автостоянка и технические помещения. План цокольного этажа приведен на рис. 1.

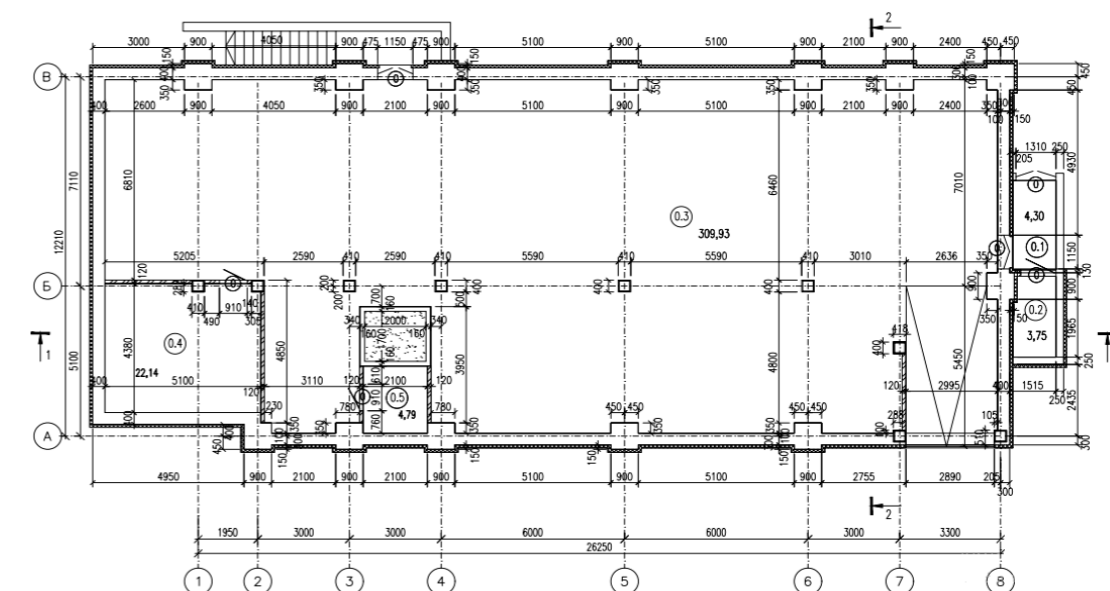


Рис. 1. План цокольного этажа здания каркасной конструктивной системы

Варианты инженерно-геологических условий

Наиболее важными свойствами моренных грунтов Республики Карелия являются большая неоднородность состава, структуры и текстуры, значительная уплотненность и прочность, наличие внутриморенных водоносных песчаных прослоев и линз, слабых глин и суглинков, создающих трудности при строительстве [1]. Глинистые моренные отложения обычно легко размокают, подвержены морозному пучению.

Естественным основанием фундаментов являются мелкие и пылеватые пески, моренные супеси. Подстилающий слой – легкие суглинки. Нормативные значения показателей физико-механических свойств грунтов с учетом лабораторных определений и данных полевых испытаний грунтов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Нормативные характеристики грунтов

Наименование грунта	Показатель текучести J_L	Коэффициент пористости e	Плотность ρ , г/см ³	Угол внутреннего трения φ_n , °	Сцепление C_n , кПа	Модуль деформации E , МПа
Песок мелкий		0,68	1,82	31	2	25
Песок пылеватый		0,65	1,85	30	4	18
Суглинок легкий пылеватый	1,47	0,99	1,85	17	6	4
Супесь моренная пылеватая	0,43	0,35	2,26	26	5	13

Песок пылеватый: при нарушении естественной структуры в водонасыщенном состоянии пылеватый песок проявляет плавунные свойства. Мощность пылеватых песков изменяется от 0,9 до 3,5 м.

Песок мелкий: при нарушении естественной структуры в водонасыщенном состоянии мелкий песок проявляет плавунные свойства. Мощность слоя мелких песков составляет 1,9–3,7 м.

Суглинок легкий пылеватый ленточный, текучей консистенции ($I_L = 1,47$), водоносный по песчаным прослоям, тиксотропный.

Супесь моренная пылеватая, с гравием и галькой до 20–25 % и валунами до 5–10 %, серого цвета, пластичной консистенции ($I_L = 0,43$), водоносная по песчаным гнездам, тиксотропная. Моренные супеси вскрыты в основании разреза, мощность их изменяется от 0,3 до 1,5 и более метра.

Подземные воды на исследованной территории представлены грунтовым водоносным горизонтом напорно-безнапорного характера, вскрытым в период изысканий с глубины 3,8–4,3 м. Грунтовые воды приурочены ко всем типам вскрытых грунтов.

Инженерно-геологический разрез представлен на рис. 2.

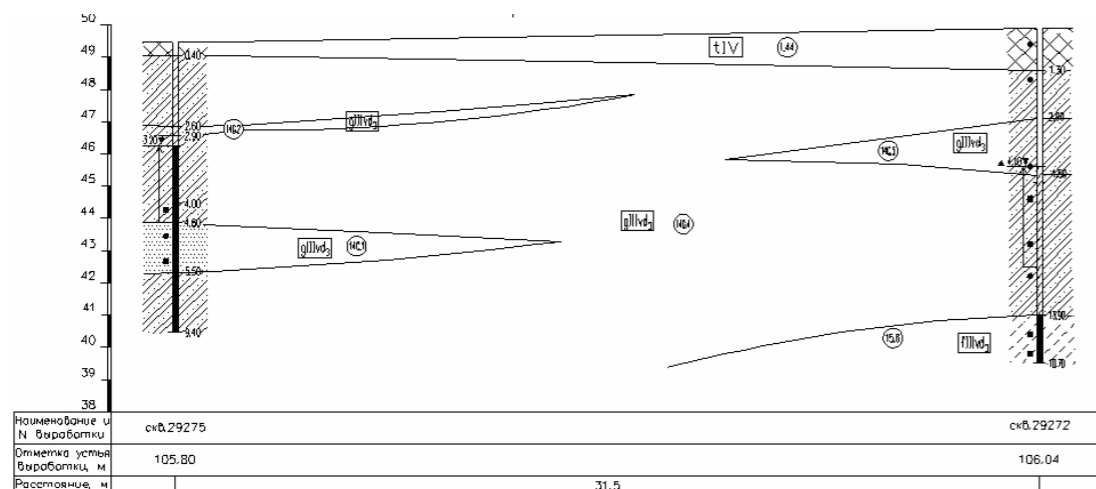


Рис. 2. Геологический разрез, вариант 1

Т а б л и ц а 2

Нормативные характеристики грунтов

Наименование грунта	Показатель текучести J_L	Коэффициент пористости e	Плотность ρ , г/см ³	Угол внутреннего трения φ_n , °	Сцепление C_n , кПа	Модуль деформации E , МПа
Супесь моренная песчаная пластичная	0,21	0,65	2,01	26	7	13
Супесь моренная песчаная твердая	-0,03	0,32	2,24	27	10	20
Суглинок моренный пылеватый	-0,51	0,45	2,18	26	47	31
Супесь пылеватая	0,43	0,53	2,14	25	19	21

Третий вариант инженерно-геологических условий

Нормативные характеристики грунтов:

Суглинок легкий пылеватый ленточный текучей консистенции, водоносный по песчаным слоям, тиксотропный. Показатель текучести $J_L = 1,35$; коэффициент пористости $e = 0,71$; плотность $\rho = 1,9$ г/см³; угол внутреннего трения $\varphi_n = 17^\circ$; сцепление $C_n = 5$ кПа; модуль деформации $E = 4$ МПа.

Супесь песчаная с включениями гравия до 5 %, пластичной консистенции, водоносная по песчаным гнездам, тиксотропная. Показатель текучести $J_L = 0,46$; коэффициент пористости $e = 0,37$; плотность $\rho = 2,12$ г/см³; угол внутреннего трения $\varphi_n = 16^\circ$; сцепление $C_n = 6$ кПа; модуль деформации $E = 5$ МПа.

Суглинок легкий пылеватый: показатель текучести $J_L = 1,44$; коэффициент пористости 0,95; плотность $\rho = 1,85$ г/см³; угол внутреннего трения $\varphi_n = 17^\circ$; сцепление $C_n = 7$ кПа; модуль деформации $E = 5$ МПа. Слой суглинка находится на глубине 2÷3,8 м от подошвы фундамента.

Расчет нагрузок на фундаменты, расчет армирования и осадок фундаментов

Здание перекрестной стеновой конструктивной системы, вариант 1

Конечно-элементная модель и расчетная схема здания представлены на рис. 3 и 4.

Т а б л и ц а 3

Армирование фундаментной плиты

Толщина фундаментной плиты, м	Максимальная осадка, см	Арматура класса А400: Максимальный диаметр	
		В верхней зоне	В нижней зоне
0,5	3,27	5 d32	5d12
0,6	3,38	5 d28	5d12
0,7	2,58	5d 28	5d12

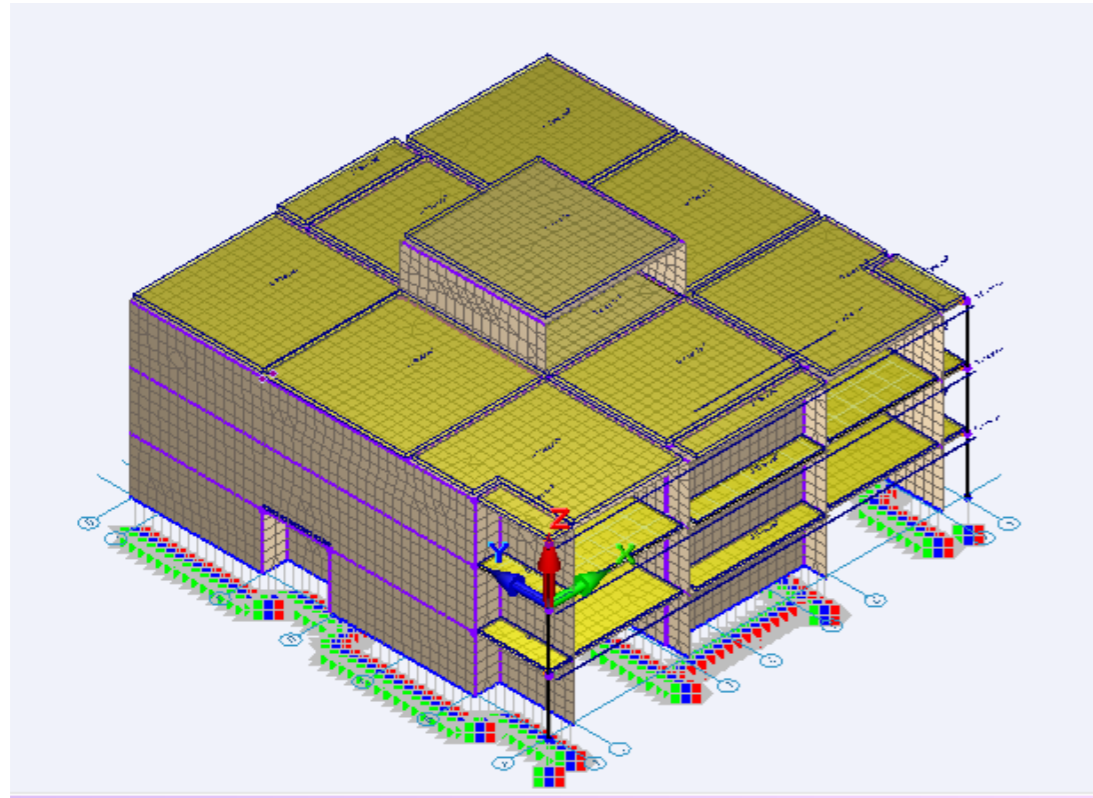


Рис. 3. Конечно-элементная модель

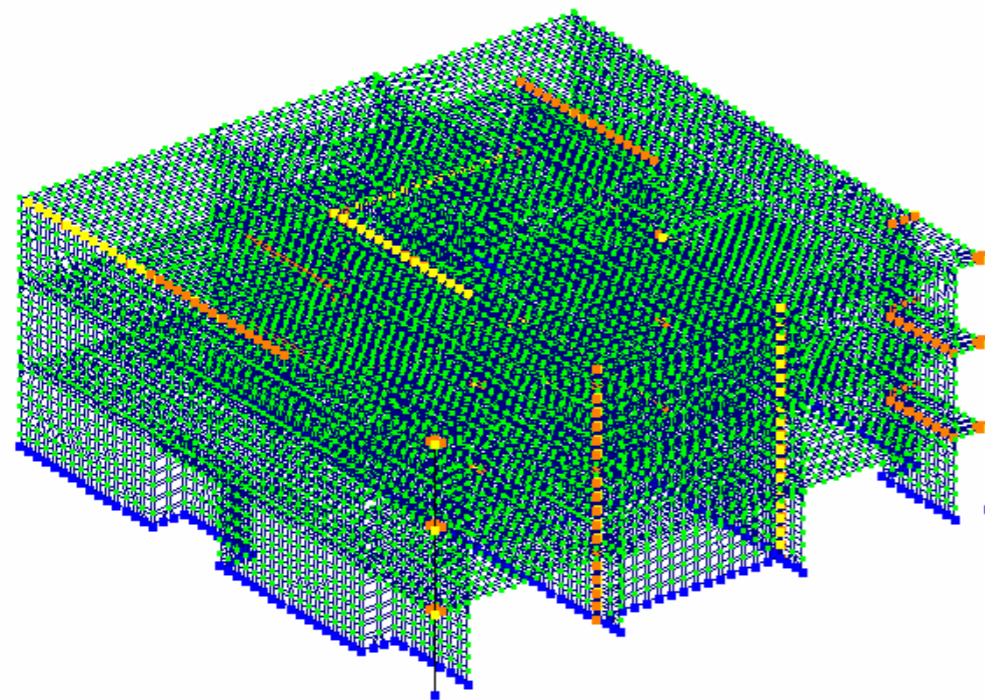


Рис. 4. Расчетная схема в ПК ЛИРА-САПР

Проектирование ленточного фундамента выполнено для среднесжимаемого и малосжимаемого грунтов. Результаты расчетов фундаментов приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Характеристики фундаментов здания перекрестно-стеновой конструктивной системы (вариант 1)

Наименование показателей	Инженерно-геологические условия		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Количество этажей	3	3	3
Глубина заложения фундамента, м	1,7 м	1,7 м	1,0 м (щебеночная подготовка толщиной 70 см)
Ширина подошвы ленточного фундамента, м	2,0 м	1,6 м	Фундаментная плита ребристая, высота ребер 1 м. Толщина плиты = 0,2 м
Класс бетона по прочности на сжатие/ Расход бетона, куб.м / м	B20 /1,32	B20/1,3	B15/211 куб. м на весь фундамент
Осадка максим., см	5,82 (< 12 см, [2])	3,76 (<12 см, [2])	Осадка 3,38 см
Разность осадок,	0,0015 (< 0,002, [2])	0,016 (< 0,002, [2])	0,0007
Нижняя граница сжимаемой толщи, м	9,3	9,6	6,3

Для сильно сжимаемого грунта выполнен расчет фундаментной плиты. Нагрузки на плиту представлены на рис. 5.

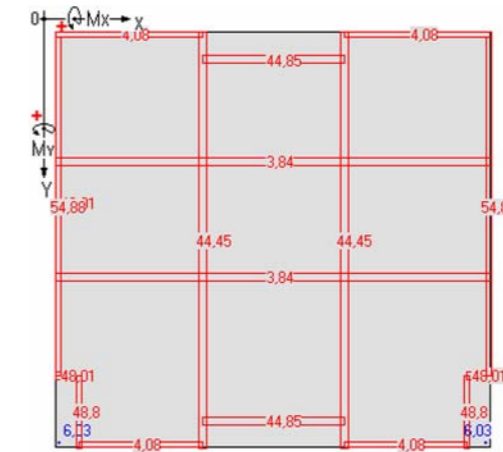


Рис. 5. Нагрузка на фундаментную плиту

Приведенные суммарные нагрузки по программе на плиту: $N = 21747,3$ кН; $M_x = 66,2$ кН·м; $M_y = 17993,4$ кН·м.

Здание перекрестной стеновой конструктивной системы, вариант 2

Девятиэтажное здание: конечно-элементная модель и расчетная схема здания представлены на рис. 6 и 7.

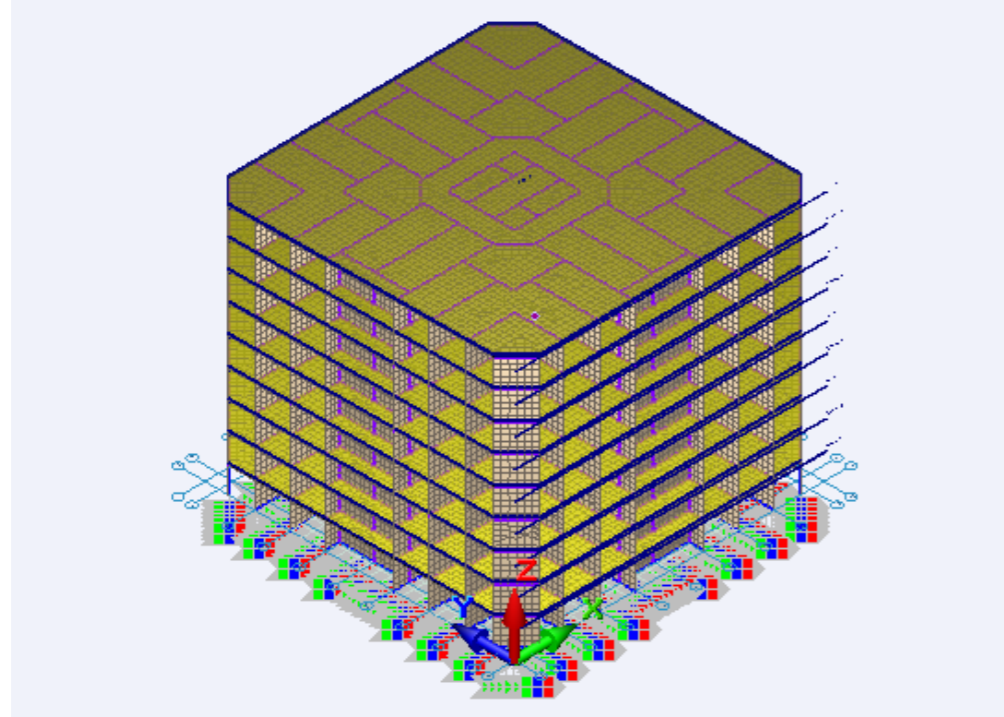


Рис. 6. Конечно-элементная модель для 9 этажей

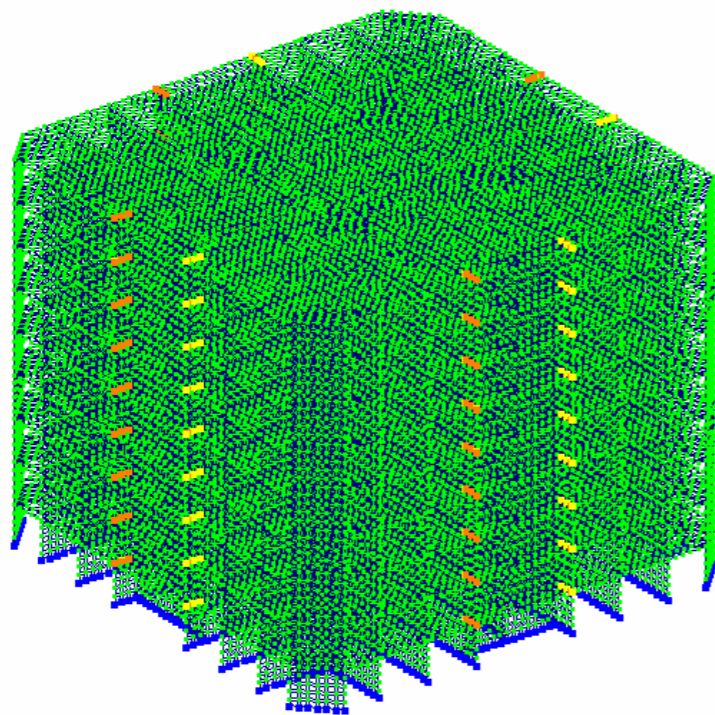


Рис. 7. Расчетная схема в ПК ЛИРА-САПР

Девятиэтажное здание. Расчет ленточного фундамента: ширина подошвы превысила максимально возможную ширину подошвы ленточного фундамента (3,2 м), поэтому определена максимальная этажность здания. Расчеты показали, что для среднесжимаемых грунтов ленточный фундамент можно спроектировать для 5 этажей, а для малосжимаемых грунтов – для 6-этажного здания.

Конечно-элементная модель 6-этажного здания показана на рис. 8.

Для сильно сжимаемых грунтов выполнен расчет фундаментной плиты толщиной 0,6 м. Нагрузки на плиту представлены на рис. 9. Характеристики фундаментной плиты приведены в табл. 5.

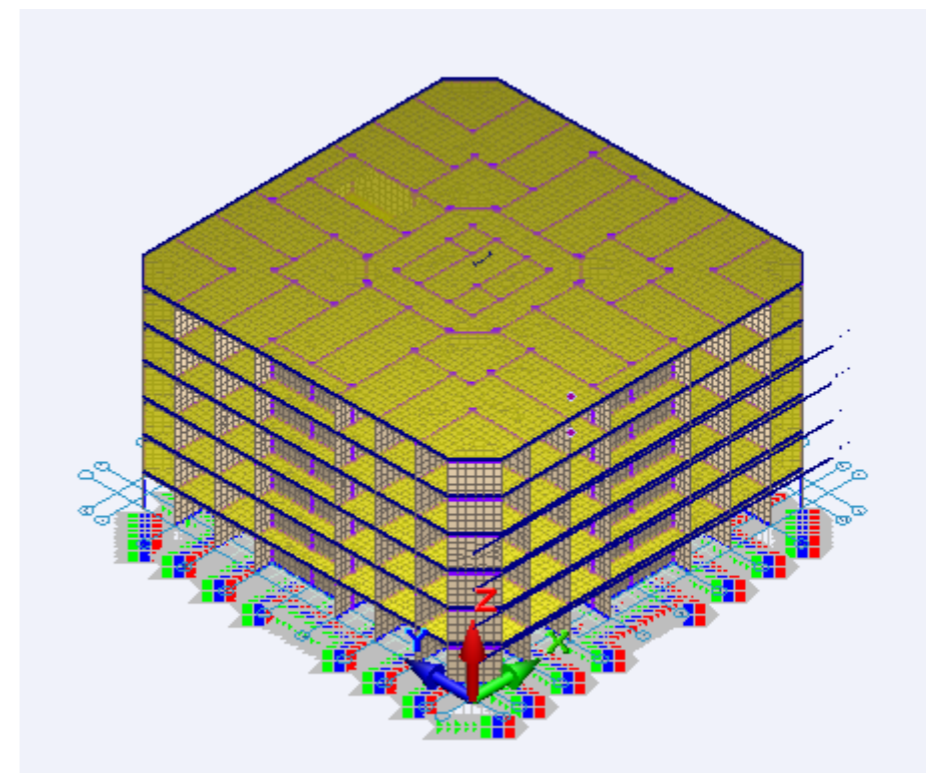


Рис. 8. Конечно-элементная модель для 6 этажей

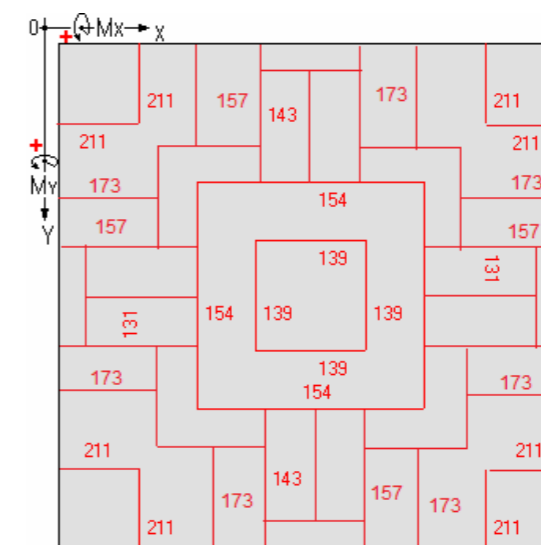


Рис. 9. Нагрузка на фундаментную плиту

Приведенные суммарные нагрузки по подпрограмме на плиту: $N = 349613,5$ кН; $M_x = 12993,5$ кН·м; $M_y = 12993,5$ кН·м.

Характеристики фундаментов для второй конструктивной системы здания

Наименование показателей	Геологические условия		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Кол-во этажей	5	6	6
Ширина подошвы ленточного фундамента, м	3,2 м	3,2 м	Фундаментная плита Толщиной 0,6 м
Бетон В20, куб.м /м	1,32	1,3	Бетон В20
Осадка, максим., см	11,8 (<12 см, [2])	7,38 (<12 см, [2])	Осадка 6,55 см
Разность осадок	0,0015	0,016	0,0009
Нижняя граница сжимаемой толщи, м	9,3	9,6	5,2

Здание каркасной конструктивной системы

Характеристики столбчатых фундаментов здания каркасной конструктивной системы

Наименование показателей	Инженерно-геологические условия		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Глубина заложения фундамента, м	1,35	1,35	1,35
Размеры подошвы, м	1,5×1,5	1,5×1,5	2,1×2,7
Расход бетона класса В20, куб. м	2,12	2,12	3,04
Расход арматуры, т, на один фундамент	0,076	0,069	0,089
Максимальная осадка, см	8,93 (<10 см, [2])	1,19 (<10 см)	5,79 см (<10 см)
Относительная разность осадок	0,0005 (<0,002, [2])	0,0005 (<0,002, [2])	0,0008 (<0,002, [2])

Результаты и обсуждение

1. Зависимость осадок основания от нагрузки

Свойства несущего слоя грунта оказывают значительное влияние на осадку фундаментов при равной величине нагрузки. На рис. 10 для зданий перекрестно-стеновой конструктивной системы показано значительное увеличение осадок при росте нагрузок.

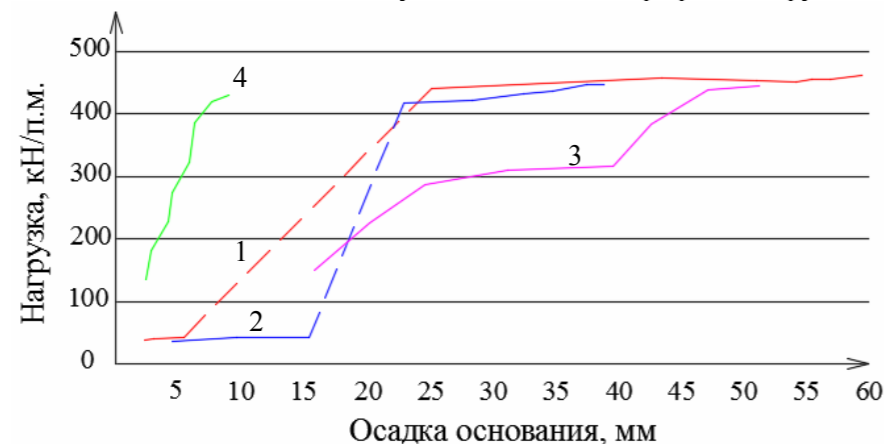


Рис. 10. Зависимость осадок основания от нагрузки:

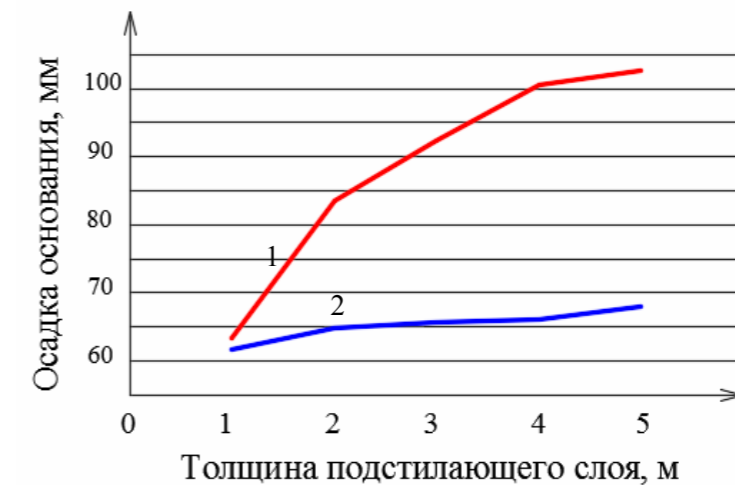
1 – для здания перекрестной конструктивной системы (1-й вариант), среднесжимаемые грунты;
2 – для здания перекрестной конструктивной системы (1-й вариант), малосжимаемые грунты;
3 – для здания перекрестной конструктивной системы (2-й вариант), среднесжимаемые грунты;
4 – для здания перекрестной конструктивной системы (2-й вариант), малосжимаемые грунты

При одинаковой величине нагрузки осадка основания в малосжимаемых грунтах меньше осадки среднесжимаемых грунтов в 1,6–2,52 раза.

Увеличение нагрузки на столбчатые фундаменты на изменение осадки основания оказывает аналогичное влияние.

2. Влияние толщины слабого подстилающего слоя на осадку основания столбчатого фундамента

Подстилающим слоем является слой суглинка с модулем деформации $E = 4$ МПа. Рассмотрены различные толщины подстилающего слоя. Характер зависимостей представлен на рис. 11 для здания каркасной конструктивной системы. Данные получены для фундаментов в осях «5-Б».

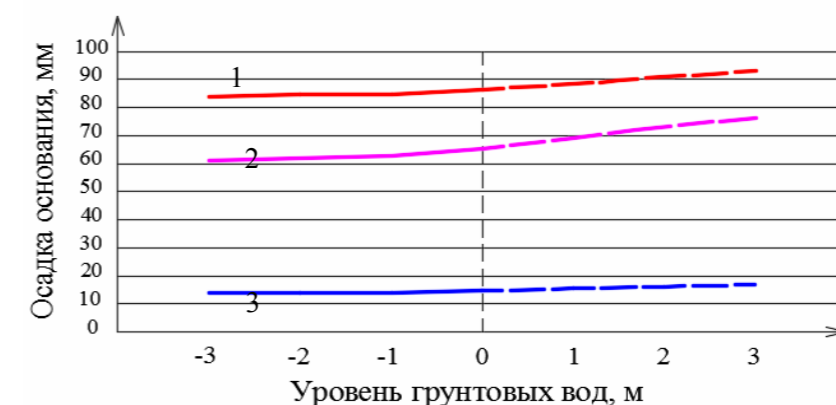
Рис. 11. Зависимость осадки основания от толщины подстилающего слоя:
1 – среднесжимаемые грунты; 2 – малосжимаемые грунты

При изменении толщины подстилающего слоя от 1 до 5 м осадка основания увеличилась: для среднесжимаемых грунтов – в 1,55 раза, а для сильно сжимаемых грунтов – в 1,165 раза.

3. Влияние расположения уровня грунтовых вод (УГВ) на осадку основания

В здании каркасной конструктивной системы в осях «5-Б» выполнен расчет осадки с изменением уровня грунтовых вод. Было исследовано расположение уровня грунтовых вод как ниже подошвы фундамента, так и выше. В табл. 7 приведены результаты расчетов. За нуль в подпрограмме принимается подошва фундамента; с положительным знаком уровень грунтовых вод вводится в программу, если он выше уровня подошвы фундамента, а с отрицательным знаком – если ниже.

Графики зависимости осадки основания от уровня грунтовых вод представлены на рис. 12.

Рис. 12. Зависимость осадки основания от уровня грунтовых вод:
1 – среднесжимаемые грунты; 2 – малосжимаемые грунты; 3 – сильно сжимаемые грунты

Т а б л и ц а 7

Влияние уровня грунтовых вод на осадку фундаментов

Вариант инженерно-геологических условий	Уменьшение осадки основания	Увеличение осадки основания
	Ниже подошвы фундамента на 3 м	Выше подошвы фундамента на 2 м
Среднесжимаемые	1,028	1,0375
Малосжимаемые	1,0428	1,045
Сильно сжимаемые	1,078	1,097

Наибольшее влияние на осадку основания оказывает расположение уровня грунтовых вод в сильно сжимаемых грунтах.

4. Расход арматуры

Т а б л и ц а 8

Расход арматуры, кг, на 1 куб. м бетона

Инженерно-геологические условия	Перекрестно-стенная конструктивная система		Каркасная конструктивная система, столбчатые фундаменты
	Вариант 1	Вариант 2	
Среднесжимаемые	32 (ленточный) Кол-во этажей 3	43 (ленточный) Кол-во этажей 5	35,8
Малосжимаемые	30,1 (ленточный) Кол-во этажей 3	39,1 (ленточный) Кол-во этажей 6	32
Сильно сжимаемые	38,2 (фундаментная плита)	49,2 (фундаментная плита) Кол-во этажей 6	39,3

Выводы

Рассмотрены три варианта инженерно-геологических условий Республики Карелия, различающихся сжимаемостью грунтов. Преимущество при проектировании в сложных геологических условиях имеют малосжимаемые грунты.

1. Применение программных комплексов «САПФИР», «ЛИРА-САПР», «ФУНДАМЕНТ» позволяет выполнить вариантное проектирование фундаментов зданий различных конструктивных систем и подготовить исходные данные для технико-экономического сравнения вариантов.

2. При одинаковой величине нагрузки осадка малосжимаемых грунтов меньше осадки среднесжимаемых грунтов в 1,6–2,52 раза.

3. При изменении толщины подстилающего слоя от 1 до 5 м осадка основания увеличилась: для среднесжимаемых грунтов в 1,55 раза, а для малосжимаемых – в 1,165 раза.

4. Наибольшее влияние на увеличение осадки основания оказывает расположение уровня грунтовых вод в сильно сжимаемых грунтах. Расположение уровня грунтовых вод выше подошвы фундамента сопряжено с дополнительными расходами при устройстве фундаментов и искусственном понижении воды в котловане.

5. Вариантное проектирование фундаментов, выполняемое с помощью программных сред, должно учитывать экономические показатели.

Список литературы

1. Ледниковые отложения. – URL: [tnaant. ru>inzhenernaya-geologiya...otlozhenya.html](http://tnaant.ru/inzhenernaya-geologiya...otlozhenya.html).
2. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* / Минстрой России. – М., 2016. – 225 с.

References

1. Glacial deposits tnaant. – URL: ru>inzhenernaya-geologiya...otlozhenya.html
2. SP 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01-83* / Ministry of Construction of Russia. – M., 2016. – 225 p.

УДК 69.059.032

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

Нежданов Кирилл Константинович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»
Гарькин Игорь Николаевич,
доцент кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

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

Nezhdanov Kirill Konstantinovich,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Building constructions»
Garkin Igor Nikolaevich,
Associate Professor of the department
«Quality management and technology
of building production»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

ПОДКРАНОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ: РЕЛЬСОВЫЙ БЛОК ИЗ АРОЧНЫХ РЕЛЬСОВ

К.К. Нежданов, И.Н. Гарькин

Дается способ повышения выносливости и долговечности подкрановых конструкций за счет использования рельсового блока из арочных рельсов. Разработанный блок имеет ряд преимуществ перед стандартными крановыми рельсами (повышенный момент инерции, простота монтажа, ремонтпригодность).

Ключевые слова: подкрановые конструкции, рельсовый блок, арочные крановые рельсы, напряженное состояние, выносливость, надежность, долговечность

CRANE STRUCTURES: RAIL BLOCK FROM ARCH RAILS

К.К. Nezhdanov, I.N. Garkin

Method for increasing the endurance and durability of crane structures by using a rail block of arched rails is given. The developed block has several advantages over standard crane rails (increased moment of inertia, ease of installation, maintainability).

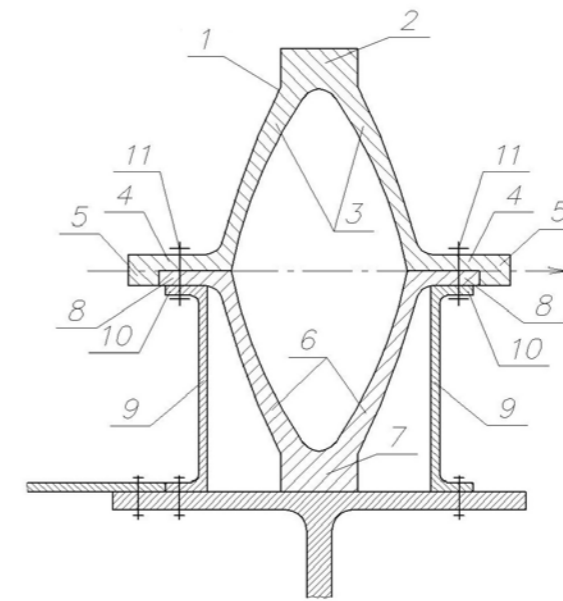
Keywords: crane structures, rail block, arched crane rails, stress, endurance, reliability, durability

Существующие подкрановые конструкции имеют значительно меньший срок службы, чем другие элементы стального каркаса промышленных зданий. В цехах с тяжёлым режимом работы мостовых кранов (7А, 8А) усталостные трещины возникают уже через 2...3 года интенсивной эксплуатации (по ОРД-0000089 минимальный срок службы подкрановых балок составляет 10 лет; [1]). В связи этим становится актуальной разработка устройств и методов для обеспечения выносливости подкрановых конструкций. Ниже предлагается один из таких методов – создание рельсовых блоков для подкрановых балок.

Рельсы и рельсовые блоки являются макрорегуляторами; наиболее сильно влияют на амплитуды колебаний локальных напряжений $\sum \sigma_y^{loc} = \sigma_y^{loc} + \sigma_{y_{кр}}^{loc}$ при действии подвижных сил от колёс мостовых кранов: вертикальных P^{loc} , действующих с эксцентриситетом, равным $e = 2$ см, и горизонтальных (было $T^{loc} = 0,1P^{loc}$, стало $T^{loc} = 0,2P^{loc}$) с эксцентриситетом, равным высоте рельса $h_{рел}$.

На рисунке показан четырёхглавый рельсовый блок в разрезе. Рельсовый блок монтируется из верхнего арочного трёхглавого рельса 1, обладающего естественной

амортизирующей способностью. Головка рельса 2 соединена аркой 3 с парой пят 4. На краях пят 4 имеются две боковые главы 5.



Рельсовый блок:

- 1 – верхний арочный рельс; 2 – головка верхнего рельса; 3 – арка верхнего рельса;
4 – опорная пята верхнего рельса; 5 – боковые головки рельсов; 6 – нижний арочный рельс;
7 – головка нижнего рельса; 8 – пята нижнего рельса; 9 – опорный швеллер;
10 – полка швеллера; 11 – фрикционные шпильки

На поточной линии изготавливают верхний трёхглавый арочный рельс 1 с главой 2 в замке арки и двумя главками 5 внизу на краях пят 4. Нижний арочный рельс 6 обращён главкой 7 вниз, а пятами 8 арки вверх.

На поточной линии пята верхнего рельса 1 и нижнего рельса 6 снабжают продольными рядами соосных совпадающих друг с другом отверстий с регулярным шагом в пятах 8.

Пара опорных швеллеров 9 такой же длины, как пара рельсов, образуют в полках 10 этих швеллеров 9 продольные ряды соосных совпадающих отверстий с таким же регулярным шагом, как в пятах 4 верхнего рельса и в пятах 8 нижнего 6 рельса.

Монтируют в четыре отверстия в пятах нижнего 6 арочного рельса четыре зуба-фиксатора, выступающих остриями вверх и вниз из пят, опускают сверху нижний 6 арочный рельс, совмещают четыре зуба-фиксатора с четырьмя совпадающими отверстиями в верхних полках пары опорных 9 швеллеров и безвыверочно монтируют нижний арочный рельс.

Затем опускают сверху верхний арочный рельс 1, совмещают верхние острия четырёх зубьев-фиксаторов с четырьмя совпадающими отверстиями в пятах нижнего арочного рельса 6 и безвыверочно монтируют его.

Вставляют в соосные отверстия винтовые высокоресурсные фрикционные шпильки 11, подкладывают шайбы, автоматизировано на поточной линии гайковёртом навёртывают гайки на винтовые шпильки. С гарантией затягивают гайки высокоресурсного фрикционного соединения и получают единый неделимый замкнутый рельсовый блок с овальной полостью внутри сечения, обладающий высоким моментом инерции кручения блока $J_{кр}^{блок}$, в 50,4 раза большим, чем у стандартного рельса (ГОСТ 4121-96 «Рельсы крановые. Технические условия»), а моментом инерции изгиба замкнутого рельсового блока $J_x^{блок}$, в 22,3 раза большим, и опирающийся на три опоры.

Пара арочных рельсов 1 и 6 объединена в единый неделимый полый рельсовый блок фрикционным соединением, исключаяющим сдвиги. К рельсовому блоку также

фрикционно с исключением сдвигов прикреплены полками два опорных швеллера 9. Опорные швеллеры являются дополнительными опорами рельсового блока.

Ось x проходит по зоне плотного контакта друг с другом пят 4 верхнего арочного рельса 1 и пят 8 нижнего арочного рельса 6. Ряды отверстий параллельны продольной оси рельсового блока. Фрикционные соединения выполнены винтовыми высокоресурсными шпильками 11 из стали «35Х2АФ Селект».

Рельсовый блок предназначен для монтажа на высокоресурсную подкрановую балку из прокатных двутавровых профилей [2]. Сдвиги в фрикционном соединении исключены.

Замкнутый рельсовый блок монтируют на верхний пояс высокоресурсной подкрановой балки соосно, с продольной осью верхнего пояса, то есть без эксцентриситета.

Опирают главу арочного элемента посередине верхнего пояса подкрановой балки, а нижние полки пары швеллеров симметрично относительно линии симметрии верхнего пояса и неподвижно присоединяют пару швеллеров рельсового блока к верхнему поясу балки высокоресурсным фрикционным соединением в единую неделимую подкрановую балку с высоким техническим ресурсом.

Осуществлялась конкретная реализация при формировании рельсового блока из пары арочных рельсов Ар Кр-140 с параметрами $A = \pi \cdot a \cdot b = \pi \cdot 32,2 \cdot 11 = 1112,7 \text{ см}^2$, $A_0 = \pi \cdot a_0 \cdot b_0 = \pi \cdot 30,7 \cdot 9,5 = 916,2 \text{ см}^2$;

$$J_{\text{кр}} = \frac{A^3}{a^2 + b^2} - \frac{A_0^3}{a_0^2 + b_0^2} = \frac{1112,7^3}{32,2^2 + 11^2} - \frac{916,2^3}{30,7^2 + 9,5^2} = 45107,27 \text{ см}^4 \quad (\text{достигнуто})$$

увеличение моментов инерции по сравнению со стандартным фигурным рельсом $J_{\text{кр}}^{\text{блок}}$ – более чем в 50 раз, $J_x^{\text{блок}}$ – более чем в 22 раза).

Выводы

1. Достигнуто увеличение моментов инерции замкнутого рельсового блока при кручении $J_{\text{кр}}^{\text{блок}}$ в 50,4 раза, при изгибе $J_x^{\text{блок}}$ в 22,3 раза, момента сопротивления рельсового блока – в 2 раза.

2. Происходит значительное снижение колебаний динамической, локальной составляющей напряжений в подрельсовой зоне стенки (исключается возникновение усталостных трещин).

3. Исключается возникновение эксцентриситета.

4. Обеспечивается замена изношенного рельса переворачиванием рельсового блока на 180° .

5. Возможна замена рельсового блока без остановки работы кранов.

6. Арочный рельсовый блок имеет естественную амортизирующую способность. Амортизация гасит динамику воздействий колёс кранов.

Список литературы

1. Нежданов, К.К. Способ проката двутаврового профиля сечения из низколегированной стали / К.К. Нежданов, И.Н. Гарькин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – № 4 (237). – С. 51–54.

2. Нежданов, К.К. Сборные подкрановые балки из прокатных профилей / К.К. Нежданов, А.С. Лаштанкин, И.Н. Гарькин // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2013. – №3. – С.69–75.

3. Сабуров, В.Ф. Использование моделей упругого основания для анализа распределения локальных напряжений в стенке стальных составных балок / В.Ф. Сабуров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2014. – № 4, Т. 14. – С. 15–20.

4. Гарькин, И.Н. Теоретические исследования составных неразрезных подкрановых балок / И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 2 (35). – С. 100–104.

5. Данилов, А.М. Управление безопасностью объектов повышенного риска / А.М. Данилов, О.А. Голованов, И.А. Гарькина, Э.В. Лапшин // Труды международного симпозиума «Надёжность и качество». – 2007. – Т.2. – С.109–112.

References

1. Nezhdanov, K.K. Method of rolling the I-beam section profile of low alloy steel / K.K. Nezhdanov, I.N. Garkin // Construction mechanics and structural analysis. – 2011. – No. 4 (237). – P. 51–54.

2. Nezhdanov, K.K. Prefabricated crane beams made of rolling profiles / K.K. Nezhdanov, A.S. Lashtankin, I.N. Garkin // Structural mechanics and structural analysis. – 2013. – №3. – P.69–75.

3. Saburov, V.F. Using elastic base models to analyze the distribution of local stresses in steel composite beams wall / V.F. Saburov // Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture. – 2014. – № 4, Vol. 14. – P. 15–20.

4. Garkin, I.N. Theoretical studies of composite continuous crane beams / I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 2 (35). – P. 100–104.

5. Danilov, A.M. Safety management of high-risk facilities / A.M. Danilov, O.A. Golovanov, I.A. Garkina, E.V. Lapshin // Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality». – 2007. – Vol.2. – P.109–112.

УДК 624.011.14

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

Герасимов Владимир Петрович,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Дизайн и художественное проектирование интерьера»
E-mail : am_dialog@inbox.ru

Валиахметов Руслан Миниярович,
директор компьютерного центра
архитектурного факультета
E-mail : am_dialog@inbox.ru

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

Gerasimov Vladimir Petrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the department « Interior design and artistic design »
E-mail: am_dialog@inbox.ru

Valiakhmetov Ruslan Miniyarovich,
Director of the Computer Center of the Faculty of Architecture
E-mail: am_dialog@inbox.ru

УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОСКОЙ ФОРМЫ ИЗГИБА ДЕРЕВЯННЫХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАСПОЛОЖЕНИЯ НАГРУЗКИ ПО ВЫСОТЕ СЕЧЕНИЯ

В.П. Герасимов, Р.М. Валиахметов

Приведены результаты испытаний моделей деревянных криволинейных элементов на устойчивость плоской формы изгиба с определением влияния высоты расположения нагрузки по высоте сечения. Дано описание экспериментальной установки. Выполнен анализ полученных теоретических и экспериментальных результатов. Подтверждена допустимость нормативного подхода и дана оценка влияния расположения нагрузки по высоте сечения.

Ключевые слова: деревянные конструкции, арки, устойчивость, плоская форма деформирования, испытания конструкций, критическая нагрузка

STABILITY FLAT FORM BEND OF WOODEN CURVOLINEAR ELEMENTS DEPENDING ON THE LOAD SITTING AT SECTION HEIGHT

V.P. Gerasimov, R.M. Valiakhmetov

The results of tests of models of wooden curvilinear elements on the stability of a flat bending form with the determination of the effect of the height of the load on the section height are presented. The description of the experimental setup. The analysis of the obtained theoretical and experimental results is made. The validity of the regulatory approach is confirmed and the influence of the load location on the section height is evaluated.

Keywords: wooden structures, arches, stability, flat form of deformation, structural testing, critical load

В рамках общей программы испытаний моделей гибких деревянных арок [1] были выполнены опыты с криволинейными элементами в форме балок с выпуклостью вверх, работающими в условиях «чистого изгиба», с приложением нагрузки по верхней и по нижней граням прямоугольного сечения.

Общая теория устойчивости деревянных элементов, заложенная в нормах проектирования, была сформулирована в 1975–1990 гг. [2, 3].

Известны основные факторы, влияющие на критическое состояние арок: количество и расположение креплений элементов «из плоскости», анизотропия древесины, кривизна элементов, отношение размеров сечения. Влияние расположения нагрузки по

высоте сечения *не учтено* в нормативной методике. Для исследования влияния этого фактора и для проверки действующей нормативной методики поставлены следующие задачи.

1. Экспериментальная оценка влияния расположения нагрузки по высоте сечения на величину критической нагрузки (нагрузка приложена по верху или по низу элемента).

2. Экспериментальная проверка нормативной методики расчета при чистом изгибе криволинейного элемента, при закреплении «из плоскости» и сжатой и растянутой кромок в одних сечениях.

Задача устойчивости криволинейных элементов в условиях чистого изгиба имеет известное аналитическое решение (С.П. Тимошенко, А.Н. Динник). Зависимость критического усилия от расположения нагрузки по высоте сечения рассмотрена в монографии А.С. Вольмира (1967 г.). Принятая в наших экспериментах расчетная схема с образованием зоны чистого изгиба объясняется удобством сравнения аналитических решений с экспериментальными данными.

Испытания элементов были выполнены на специально изготовленной рычажной установке с соотношением плеч 1:5. Нагрузка приложена вертикально, с образованием зоны чистого изгиба. Гибкий подвес рычагов (на тросах) не стеснял деформации арки, в результате чего нагрузка «следовала» за горизонтальными и вертикальными перемещениями сечения элемента, оставаясь вертикально приложенной (в этом смысле, *условно*, – «следящая» нагрузка).

Нагрузка была приложена только к верхней или только к нижней точке сечения (рис. 1).

Выполнено четыре испытания с двумя элементами, отличающимися шириной поперечного сечения (17 и 20 мм) и схемами приложения нагрузки (сверху или снизу). Высота сечения 99 мм. Начальный пролет – 3320 мм. Стрела подъема – 618 мм. Раскрепление элементов «из плоскости» – в двух промежуточных сечениях по всей высоте сечения (рис. 2).

Принятые параметры моделей обеспечивали геометрическое подобие натурным конструкциям и фиксацию момента потери устойчивости при его работе в упругой области.

Предельное состояние всех испытанных элементов наступало вследствие потери ими устойчивого положения в изгибно-крутильной форме, в упругой стадии при уровне нормальных напряжений 15–20 МПа (рис. 3).

За критическую принимали нагрузку, незначительное увеличение которой приводило к визуально заметному росту перемещений. Во всех опытах момент бифуркации достаточно четко был зафиксирован.

В закритической стадии элементы получали большие горизонтальные и вертикальные перемещения и упирались в конструкции раскрепления, не имея разрушения по материалу, при уровне максимальных напряжений порядка 30 МПа. Вертикальные перемещения достигали 5–6 см ($L/55$). Горизонтальные перемещения при расположении нагрузки внизу были в 1,5–2 раза ниже, чем при расположении нагрузки вверху (ожидаемый эффект снижения кручения при расположении нагрузки внизу) (рис. 4).

Определение критической нагрузки по нормативной методике выполнено на основе известных выражений

$$M_{кр} = \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_y GI_k} = 0,117 \cdot \frac{b^3 Eh}{L}$$

для деревянной ($EI_y \approx 5GI_k$) изгибаемой полосы прямоугольного сечения, заложенных в основу нормативной методики, при подстановке «экспериментального» кратковременного модуля упругости, полученного в зависимости от прогиба элемента в собственной плоскости и зависимостей изгибающего момента от нагрузки P (см. таблицу).



Рис. 1. Общий вид испытания (нагрузка приложена сверху и снизу)

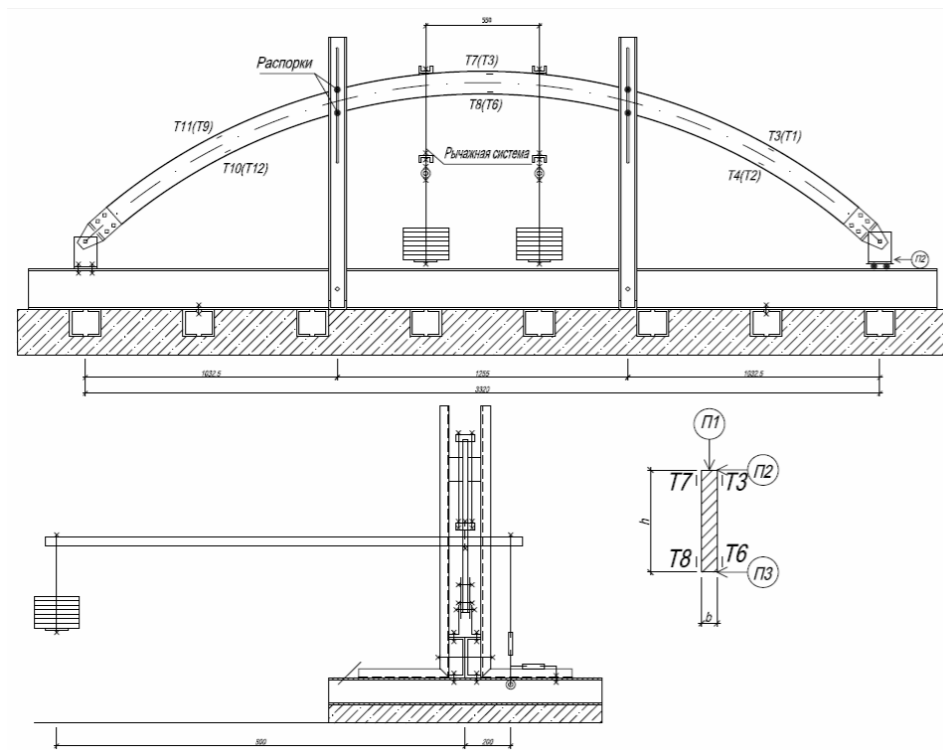


Рис. 2. Схема испытания

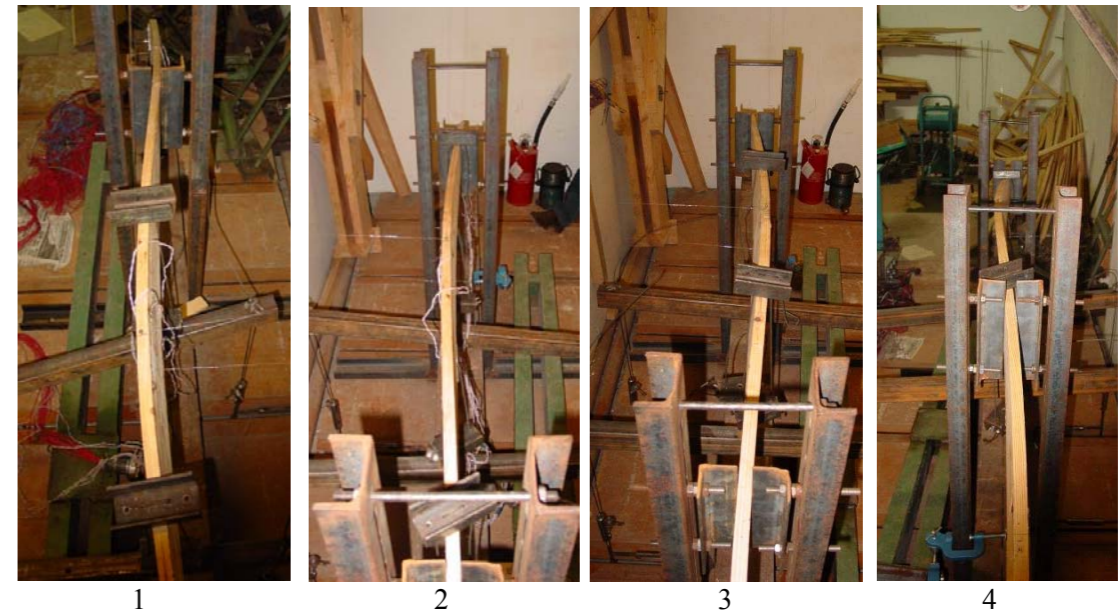


Рис. 3. Общие виды потери устойчивости элемента:
1–2: $t = 17$, нагрузка сверху и снизу; 3–4: $t = 20$, нагрузка сверху и снизу

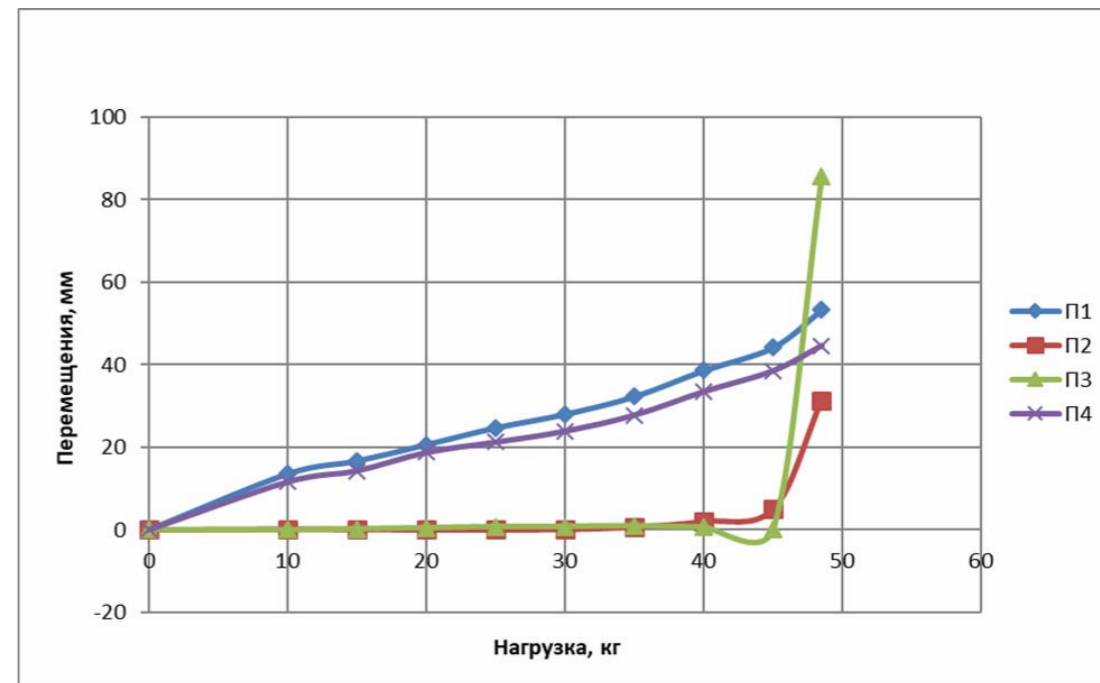


Рис. 4. Зависимости перемещений от нагрузки в элементе №1
(P2, P3 – горизонтальные поперечные перемещения)

Анализ результатов испытаний показал, что отклонения экспериментальных значений критической нагрузки от теоретических сравнительно невелики (5–20 %); при этом расчет по нормативной методике дает запас по несущей способности.

№	Сечение, мм	Способ приложения нагрузки	Перемещение вертикальное при нагрузке ниже критической, мм		Перемещение горизонтальное при нагрузке выше критической, мм		$E = \frac{PL^3(3\varepsilon - 4\varepsilon^3)}{2f_1bh^3} \times 0,954$ $\frac{17342,2 \cdot P}{f_1 \cdot b}$, кг/см ²	Теоретическая $P_{кр} = \frac{Ehb^3}{8,55aL_{ef}}$	Экспериментальная
			$P_{догр}$	f_1	$P_{закр}$	Верх f_2 Низ f_3			
1	17×99	сверху	40	38,6	45	5,04 0,18	105713	34,4	40
2	17×99	снизу	40	35,6	50	2,94 3,77	114621	37,3	45
3	20×99	сверху	40	32,3	65	22,1 18,53	107382	56,8	60
4	20×99	снизу	40	28,0	65	22,5 11,4	123873	65,5	65

$a=1395$ мм, $L_{ef}=1255$ мм, $\varepsilon = a/L$, 0,954 – учет влияния поперечной силы (2,5 %) и кривизны (2,1 %, расчет SCAD в линейной постановке)

Выводы

1. Положение нагрузки по высоте сечения конструкции влияет на ее критическое состояние. Приложение нагрузки по верхней грани сечения снижает критическую нагрузку и повышает составляющую кручения в закритической стадии. Разница в значениях критических нагрузок при расположении нагрузки по верху или по низу элемента в экспериментах составляет 8–12 %. Известные аналитические решения при данных параметрах дают разницу порядка 20–25 %. Рассмотренный эффект не отражен в нормах проектирования.

2. Погрешность экспериментальных данных по отношению к данным, полученным по нормативной методике расчета, составляет 5–20 % в запас устойчивости, что подтверждает обоснованность ее применения.

3. Увеличение ширины сечения с 17 мм до 20 мм приводит к увеличению критической нагрузки в кубической зависимости, что соответствует классическим аналитическим зависимостям и нормативной методике.

Список литературы

1. Герасимов, В.П. Экспериментальное исследование деревянных двухшарнирных арок кругового очертания на устойчивость плоской формы деформирования / В.П. Герасимов, Р.М. Валиахметов // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: сборник статей международной научно-технической конференции. – Пенза, 2003. – С.208–211.

2. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80.

3. Проектирование деревянных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. – 215 с.

References

1. Gerasimov, V.P. Experimental study of wooden double-hinged arches of a circular outline on the stability of a flat form of deformation / V.P. Gerasimov, R.M. Valiakhmetov // Effective building structures: theory and practice: collection of articles of the international scientific and technical conference. – Penza, 2003. – P.208–211.

2. SP 64.13330.2011. Wooden structures. Updated version of SNiP II-25-80.

3. Design of wooden structures. – M.: Stroizdat, 1986. – 215 с.

УДК 624.1

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

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

Викторов Валерий Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
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

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

Viktorov Valery Vasilievich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Building structures»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВНЕЦЕНТРЕННО НАГРУЖЕННЫХ СТОЛБЧАТЫХ ФУНДАМЕНТОВ С ЧАСТИЧНЫМ ОТРЫВОМ ПОДОШВЫ

О.Л. Викторова, В. В. Викторов

В практике проектирования каркасных зданий встречаются случаи действия на фундамент кривой внецентренной нагрузки. Приводится методика определения максимального давления под подошвой столбчатого фундамента нагруженного с эксцентриситетом в двух направлениях, в результате действия которых возникает частичный отрыв подошвы. Показано, что величина давления на основание здания зависит от величины вертикальной силы, изгибающих моментов и геометрии фундаментов. Приведен пример расчета внецентренно нагруженного столбчатого фундамента.

Ключевые слова: каркасные здания, фундамент, внецентренно нагруженный фундамент, расчет, методика

METHODS OF CALCULATION OF OFF-CENTER LOADED COLUMNAR FOUNDATIONS WITH PARTIAL SEPARATION OF SOLE

O.L. Viktorova, V.V. Viktorov

In the practice of designing frame buildings there are cases of oblique off-center load action on the foundation. The method of determining the maximum pressure under the sole of the columnar foundation loaded with eccentricity in two directions, as a result of which there is a partial separation of the sole is given. It is shown that the pressure on the base of the building depends on the value of the vertical force, bending moments and geometry of the foundations. An example of calculation of an off-center loaded columnar foundation is given.

Keywords: frame buildings, foundation, off-center loaded foundation, calculation, methods

Конструкции фундаментов каркасных зданий подвержены действию вертикальной нагрузки с эксцентриситетом ее приложения. Эксцентриситет образуется в конструкциях фундаментов от совместного действия продольной силы и изгибающих моментов. Момент возникает от действия горизонтальных сил или внецентренного приложения вертикальной нагрузки. Нагрузка, действующая с эксцентриситетом, приводит к неравномерному распределению нагрузки под подошвой фундамента, что может привести к частичному отрыву подошвы от основания здания.

В существующих нормах проектирования определение максимального давления под подошвой столбчатого фундамента при действии нагрузки с эксцентриситетом в двух направлениях и частичным отрывом подошвы не рассматривается. Хотя в практике проектирования легких одноэтажных зданий со стальным каркасом такая ситуация встречается весьма часто. Каркасы зданий проектируются в соответствии с нормативными требованиями [1] с минимально возможным расходом металла и имеют относительно небольшой вес. Высота здания при этом может быть значительной. При действии горизонтальных ветровых нагрузок на каркас на фундамент может передаваться большой изгибающий момент. В данной работе рассматривается методика расчета максимального давления на грунт внецентренно нагруженных фундаментов с частичным отрывом подошвы.

Размер подошвы внецентренно нагруженных фундаментов при проектировании зданий назначается в зависимости от действующей на фундамент нагрузки и свойств основания [2]. При этом среднее давление под подошвой фундамента не должно превышать расчетного сопротивления грунта основания. При расчете железобетонных столбчатых фундаментов допускается не учитывать их гибкость и считать, что напряжения под подошвой центрально нагруженных фундаментов распределяются равномерно, а напряжения внецентренно нагруженных фундаментов распределяются по линейному закону.

Для центрально нагруженных фундаментов средние напряжения σ в основании определяются по отношению вертикальной нагрузки N в уровне низа фундамента, включающей в себя нагрузку от вышележащих конструкций, вес фундамента и грунта на его обрезах, к площади подошвы фундамента A .

Для внецентренно нагруженных фундаментов максимальные (минимальные) напряжения в основании определяются по формуле

$$\sigma_{\max/\min} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W},$$

где M – изгибающий момент в уровне низа фундамента; A – площадь подошвы фундамента; W – момент сопротивления подошвы фундамента.

Для внецентренно нагруженных фундаментов, имеющих эксцентриситет в двух направлениях (вдоль осей « X » и « Y »), угловые напряжения в основании вычисляются по формуле

$$\sigma_{\max/\min} = \frac{N}{A} \pm \frac{M_x}{W_x} \pm \frac{M_y}{W_y},$$

где M_x и M_y – изгибающие моменты в уровне низа фундамента вокруг соответствующих осей; W_x и W_y – моменты сопротивления подошвы фундамента вокруг соответствующих осей.

Характер формул для определения напряжения в основании под подошвой фундамента предполагает возможность возникновения отрицательных значений, которые соответствуют возникновению растягивающих напряжений. Однако растягивающие напряжения в основании в зоне контакта его с фундаментом возникнуть не могут. Грунт и зона контакта грунта с фундаментом воспринимать растягивающие напряжения не способны. В случае возникновения растягивающих напряжений в указанной зоне произойдет отрыв фундамента от основания. Поэтому приведенные формулы для внецентренно нагруженных фундаментов справедливы только в том случае, если минимальное давление под подошвой больше нуля и фундамент оказывает давление на основание всей площадью подошвы.

При больших значениях изгибающих моментов возможно возникновение частичного отрыва подошвы фундамента от основания, давление на основание будет оказываться только частью подошвы фундамента. В этом случае приведенные выше формулы будут некорректны.

Для фундаментов, имеющих эксцентриситет вертикальной нагрузки в одном направлении, отрыв подошвы начнет происходить при эксцентриситете нагрузки e , равном $1/6$ от длины фундамента $e = l/6$, или при относительном эксцентриситете $\varepsilon = e/l = 1/6$. Здесь l – длина подошвы фундамента в направлении действия эксцентриситета нагрузки.

Существующие нормы проектирования оснований и фундаментов [2] в некоторых случаях допускают возникновение отрыва под подошвой фундаментов, ограничивая относительный эксцентриситет нагрузки величиной, равной $\varepsilon = e/l = 1/4$.

При относительном эксцентриситете $\varepsilon > 1/6$ максимальное давление на основание вычисляется по иной формуле, отличной от приведенных выше:

$$\sigma_{\max} = \frac{2 \cdot N}{3 \cdot b \cdot (l/2 - e)}.$$

Данная формула предполагает распределение давления на основания только по части подошвы фундамента и треугольный характер эпюры давления. Размеры участка фундамента, передающего давление, принимаются таким образом, чтобы ось равнодействующей от внешней нагрузки проходила через центр тяжести эпюры давления. Максимальные значения напряжений принимаются таким образом, чтобы объем эпюры давления численно был равен величине продольной силы, действующей на фундамент:

$$\sigma_{\max} = \frac{4}{3} \cdot \frac{N}{(12 \cdot \varepsilon) \cdot l \cdot b}.$$

Для фундаментов, имеющих эксцентриситет нагрузки в двух направлениях, отрыв подошвы начнет происходить при сумме относительных эксцентриситетов нагрузки, равной $1/6$:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y = e_x/l + e_y/b = 1/6.$$

Для определения максимального давления под подошвой внецентренно нагруженных фундаментов предлагается следующая расчетная модель. Напряжения под подошвой фундаментов распределяются по линейному закону. Ось равнодействующей от нагрузки проходит через центр тяжести объема эпюры напряжений.

Объем эпюры напряжений под подошвой фундамента численно равен вертикальной нагрузке, действующей в уровне подошвы фундамента.

При эксцентричной нагрузке с эксцентриситетом в двух направлениях и возможным отрывом фундамента возможны три случая расчета – сжатая зона фундамента в виде треугольника, сжатая зона фундамента в виде трапеции, сжатая зона фундамента в виде пятиугольника. Возможные варианты распределения давления в зависимости от эксцентриситета приложения нагрузки представлены на рис. 1.

В настоящей работе рассмотрен вариант трапециoidalного распределения давления под подошвой фундамента. Схема распределения давления для этого случая представлена на рис. 2.

При сжатой зоне в виде трапеции растянутая зона также представляет собой четырехугольник. Эпюра давления под подошвой фундамента представляет собой усеченную пирамиду. Пирамида имеет треугольное основание ASC_1 .

Объем усеченной пирамиды вычисляется по формуле

$$V = \frac{h}{3} \cdot (f_2 + f_1 + \sqrt{f_2 \cdot f_1}),$$

где f_1 и f_2 – площади верхнего и нижнего оснований пирамиды; h – высота пирамиды.

Центр тяжести усеченной пирамиды расположен на линии, соединяющей центры тяжести оснований, и на высоте, вычисляемой как

$$y_0 = \frac{h}{4} \cdot \frac{f_2 + 2 \cdot \sqrt{f_2 \cdot f_1} + 3 \cdot f_1}{f_2 + \sqrt{f_2 \cdot f_1} + f_1}.$$

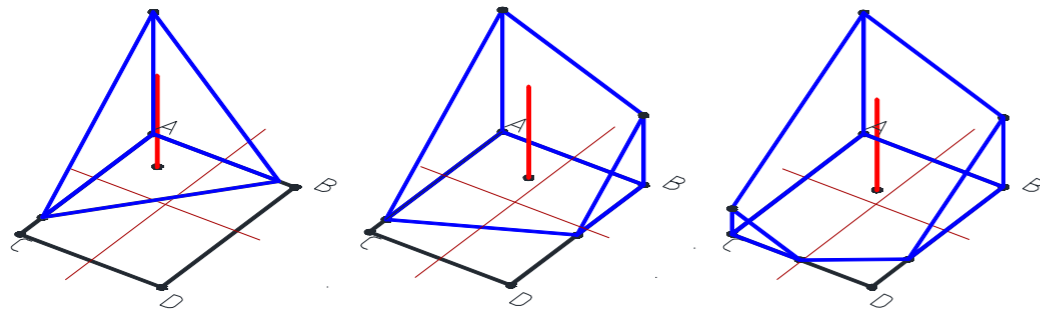


Рис. 1. Варианты распределения давления на основание при частичном отрыве подошвы фундамента

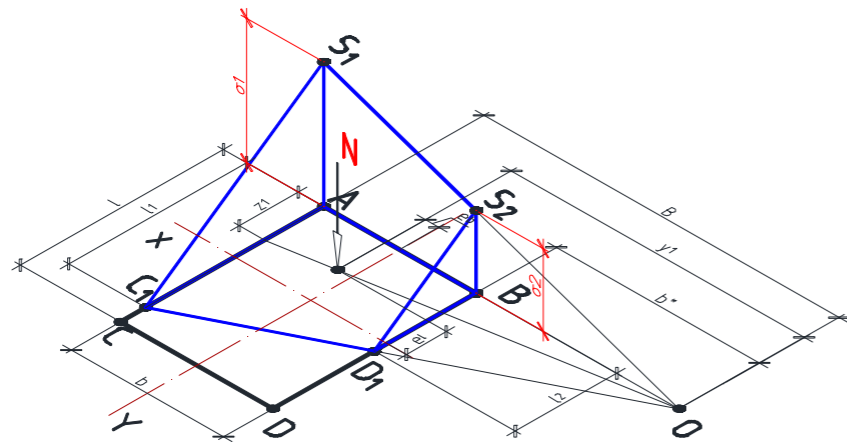


Рис. 2. Схема распределения давления на основание при зоне контакта фундамента с грунтом в форме трапеции

Площадь нижнего основания пирамиды численно равна половине произведения максимального углового напряжения σ_1 под подошвой на длину сжатой части подошвы l_1 .

Площадь верхнего основания пирамиды численно равна половине произведения углового напряжения σ_2 под подошвой на длину сжатой части подошвы l_2 .

Поскольку усеченная пирамида ACS_1BDS_2 является частью полной пирамиды ACS_1O (см. рис. 2), соотношение сторон верхнего и нижнего оснований будут равны между собой. Обозначим это соотношение буквой α .

$$\alpha = \sigma_1 / \sigma_2 = l_1 / l_2.$$

Соотношение площадей верхнего и нижнего оснований будет равно

$$\alpha^2 = f_1 / f_2 \text{ или } f_1 = \alpha^2 \cdot f_2.$$

Высота рассматриваемой усеченной пирамиды h будет равна ширине фундамента b .

Ось равнодействующей вертикальной нагрузки N будет проходить через центр тяжести рассматриваемой усеченной пирамиды. Расстояние от основания пирамиды до проекции ее центра тяжести на основание фундамента будет равно

$$y_0 = \frac{b}{2} - e_b,$$

где b – ширина фундамента; e_b – эксцентриситет действия нагрузки в направлении оси X .

Тогда формула для вычисления положения центра тяжести пирамиды примет следующий вид:

$$\frac{b}{2} - e_b = \frac{b}{4} \cdot \frac{f_2 + 2 \cdot \sqrt{f_2 \cdot \alpha^2 \cdot f_2} + 3 \cdot \alpha^2 \cdot f_2}{f_2 + \sqrt{f_2 \cdot \alpha^2 \cdot f_2} + \alpha^2 \cdot f_2} = \frac{b}{4} \cdot \frac{1 + 2 \cdot \alpha + 3 \cdot \alpha^2}{1 + \alpha + \alpha^2}.$$

Если вместо эксцентриситета действия нагрузки подставить относительный эксцентриситет $\varepsilon_b = \frac{e_b}{b}$, то формулу можно привести к следующему виду:

$$2 - 4 \cdot \varepsilon_b = \frac{1 + 2 \cdot \alpha + 3 \cdot \alpha^2}{1 + \alpha + \alpha^2},$$

а с дальнейшими преобразованиями к квадратному уравнению

$$(1 - 4 \cdot \varepsilon_b) - (4 \cdot \varepsilon_b) \cdot \alpha - (1 + 4 \cdot \varepsilon_b) \cdot \alpha^2 = 0;$$

$$(1 + 4 \cdot \varepsilon_b) \cdot \alpha^2 + (4 \cdot \varepsilon_b) \cdot \alpha - (1 - 4 \cdot \varepsilon_b) = 0.$$

Решение квадратного уравнения будет иметь следующий вид:

$$\alpha = \frac{\sqrt{1 - 12 \cdot \varepsilon_b^2} - 2 \cdot \varepsilon_b}{1 + 4 \cdot \varepsilon_b}.$$

Таким образом, можно сделать вывод о том, что соотношение сторон оснований усеченной пирамиды, представляющей эпюру распределения давлений, не зависит от величины нагрузки, а зависит только от величины относительного эксцентриситета нагрузки в направлении ширины фундамента.

Длину сжатой части подошвы фундамента l_1 можно вычислить, исходя из того, что центр тяжести усеченной пирамиды лежит на линии, соединяющей центры тяжести ее оснований.

Эти длины могут быть вычислены как

$$l_1 = 3 \cdot z_1 = 3 \cdot \left(\frac{l}{2} - e_l \right) \cdot \frac{B}{y_1};$$

$$l_2 = \alpha \cdot l_1$$

Расстояния B и y_1 в приведенных выражениях определяются как

$$B = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot b;$$

$$y_1 = b^* + b/2 + e_b;$$

$$b^* = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot b.$$

Максимальные напряжения под подошвой могут быть вычислены исходя из равенства объема эпюры давлений вертикальной продольной силе.

$$N = V = \frac{h}{3} \cdot (f_2 + f_1 + \sqrt{f_2 \cdot f_1}).$$

Выполнив подстановку геометрических параметров рассматриваемой пирамиды в соответствии с рис. 2

$$h = b; f_2 = \alpha \cdot f_1 \text{ и } f_1 = \sigma_1 \cdot l_1 / 2,$$

получим формулу для расчета вертикальной продольной силы с учетом величины α , учитывающей соотношение сторон верхнего и нижнего оснований усеченной пирамиды:

$$N = V = \frac{h}{3} \cdot f_2 \cdot (1 + \alpha + \alpha^2) = b \cdot \sigma_1 \cdot l_1 \cdot (1 + \alpha + \alpha^2) / 6.$$

Из полученной формулы можно определить величины угловых напряжений эпюры давлений:

$$\sigma_1 = 6 \cdot N / b \cdot l_1 \cdot (1 + \alpha + \alpha^2);$$

$$\sigma_2 = \alpha \cdot \sigma_1.$$

Полученные значения давлений не должны превышать расчетного сопротивления грунта для угловых точек фундамента, равного $1,4 \cdot R$, где R – расчетное сопротивление грунта, вычисляемое в соответствии с требованиями норм [2].

Вычисленные длины сжатой части подошвы фундамента l_1 и l_2 позволяют определять площадь сжатой части подошвы фундамента, которая должна в соответствии с нормативными требованиями [2] составлять не менее 75 % всей площади фундамента.

В отрывающейся части подошвы фундамента возникает момент обратного знака, который зависит от размеров этой части и веса грунта на его обрезах. Вычисленные размеры отрывающейся части подошвы фундамента дают возможность оценить вес грунта на обрезах фундамента сжатой и отрывающейся частей, определить изгибающие моменты в плите фундамента и выполнить его конструирование в соответствии с нормативными требованиями [3].

Таким образом, используя разработанную методику, можно выполнять расчет и конструирование внецентренно нагруженных фундамента с учетом возможности частичного отрыва подошвы.

В качестве примера можно привести расчет фундамента склада упаковки, входящего в состав завода по убою и переработке индейки мощностью 155 тыс. тонн в год, расположенного в городе Нижний Ломов, Нижнеломовского района, Пензенской области. Здание имеет два пролета по 24,0 м и высоту до низа несущих конструкций 9,60 м.

В результате статического расчета каркаса получены следующие значения нагрузок на уровне обреза на фундамент:

продольная сила $N = 107,0$ кН;

изгибающий момент в плоскости рамы $M_x = 170,9$ кН·м;

изгибающий момент из плоскости рамы $M_y = 0,0$ кН·м;

поперечная сила в плоскости рамы $Q_y = 27,9$ кН;

поперечная сила из плоскости рамы $Q_x = 6,0$ кН.

В случае применения фундамента с габаритами

– длина $l = 2,70$ м,

– ширина $b = 2,10$ м,

– высота $h = 1,80$ м

подошва фундамента будет иметь следующие характеристики:

площадь $A = 5,670$ кв.м;

момент сопротивления в плоскости рамы $W_x = 2,552$ кв.м;

момент сопротивления из плоскости рамы $W_y = 1,985$ кв.м.

При средней плотности материала фундамента и грунта на его обрезах $\gamma_{гр} = 20,0$ кН/м³ нагрузки на фундамент в уровне подошвы составят:

продольная сила $N = 311,12$ кН;

изгибающий момент в плоскости рамы $M_x = 221,12$ кН·м;

изгибающий момент из плоскости рамы $M_y = 10,80$ кН·м.

В случае применения стандартной методики расчета среднее давление под подошвой фундамента от действия продольной силы составит

$$\sigma_N = N / A = 54,87 \text{ кПа.}$$

Максимальное давление под подошвой фундамента от действия изгибающих моментов составит

$$\sigma_{Mx} = M_x / W_x = 86,65 \text{ кПа;}$$

$$\sigma_{My} = M_y / W_y = 5,44 \text{ кПа.}$$

Угловые давления под подошвой фундамента составят

$$\sigma_1 = N / A + M_x / W_x + M_y / W_u = 146,96 \text{ кПа;}$$

$$\sigma_2 = N / A + M_x / W_x - M_y / W_u = 136,08 \text{ кПа;}$$

$$\sigma_3 = N / A - M_x / W_x + M_y / W_u = -26,34 \text{ кПа;}$$

$$\sigma_4 = N / A - M_x / W_x - M_y / W_u = -37,22 \text{ кПа.}$$

В соответствии с полученными результатами имеется зона отрыва.

Длина зоны контакта фундамента с грунтом (участка, где $\sigma_i > 0$):

$$l_1 = 146,96 / (146,96 - (-26,34)) \cdot 2,700 = 2,290 \text{ м;}$$

$$l_2 = 136,08 / (136,08 - (-37,22)) \cdot 2,700 = 2,120 \text{ м.}$$

Площадь сжатой части подошвы фундамента

$$A_1 = b \cdot (l_1 + l_2) / 2 = 4,631 \text{ кв.м.}$$

Доля площади сжатой части подошвы фундамента:

$$A_1 / A = 4,631 / 5,670 = 0,817 > 0,75.$$

Доля площади сжатой части фундамента составляет больше 0,75, что соответствует требованиям норм [2].

В случае применения предлагаемой методики эксцентриситет нагрузки из плоскости рамы составит

$$e_b = M_y / N = 10,80 / 311,12 = 0,0347 \text{ м.}$$

Относительный эксцентриситет нагрузки из плоскости рамы:

$$\varepsilon_b = e_b / b = 0,0347 / 2,100 = 0,0167.$$

Эксцентриситет нагрузки в плоскости рамы:

$$e_l = M_x / N = 221,12 / 311,12 = 0,7107 \text{ м.}$$

Относительный эксцентриситет нагрузки в плоскости рамы:

$$\varepsilon_l = e_l / b = 0,711 / 2,70 = 0,263.$$

Коэффициент

$$\alpha = \frac{\sqrt{1 - 12 \cdot e_b^2} - 2 \cdot e_b}{1 + 4 \cdot e_b} = \frac{\sqrt{1 - 12 \cdot 0,0167^2} - 2 \cdot 0,0167}{1 + 4 \cdot 0,0167} = 0,905.$$

Геометрические параметры в соответствии с рис. 2:

$$B = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot b = \frac{1}{1 - 0,905} \cdot 2,100 = 22,105 \text{ м;}$$

$$b^* = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot b = \frac{0,905}{1 - 0,905} \cdot 2,100 = 20,005 \text{ м;}$$

$$y_1 = b^* + b/2 + e_b = 20,005 + 2,100 / 2 + 0,0167 = 21,072 \text{ м.}$$

Длина зоны контакта фундамента с грунтом (участка, где $\sigma_i > 0$) в соответствии с рис. 2:

$$l_1 = 3 \cdot \left(\frac{l}{2} - e_i \right) \cdot \frac{B}{y_1} = 3 \cdot \left(\frac{2,700}{2} - 0,7107 \right) \cdot \frac{22,105}{21,072} = 2,012 \text{ м};$$

$$l_2 = \alpha \cdot l_1 = 0,905 \cdot 2,012 = 1,821 \text{ м}.$$

Угловые давления под подошвой фундамента будут равны:

$$\sigma_1 = \frac{6 \cdot N}{b \cdot l_1 \cdot (1 + \alpha + \alpha_2)} = \frac{6 \cdot 311,12}{2,100 \cdot 2,012 \cdot (1 + 0,905 + 0,9052)} = 162,189 \text{ кПа};$$

$$\sigma_2 = \alpha \cdot \sigma_1 = 146,781 \text{ кПа};$$

$$\sigma_3 = 0 \text{ кПа};$$

$$\sigma_4 = 0 \text{ кПа}.$$

Площадь сжатой части подошвы фундамента составит

$$A_1 = b \cdot (l_1 + l_2) / 2 = 2,100 \cdot (2,012 + 1,821) / 2 = 4,025 \text{ кв.м}.$$

Доля площади сжатой части подошвы фундамента составит

$$A_1 / A = 4,025 / 5,670 = 0,710 < 0,75.$$

Доля площади сжатой части фундамента меньше 0,75, что не соответствует требованиям норм проектирования [2], поэтому размеры проектируемого фундамента должны быть увеличены.

Значения угловых напряжений под подошвой фундамента, полученные по предлагаемой методике, выше значений угловых напряжений, полученных по стандартной методике. Разность их значений в рассмотренном примере составит около 10 %.

$$\Delta\sigma_1 = 162,189 - 146,96 / 162,189 = 9,4 \%;$$

$$\Delta\sigma_2 = 146,781 - 136,08 / 146,781 = 7,3 \%.$$

Доля площади фундамента, имеющего контакт с грунтом основания, рассчитанная по предлагаемой методике, несколько ниже, чем при расчете по стандартной методике. Разность их значений в рассмотренном примере составит больше 15 %.

$$\Delta A = 0,817 - 0,710 / 0,710 = 15,1 \%.$$

Расчеты по примененной методике позволили сделать вывод о несоответствии предварительно заданных размеров подошвы фундамента требованиям норм [2].

Таким образом, представленная методика определения давления под подошвой фундамента позволяет получить достоверные сведения о характере распределения давлений под подошвой фундамента и может быть использована при расчетах оснований зданий и сооружений.

Выводы:

1. Характер распределения давлений под подошвой внецентренно нагруженного фундамента не зависит от величины вертикальной нагрузки, а зависит от величины эксцентриситета нагрузки в направлении ширины фундамента.
2. Показана возможность оценки величины максимальных сжимаемых напряжений и размера отрывающейся части подошвы фундамента.
3. Методика позволяет конструировать внецентренно нагруженные фундаменты каркасных зданий с учетом возможности частичного отрыва подошвы.

Список литературы

1. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81. – М.: ОАО ЦПП, 2017.
2. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83. – М.: Минстрой РФ, 2016.
3. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: ОАО ЦПП, 2013.

References

1. SP 16.13330.2017. Steel construction. Updated version of SNiP II-23-81. – M.: JSC BSC, 2017.
2. SP 22.13330.2016. Foundation of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01-83. – M.: Ministry of construction, 2016.
3. SP 63.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures. Fundamentals. Updated version of SNiP 52-01-2003. – M.: JSC CPP, 2013.

УДК 528.4:624.21(477.75)

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

Тюкленкова Елена Петровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Землеустройство
и геодезия»
E-mail: zig@pguas.ru

Мейнгард Станислав Игоревич,
студент
E-mail: meingard.stanislav@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

Tyuklenkova Elena Petrovna
Candidate of Sciences,
Associate Professor of the department «Land
Management and Geodesy»
E-mail: zig@pguas.ru

Meingard Stanislav Igorevich,
Student
E-mail: meingard.stanislav@yandex.ru

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КРЫМСКОГО МОСТА

Е.П. Тюкленкова, С.И. Мейнгард

Приведена методика выполнения геодезических работ с оценкой их точности по контролю геометрических параметров, а также планового и высотного положений строительных конструкций при производстве строительно-монтажных работ объекта «Крымский мост». Данная методика применялась авторами при личном выполнении работ; приведены графические материалы исполнения работ.

Ключевые слова: Крымский мост, строительство, геодезические работы, методика контроля, оценка точности, строительные конструкции, геометрические параметры

GEODETIC CONTROL OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF BUILDING STRUCTURES OF KRYMSKY BRIDGE

E.P. Tyuklenkova, S.I. Meyngard

Methods of geodetic work with assessment of their accuracy on control of geometrical parameters, and also planned and high-rise provision of building structures, in the process of construction and installation of Krymsky Bridge are given. The methods are used by the authors themselves. Graphic materials of work are given.

Keyword: Krymsky Bridge, construction, geodetic works, control technique, accuracy assessment, building constructions, geometrical parameters

Крымский мост – один из крупнейших мостов в России (протяженность 19 км).

Мосты через крупные акватории – одни из самых сложных в техническом отношении сооружений, поэтому при их строительстве важна особая точность на каждом этапе. Точность исполнения проекта обеспечивают геодезические работы – они представляют собой привязку проекта к местности. Для таких сложных объектов, как Крымский мост, разработан проект производства геодезических работ (ППГР), в котором подробно прописываются все этапы.

Главная задача системы геодезического контроля качества на этапе строительства при монтаже строительных конструкций транспортно-перехода через Керченский пролив – обеспечение гарантии надежности, долговечности и безопасности объекта капитального строительства в период эксплуатации. Высокое качество строительно-монтажных работ крайне важно, ведь от соблюдения проектных размеров и положений конструкций зависит распределение и действие возникающих нагрузок, что, в

свою очередь, влияет на эксплуатационные характеристики сооружения. Именно поэтому для высокоточного исполнения проекта необходимо сопровождение строительства геодезическими работами с поэтапным контролем качества.

При монтаже строительных конструкций геодезические работы направлены на обеспечение точности этого процесса, призваны сделать результат максимально приближенным к проекту. Измерения проводятся до и после сборки пролета, они выявляют даже незначительные погрешности.

При производстве геодезических работ использовались электронные тахеометры с точностью 0,5''–2'', электронные нивелиры с точностью 0,2–1,5 мм на 1 км двойного хода, а также GNSS-оборудование. Обработку измерений выполняли на компьютерах, используя стандартные программы, обеспечивающие уравнивание выполненных измерений.

Геодезические работы, выполняемые при сооружении пролетного строения (ПС), обеспечивают точность его сборки в соответствии с проектом. Измерениями, выполняемыми по окончании сборки, контролируют результаты сборки и отклонения от проекта.

Мост по конструкции состоит из пролетных строений, которые, в свою очередь, состоят из отдельных блоков, а те – из верхней и нижней частей, а также навесных консольных плит (рис. 1).

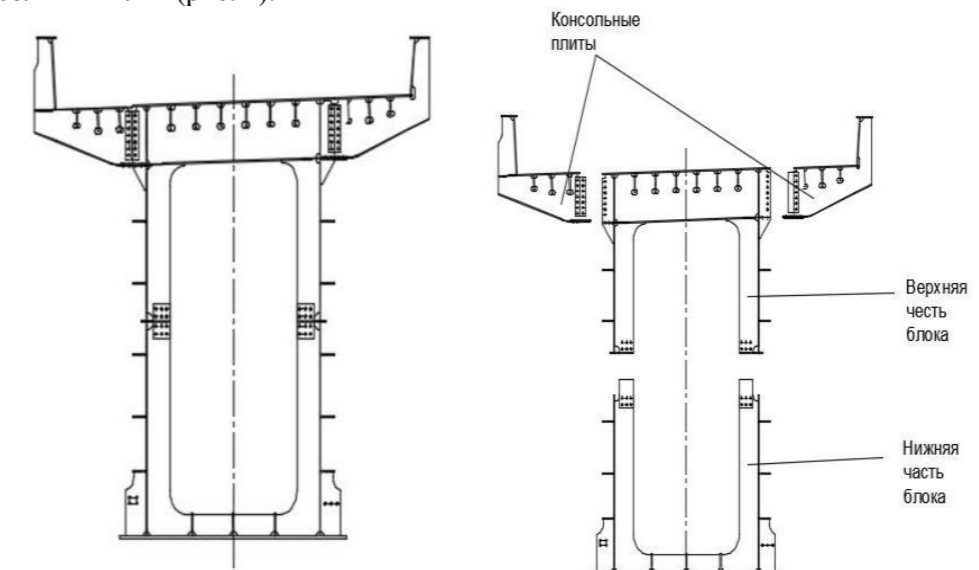


Рис. 1. Составляющие части блока ПС и блок ПС в сборе

Пролетные строения различаются по материалу (железобетонные, металлические, комбинированные); по конструкции (балочные, арочные, рамные и др.); по методу сборки (на подмостях, в навес, продольная или поперечная надвигки, доставка на плаву). Методы геодезических работ при сборке пролета и контроле результатов сборки зависят от перечисленных факторов.

Контроль за монтажом пролетного строения в плане заключается в проверке прямолинейности главных балок или коробчатых элементов пролета.

Основная задача геодезических работ – это многоуровневый контроль на всех этапах строительно-монтажных работ.

Основные этапы строительно-монтажных работ:

1. Выставление (перед сваркой) верхней и нижней частей короба блока ПС.
2. Контроль (после сварки) короба блока ПС.
3. Выставление консольных плит блока (перед сваркой).
4. Контроль и правка консольных плит (после сварки).
5. Выставление планово-высотного положения блока в статическую ветвь ПС (перед сваркой).
6. Контроль планово-высотного положения блока в статической ветви ПС.

На рис. 2 представлен процесс измерения основных геометрических размеров блока ПС.



Рис. 2. Определение геометрических размеров укрупняемого блока ПС

Контроль короба блока ПС происходит путем измерения геометрических параметров блока:

- 1) высот стенок короба. Их получают измерением длин линий t1-t4, t2-t3, допустимое отклонение от проектных размеров 5 мм, а собираемость при стыковке блоков 2 мм [1];
- 2) диагоналей. Их получают измерением длин линий t1-t3, t2-t4, допустимое отклонение 10 мм;
- 3) отклонения плиты нижнего пояса от горизонтального положения. Получают получением превышений отметок t1 и t2, допустимое отклонение 3 мм.

Выставление консольных плит блока ПС необходимо для обеспечения прямолинейности верхнего полотна ПС и создания поверхности для отведения стоковых вод. На рис. 3 показан процесс измерения отклонений консольных плит блока ПС.

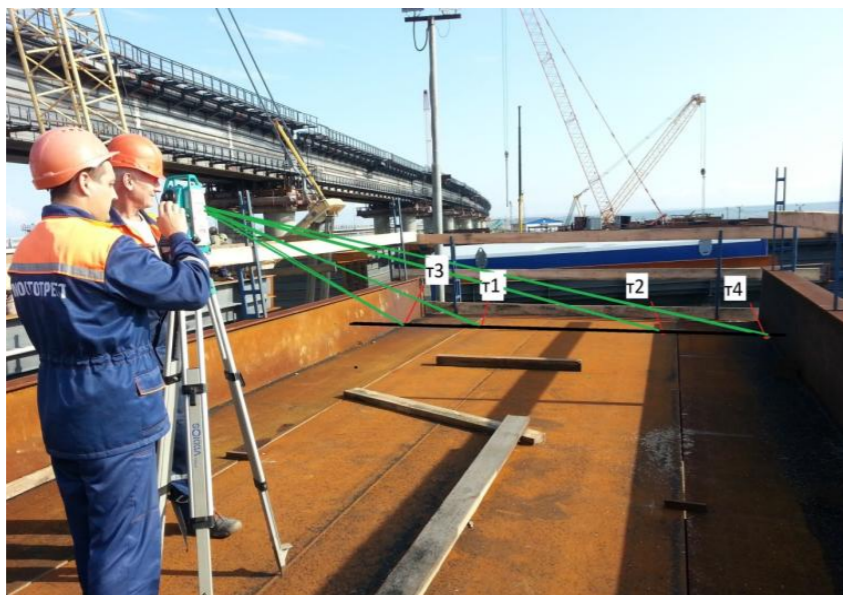


Рис. 3. Процесс определения отклонений высотных отметок консольных плит блока ПС

Определение происходит путем измерения высотных отклонений точек консольных плит от осевых точек верхней плиты блока ПС. Линия t1-t2 задается как базис, а у линий t3 и t4 определяется высотное отклонение от этого базиса (см. рис. 3).

Выставление происходит 2 раза, перед сваркой высотные отметки t3 и t4 должны быть ниже линии t1-t2 на 6 мм. Это делается с учетом поправки на стягивание сварного шва при кристаллизации, после сварки отметки t3 и t4 должны соответствовать базовой линии t1-t2. Допустимое отклонение отметок консольных плит от линии полотна блока ПС 2 мм.

После этого процесс укрупнения блока закончен, и происходит оформление общей исполнительной схемы на укрупненный блок ПС и окончательный контроль всех геометрических параметров. На рис. 4, 5 представлен пример исполнительной схемы укрупненного блока ПС.

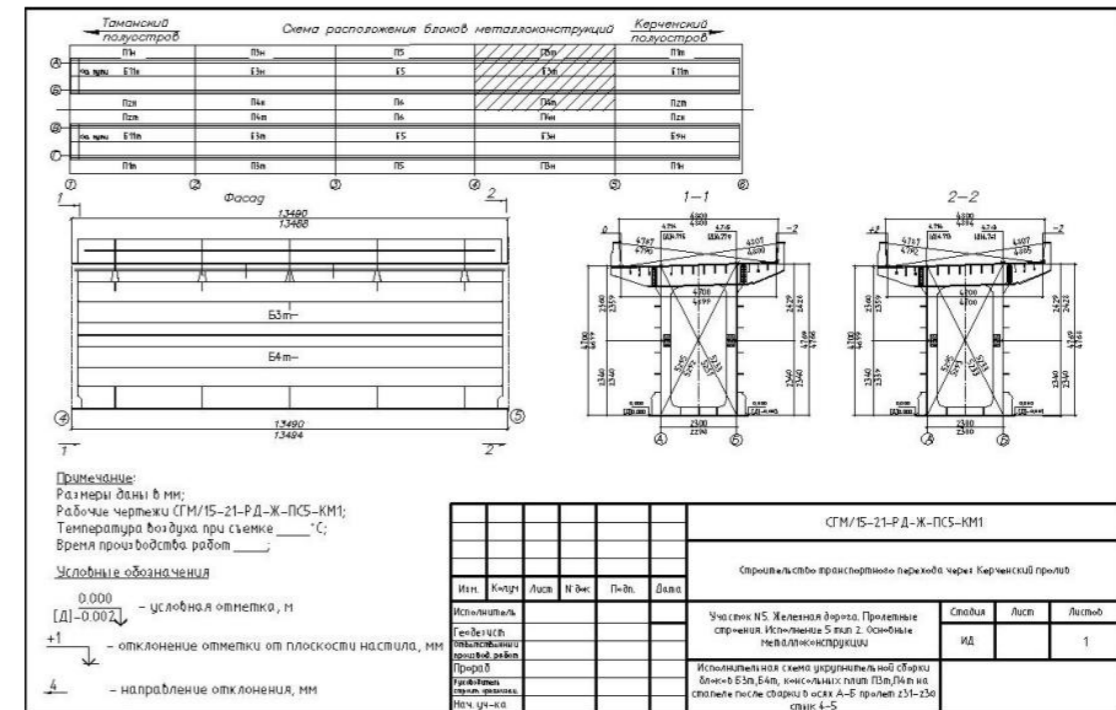


Рис. 4. Исполнительная схема на укрупненный блок ПС

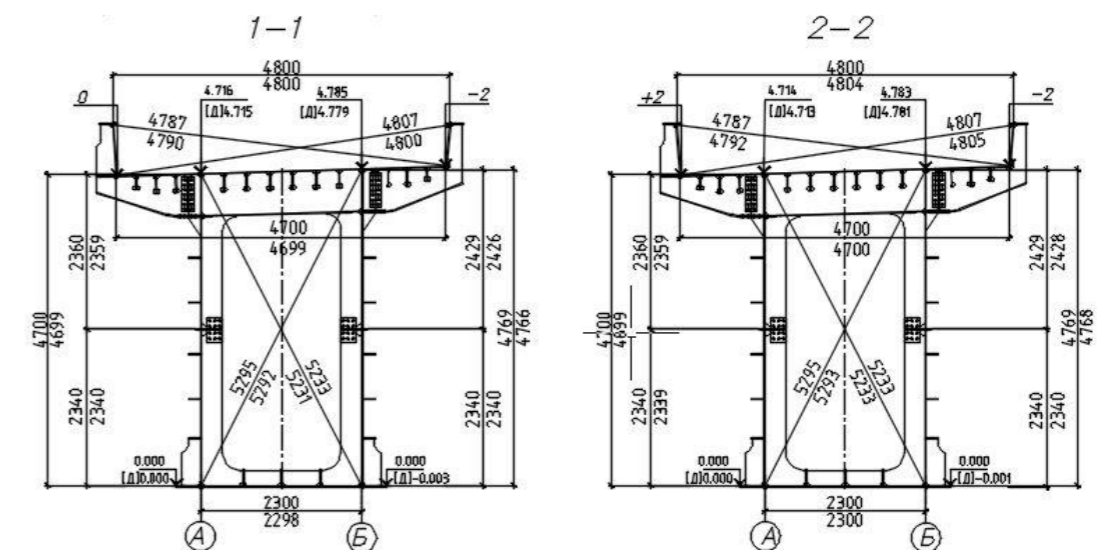


Рис. 5. Исполнительная схема на укрупненный блок ПС

Следующим этапом является выставление планово-высотного положения блоков ПС для их стыковки в статическую ветвь на стапеле сборки. Так как работы ведутся над водной поверхностью, то они разделяются на 2 стадии – контроль высотного, а после его фиксации и планового положений блока ПС.

На рис. 6 представлен процесс контроля высотных отметок укрупненного блока ПС.

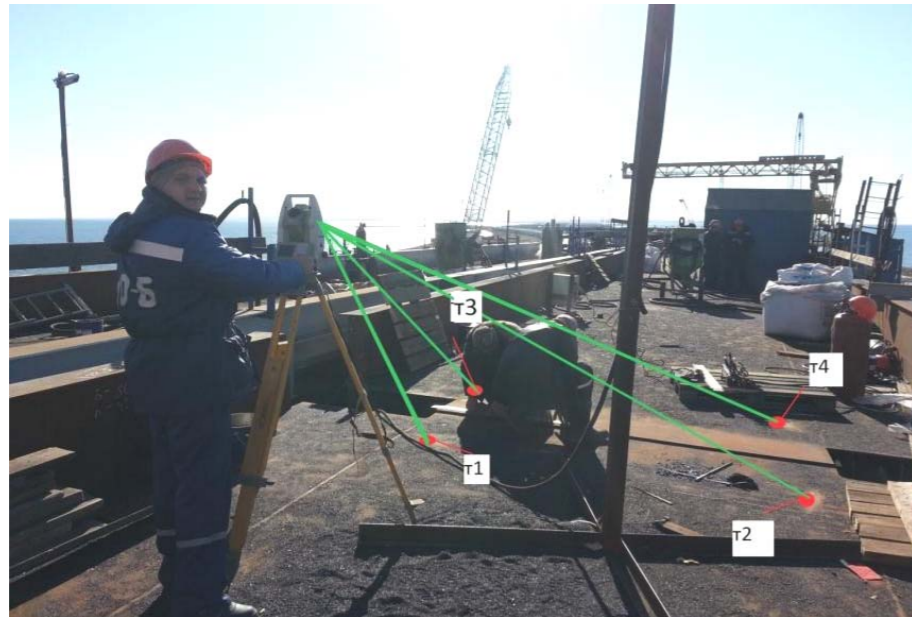


Рис. 6. Контроль высотных отметок укрупненного блока ПС при монтаже на стапеле сборки

У высотного положения блоков ПС есть 2 основных условия: превышение между осями главных балок и превышение отметок стыков соседних блоков относительно первого и последнего стыков, чтобы соблюсти строительный подъем. Превышение между осями главных балок t_1 и t_2 , t_3 и t_4 в данном случае должно быть равно 69 мм, допустимо отклонение 5 мм (рис. 7). Превышение между точками осей стыков блоков ПС рассчитывается с учетом соблюдения строительного подъема относительно выставленных первого и последнего стыков, оно может корректироваться в зависимости от отклонений их монтажа. Допустимые отклонения +5 мм, -10 мм от проектного строительного подъема.

На рис. 7 представлен процесс контроля планового положения блоков ПС.



Рис. 7. Контроль планового положения блоков ПС и общей прямолинейности конструкции ПС

После фиксации высотного положения блока и повторного контроля происходит контроль планового положения блока, и здесь учитывается не только отклонение от проектной линии, но и общая прямолинейность конструкции. Допустимое отклонение от проектной линии 5 мм, допустимое отклонение на прямолинейность конструкции 8 мм. Контроль планового положения происходит в системе координат СК Проект М1 путем засечки от существующих пунктов геодезической разбивочной основы (ГРО) RP10 и M1, после чего проектная линия, строящаяся по т. OS1 и т. OS7 с известными координатами, берется за базовую и происходит вычисление отклонений от нее в t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , t_5 , t_6 . После этого оценивается прямолинейность конструкции путем сравнения вычисления отклонений t_2 , t_3 , t_4 , t_5 от базовой линии t_1 - t_6 (см. рис.7).

Окончанием работ по сборке пролетного строения является исполнительная схема, при которой происходит съемка всего ПС, его планового и высотного положений в системе координат СК Проект М1.

Рассмотренные методы геодезического контроля, определения геометрических параметров строительных конструкций обеспечивают в первую очередь гарантию условий работы строительных конструкций и соответствие всем требованиям проекта. Геодезические работы позволяют исключить непоправимые ошибки при мостостроении, тем более на таком важном государственном объекте, как Крымский мост, и обеспечить безопасность транспортного перехода. Геодезический контроль осуществляется не только в период строительства, но и продолжается в период эксплуатации, осуществляется в виде наблюдений за осадками, деформациями строительных конструкций и отклонениями от проектных параметров.

Список литературы

1. СП 46.13330.2012. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 3.06.04-91 (с изменениями N 1, 3). – М.: Минрегион России, 2012. – С.63–66.

References

1. SP 46.13330.2012. Bridges and pipes. Updated edition of SNiP 3.06.04-91 (with changes N 1, 3). – M.: Ministry Of Regional Development of Russia, 2012. – P. 63–66.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 697.911

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

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

ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ ВОЛОКОН С КОНДИЦИОНИРОВАННЫМ ВОЗДУХОМ

А.И. Ерёмкин, Н.А. Орлова

Рассмотрены процессы взаимодействия текстильных волокон с кондиционированным воздухом за счёт процессов сорбции и десорбции. Проведены исследования гигростатики процесса взаимодействия текстильных волокон с кондиционированным воздухом. Определены оптимальные значения температуры t , °С, и относительной влажности воздуха φ , %, в производственных помещениях текстильных предприятий для оптимизации режима работы локальных систем технологического кондиционирования воздуха при выборе температурно-влажностного режима.

Ключевые слова: предприятия текстильной промышленности, текстильные волокна, десорбция, сорбция, кондиционирование, выбор температурно-влажностного режима

EVALUATION OF INTERACTION OF TEXTILE FIBERS WITH CONDITIONED AIR

А.И. Eremkin, N.A. Orlova

The processes of interaction of textile fibers with conditioned air due to the processes of sorption and desorption are considered are presented. The research is of hygrostatic process of interaction textile fibers with conditioned air. The optimal values of temperature t , °С, and relative humidity φ , %, in the production premises of textile enterprises to optimize the operation of local systems of technological air conditioning when selecting temperature and humidity conditions are determined.

Keywords: textile industry enterprises, textile fibers, desorption, sorption, conditioning, temperature and humidity conditions selection

Для определения оптимальных значений температуры t , °С, и относительной влажности воздуха φ , %, в производственных помещениях текстильных предприятий, поддерживаемых с помощью систем технологического кондиционирования воздуха, предлагается проведение исследования гигростатики процесса взаимодействия текстильных волокон с кондиционированным воздухом. Данное исследование первоначально сводится к теоретическому обоснованию достоверности полученных изотерм сорбции и десорбции текстильных волокон, а затем к экспериментальному подтверждению полученных результатов.

Изотермы сорбции и десорбции характеризуют взаимосвязь равновесного влагосодержания текстильных волокон W_p , %, с относительной влажностью воздуха φ , %. На рис.1 изображены графики зависимости $W_p = f(\varphi)_t$, полученные экспериментально.

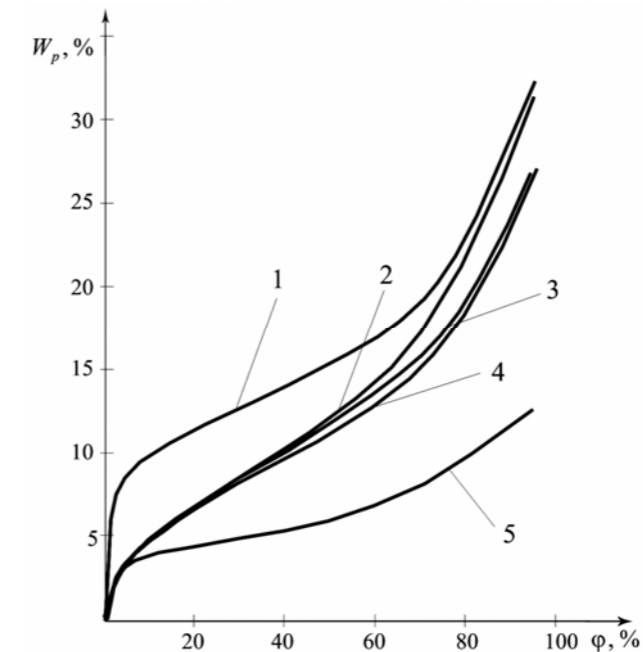


Рис. 1. Экспериментальная зависимость равновесной влажности волокон $W_p(x)$ от относительной влажности воздуха $\varphi(x)$:
1 – пряжа; 2 – вискоза; 3 – шерсть; 4 – ровница; 5 – капрон

Для оценки любого способа определения W_p , %, в зависимости от φ , %, и изучения процесса гигростатики предлагается разработать теоретическое обоснование критериев оценки достоверности полученной зависимости $W_p = f(\varphi)_t$ и процесса гигростатики взаимодействия W_p с φ .

Известно, что в процессе взаимодействия текстильных волокон с кондиционированным воздухом молекулы водяных паров из воздуха притягиваются к материалу за счёт неуравновешенных на поверхности молекул, уменьшая их избыточную энергию. При этом начальная стадия поглощения сопровождается образованием первого слоя сорбированной влаги на поверхности волокон толщиной в одну молекулу.

По данным А.В. Лыкова, процесс образования мономолекулярного слоя начинается при самых минимальных значениях φ , заканчивается при $\varphi = 10$ % и на изотерме сорбции и десорбции характеризуется выпуклостью к оси влагосодержания (см. рис. 1). Ударяющиеся молекулы водяных паров вступают во взаимодействие с молекулами монослоя и за счёт созданного поверхностными молекулами силового поля сорбируются на монослое, образуя второй и последующие слои адсорбированной влаги [1].

По данным других авторов, процесс полимолекулярной адсорбции протекает вплоть до $\varphi = 80 - 90$ % и на изотерме сорбции вначале, при средних значениях φ , определяется прямолинейным участком с последующим плавным отклонением прямой в кривую выпуклостью к оси φ (см. рис. 1). Данное отклонение можно объяснить началом преобладания капиллярной конденсации над полимолекулярной адсорбцией.

Следовательно, можно предположить, что начиная от $\varphi = 60\%$ и до $\varphi = 80-90\%$ поглощение влаги осуществляется за счёт как полимолекулярной адсорбции, так и капиллярной конденсации.

Известно, что при увеличении φ свыше $80-90\%$ почти все микропоры заполняются капиллярной влагой с образованием вогнутых менисков жидкости, над поверхностью которых понижается давление насыщенного пара, и за счёт этого осуществляется конденсация паров влаги из воздуха. Преобладающее образование менисков является заключительной стадией сорбционного процесса и началом массовой капиллярной конденсации. На изотерме сорбции область капиллярной конденсации в чистом виде характеризуется резким возрастанием W_p и значительным отклонением ветви изотермы вогнутостью к оси φ с последующим переходом в вертикальную прямую с незначительным углом наклона к данной оси (см. рис. 1).

Выявленные отличительные признаки изотермы сорбции и десорбции рассматриваемых материалов являются первым критерием, позволяющим судить о соответствии любого способа экспериментального определения W_p целям изучения указанных процессов и точности полученных значений данной величины.

Аналогичную оценку можно давать по выявленному гистерезису, который свидетельствует о неравновесном характере процесса, начало которого должно совпадать с процессом образования капиллярной конденсации [1]. Учитывая мелкопористую структуру текстильных волокон, особенно натуральных и искусственных, можно предположить, что гистерезис может образовываться от нулевого удельного влагосодержания волокон U в зоне мономолекулярной адсорбции, когда уже в незначительной части совсем тонких микропор происходит капиллярная конденсация, в то время как в более крупных микропорах протекает адсорбция влаги. У синтетических волокон, имеющих более плотную и упорядоченную структуру, явление гистерезиса может начинаться с некоторого значения φ , а в области мономолекулярной адсорбции капиллярная конденсация может отсутствовать. Для всех волокон и смесок по мере возрастания φ величина гистерезиса увеличивается и достигает наибольшего значения в области максимального гигроскопического состояния (рис. 2).

Таким образом, явно выраженная гистерезисная петля, выявленная в полном диапазоне изменения φ от 0 до 100%, будет свидетельствовать о точности полученных экспериментальных результатов по W_p и являться вторым критерием достоверности результатов исследований.

При решении вопросов оптимизации режима работы локальных систем технологического кондиционирования воздуха необходимо предельно точно установить область преобладания отдельных форм связи влаги с материалом и учитывать их при выборе температурно-влажностного режима в производственных помещениях.

При определении границ форм связи влаги с текстильными волокнами следует воспользоваться величиной энергии связи, характеризуемой как адсорбционный потенциал Поляни (ε), который выражает работу, совершаемую адсорбционными силами для перемещения моля пара из среды к поверхности материала, и равен:

$$\varepsilon = R \cdot T \cdot \ln \frac{P_n}{P_U} = RT \ln \frac{1}{\varphi}, \quad (1)$$

где ε – адсорбционный потенциал, Дж/кмоль; R – универсальная газовая постоянная, равная $8,31 \cdot 10^3$, Дж/(кмоль·К); T – абсолютная температура, К; P_n – давление насыщенного пара свободной воды при данной температуре, н/м²; P_U – парциальное давление пара воды при той же температуре над материалом, н/м².

Анализ адсорбционного потенциала позволяет сделать вывод, что энергия связи влаги с материалом при изотермических условиях однозначно определяется величиной парциального давления водяного пара над поверхностью материала или, что пропорционально, степенью его сухости [2, 4].

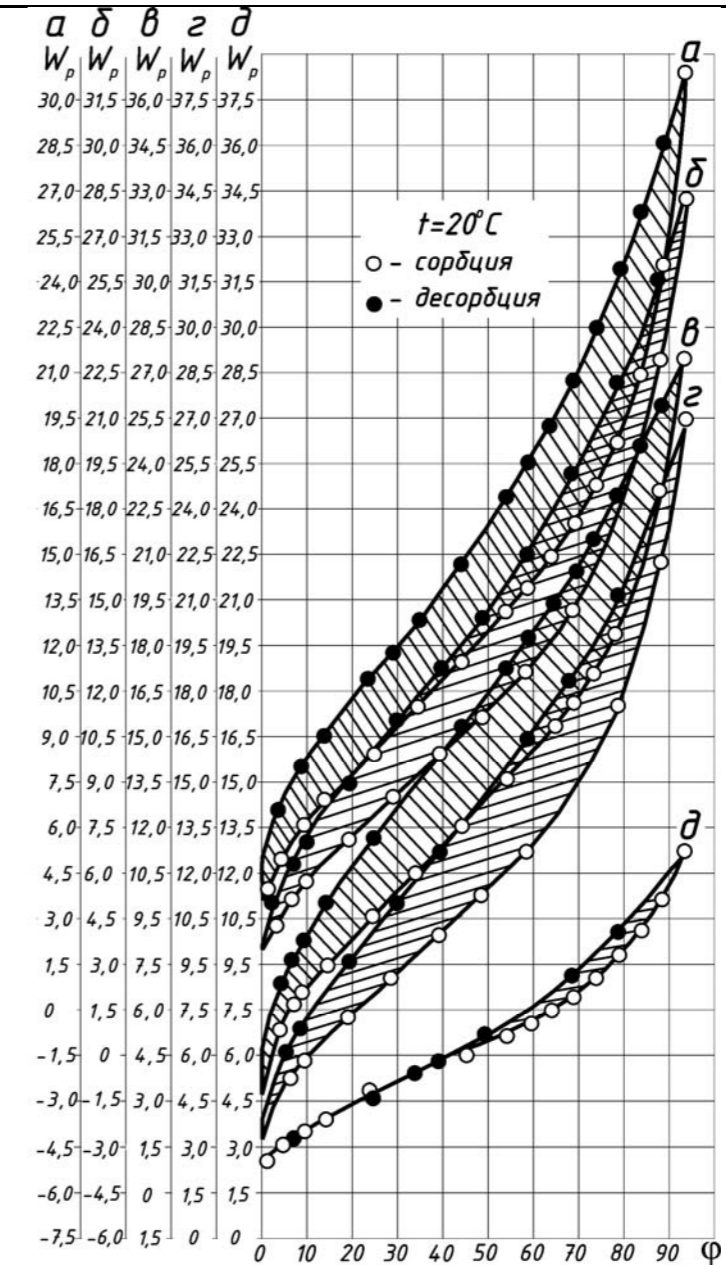


Рис. 2. Зависимость равновесной влажности волокон W_p , %, от относительной влажности воздуха φ , %, при постоянной температуре, равной 20°C: а – вискоза; б – пряжа; в – шерсть; г – ровница; д – капрон

Основываясь на данном положении и доказательстве, выдвинутом А.В. Лыковым и Л.М. Никитиной, о равенстве по абсолютной величине энергии связи химическому потенциалу массопереноса $\mu = |\mu|$, определяемому из выражения

$$\mu = -R \cdot T \cdot \ln \varphi, \quad (2)$$

можно обнаружить наличие характерных точек на ломаной кривой в координатах:

степень сухости $\left(\frac{1}{U_p}\right)$ – химический потенциал μ (рис. 3).

Данные точки будут с некоторой условностью характеризовать границы преобладания отдельных форм связи влаги с материалом. Если на изотерме сорбции в координатах $\frac{1}{U_p} = f(\mu)_i$ будут обнаруживаться сингулярные точки при $\varphi = 10, 60, 80-90\%$, которые

свидетельствуют о границах перехода между отдельными видами адсорбционно и капиллярно связанной влаги, то это будет третьим критерием, подтверждающим надёжность полученных результатов исследований гигростатики.

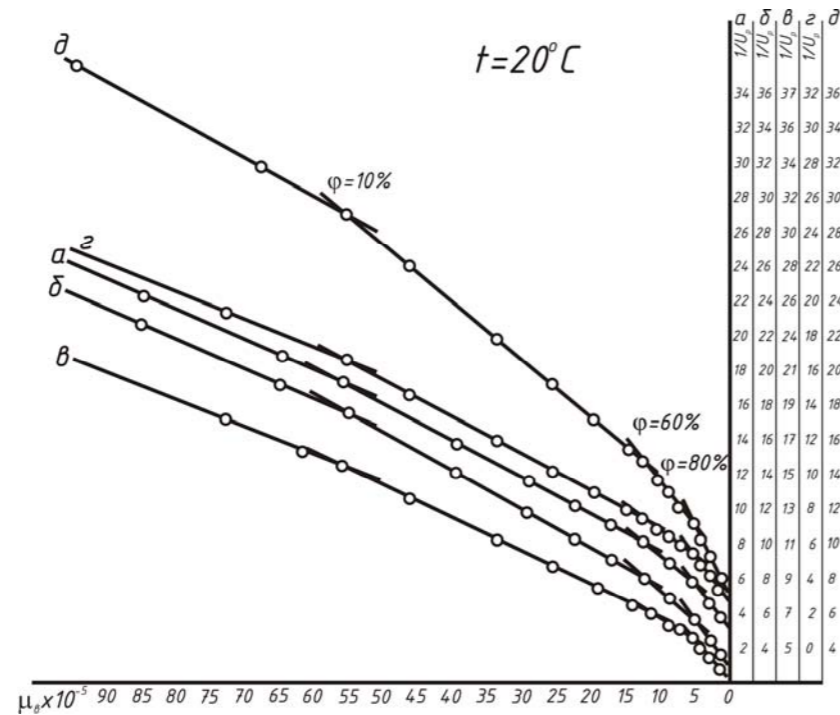


Рис. 3. Зависимость между степенью сухости волокон $1/U_p$, кг/кг, и химическим потенциалом массопереноса μ , Дж/кмоль, при постоянной температуре, равной 20°C :
а – ровница; б – пряжа; в – шерсть; г – вискоза; д – капрон

Известно, что энергия связи влаги с материалом является потенциалом массопереноса. Примем за движущую силу массопереноса в гигроскопической области градиент μ , который выражает приращение внутренней энергии материала при увеличении его массы на единицу и является функцией U и T . При данных рассуждениях, выражая параметры среды t и ϕ через μ , используя для этого уравнение (2), установим обратную функциональную связь $U_p = f(\mu)$, которая показывает, что с возрастанием U_p величина $|\mu|$ уменьшается, и при максимальной гигроскопической влажности ($\phi = 100\%$) $\mu = 0$. Таким образом, полученные изотермы сорбции и десорбции представим в виде зависимости $U_p = f(\mu)$. Эта зависимость является характеристической, так как она отображает связь между удельным влагосодержанием текстильных волокон и химическим потенциалом массопереноса.

Для теоретического обоснования характеристического уравнения $U_p = f(\mu)$, основываясь на молекулярно-кинетических представлениях о влагопереносе, представим, что вблизи поверхности материала всегда имеет место макроскопическое движение молекул водяных паров в направлении от большего потенциала к меньшему, выраженному через μ , которые обладают кинетической энергией и, следовательно, импульсом. В свою очередь, поверхностным молекулам материала также свойственно наличие импульса. При соударении с ними молекулы водяных паров передают им некоторый импульс, равный изменению количества движения, или сами получают его от них в зависимости от направленности процесса, и это при сорбции или десорбции вызывает соответственно уменьшение или увеличение поверхностной энергии, которую можно выразить через изменения приращения μ . Известно, что в области одной формы связи влаги с материалом, в частности при полимолекулярной адсорбции, на поверхности раздела «твёрдая фаза и адсорбированная влага», независимо от направ-

ленности процесса, действует закон сохранения импульса между молекулами материала и водяных паров, величина которого определяется прямо пропорциональной зависимостью между количеством адсорбированной или десорбированной влаги U и корнем квадратным из химического потенциала $\sqrt{\mu}$, выражающего изменение поверхностной энергии при влагообмене.

Исходя из этого и согласно теории размерностей, характеристическое уравнение для условной сорбции и десорбции исследуемых многокомпонентных материалов в области полимолекулярной адсорбции примет вид:

$$U_{p(T)}^{(c)(d)} = U_m^{(c)(d)} \sqrt{\frac{\mu_m}{\mu_b}} \quad (3)$$

В данном уравнении имеются всего две константы U_m и μ_m , которые выражают конкретный физический смысл и имеют правдоподобные значения. Это подтверждает преимущество полученного выражения перед другими для определения U_p и является одним из критериев правильности полученного выражения. При этом константа μ_m является постоянной величиной для всех видов перерабатываемых волокон и смесок, определяется из выражения (2) при $\phi = 10\%$ и $t = 20^\circ\text{C}$ и характеризует завершение мономолекулярной адсорбции. В свою очередь, U_m является влажностной характеристикой при определении U_p и количественно отображает величину монослоя, которая зависит от вида перерабатываемого материала и направленности процесса и, таким образом, делает полученное характеристическое уравнение (3) универсальным, позволяющим определить U_p для любого вида перерабатываемого материала при условиях сорбции и десорбции и цикличности этих условий.

Согласно принятым теоретическим предпосылкам, уравнение (3) справедливо только в области полимолекулярной адсорбции в интервале $\phi = 10-60\%$. Однако использование в качестве потенциала переноса массы вещества энергии связи влаги с материалом, которая приложена как к мономолекулярной, так и полимолекулярной адсорбции, позволяет предположить применимость полученного выражения (3) с практической точностью до 15% для расчетов дополнительно в зоне мономолекулярной адсорбции и в смешанной области. Целесообразность учёта направленности процесса можно обосновать тем, что при сорбции до максимального гигроскопического состояния волокна значительно набухают, и при десорбции в условиях производства линейные деформации полностью не успевают релаксироваться, это вызывает остаточное увеличение условной поверхности микропор. При использовании уравнения (3) для учёта направленности влагообмена можно принимать U_m по изотерме сорбции или десорбции по уравнению

$$U_m = \frac{acP}{(P_0 - P)[1 + (c - a)\frac{P}{P_0}]}, \quad (4)$$

где c – константа, зависящая от теплоты сорбции, абсолютной температуры и других параметров; P_0 – давление насыщенного пара.

При циклических процессах сорбции и десорбции, независимо от интервала изменения ϕ , величина U_m может приниматься по изотерме десорбции после полного цикла процессов. Величина U_m , как константа уравнения (3), для отдельных волокон может определяться согласно данному выражению методом наименьших квадратов, по результатам прямых экспериментальных измерений U_p в интервале изменения

$\varphi = 10-60\%$ при сорбции и после максимального гигроскопического увлажнения $60-10\%$ при десорбции, по уравнению

$$U_M^{(c)(d)} = \frac{\sum U_p^{(c)(d)} \sqrt{\frac{\mu_M}{\mu_B}}}{\sum \frac{\mu_M}{\mu_B}} \quad (5)$$

Полученные значения U_M для разных видов волокон представлены в таблице.

Величины U_M , найденные по уравнению (5) и полученные экспериментально по изотермам сорбции или десорбции, количественно совпадают в пределах точности до 10% и, таким образом, подтверждают справедливость полученных экспериментальных значений U_p .

Значение удельного влагосодержания в момент завершения мономолекулярной адсорбции, полученное различными методами для смеси аппаратного прядения

Метод определения $U_M^{(c)(d)}$, кг в/кг с.в	Величина $U_M^{(c)(d)}$ при сорбции (с) и десорбции (д) для различных материалов при $t = 20^\circ\text{C}$									
	Шерсть		Вискоза		Капрон		Ровница		Пряжа	
	U_M^c	U_M^d	U_M^c	U_M^d	U_M^c	U_M^d	U_M^c	U_M^d	U_M^c	U_M^d
Экспериментально	0,066	0,0838	0,061	0,081	0,0346	0,0346	0,0587	0,0692	0,0579	0,072
По уравнению (5)	0,069	0,0887	0,0659	0,0868	0,0347	0,035	0,0605	0,0779	0,0602	0,0781

С помощью U_M уравнение (3) можно использовать также для определения U_p смесей, состоящих из различных волокон в виде полуфабрикатов и пряжи, без проведения дополнительных экспериментов. В данном случае U_M определяется аналитически из выражения (5) как средневзвешенная величина, согласно выявленным U_M отдельных компонентов смеси:

$$\bar{U}_M^{(c)(d)} = P_1 U_{M(1)}^{(c)(d)} + P_2 U_{M(2)}^{(c)(d)} + \dots + P_n U_{M(n)}^{(c)(d)} = \sum_1^n P U_M^{(c)(d)} \quad (6)$$

Данное выражение справедливо для определения U_p в условиях как сорбции, так и десорбции. Для этого необходимо принимать только соответствующие значения U_M , определяемые из выражения (5) или экспериментально в зависимости от направленности процесса.

Часто в шерстопрядильном производстве в смесь добавляются обраты, содержащие все компоненты данной смеси. В этом случае для определения U_p , с учётом добавок, величину U_M следует устанавливать из уравнения

$$\bar{U}_{M(0)}^{(c)(d)} = \bar{U}_M^{(c)(d)} (P_0 + 1) \quad (7)$$

Отметим, что константы U_M и μ_m , полученные экспериментальным или расчётным способом, совместно с уравнением (3) с достаточной точностью (до 10%) описывают экспериментальные кривые $U_p = f(\mu_B)_i$, что согласно [3] является четвертым крите-

рием оценки правильности полученного характеристического уравнения (3) и выбора методики экспериментальных исследований гигростатики.

При рассмотрении гигростатики процессов массообмена необходимо характеризовать влажностное состояние волокон через химический потенциал массопереноса μ_B , который предлагается определять аналитически из уравнения

$$\mu_B^{(c)(d)} = \frac{(U_M^{(c)(d)})^2 \mu_M}{(U_M^{(c)(d)})^2} \quad (8)$$

Полученное характеристическое уравнение (3) является исходным условием для определения истинной удельной изотермической массёмкости отдельных волокон и смесок как первой производной от влагосодержания по химическому потенциалу при постоянной температуре:

$$C_\mu^{(c)(d)} = \left(\frac{dU}{d\mu_B} \right)_i$$

Исходя из этого, находим интересующую нас производную, из которой определится величина C_μ для отдельных волокон:

$$C_\mu^{(c)(d)} = - \left(\frac{U_M^{(c)(d)} \sqrt{\mu_M}}{2\sqrt{\mu_B^3}} \right) \quad (9)$$

В данном выражении полученный в результате дифференцирования знак минус означает, что положительному приращению dU соответствует отрицательное приращение $d\mu$.

С помощью уравнения (9) посредством U_M можно оценивать влагоаккумулирующую способность как отдельных волокон, так и смесей, состоящих из различных волокон, с учётом направленности процесса влагообмена, изменения при этом гигроскопических свойств материалов, а также проанализировать формы связи влаги с материалами. Изложенное можно наглядно проследить на графике зависимости $C_\mu = f(\mu)_i$ (рис. 4).

С помощью величины C_μ можно оценивать при различных значениях μ перераспределение влаги между отдельными составляющими смеси. При этом представляет практический интерес определение количества влаги, перешедшей из одного материала к другому, так как при изменении W отдельных составляющих смеси происходит существенное ухудшение их физико-механических свойств, хотя W всей смеси может оставаться постоянной. Для этого воспользуемся элементарными соотношениями термодинамики, согласно которым количество влаги $G_{вл}$ в кг, перешедшее от одного материала к другому при различных μ , можно определить из выражения

$$G_{вл}^{(c)(d)} = C_\mu^{(c)(d)} G_c (\mu_2 - \mu_1) \quad (10)$$

где μ_1 и μ_2 – химические потенциалы массопереноса взаимно контактирующих материалов, Дж/кмоль.

Вместе с тем полученное уравнение (10) позволяет отметить, что при термодинамическом равновесном состоянии, независимо от C_μ и U_p отдельных составляющих смеси, имеет место равенство значений их μ . Значит, градиент массопереноса между ними отсутствует, и влагопереноса между контактирующими волокнами не происходит. Данное положение позволит при исследовании гидродинамики рассмат-

риваемых процессов принять смесь как единое тело, внутри которого влагообмена не происходит, а каждая составляющая смеси самостоятельно обменивается массой с концентрированным воздухом.

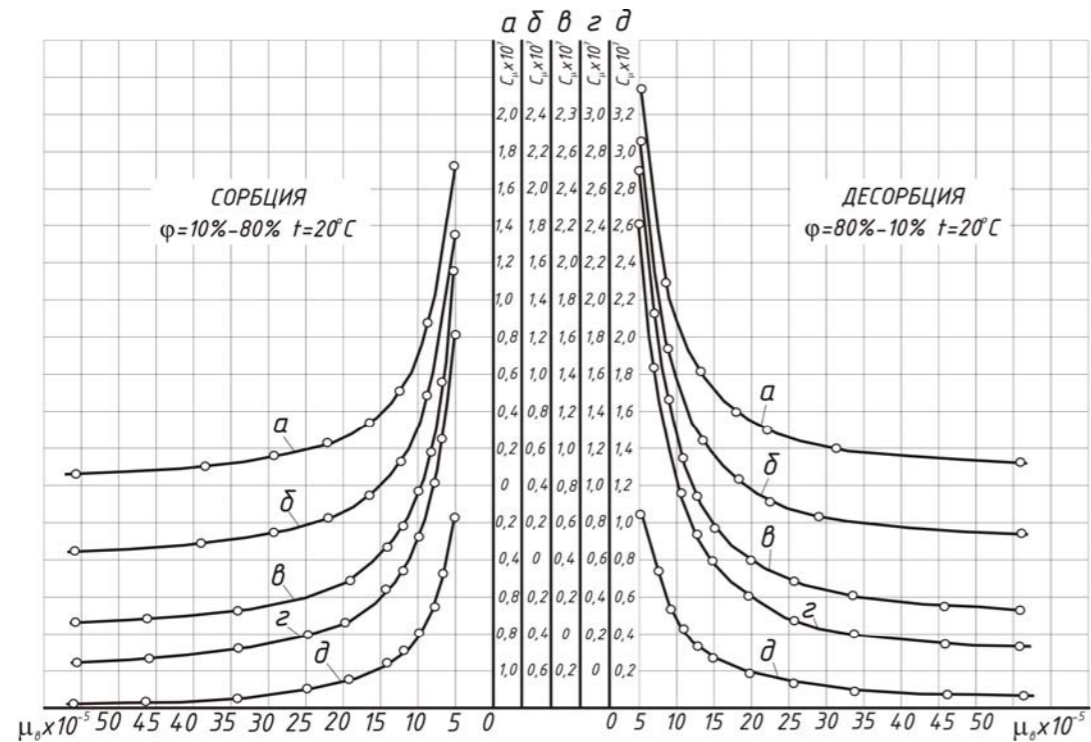


Рис. 4. Зависимость удельного изотермического коэффициента массоемкости C_{μ} , кмоль/Дж, волокон от химического потенциала массопереноса μ_v , Дж/кмоль, при постоянной температуре $t = 20^\circ\text{C}$: а – пряжа; б – ровница; в – шерсть; г – вискоза; д – капрон

При определении температурно-влажностного режима воздуха в производственных помещениях очень важно в каждом конкретном случае учитывать микроструктуру перерабатываемых волокон, выраженную через $F_{\text{пор}}$.

Чтобы определить $F_{\text{пор}}$, необходимо знать величину адсорбированного монослоя U_m и среднюю величину поверхности A_0 , занимаемой одной молекулой. В свою очередь, очень трудно точно установить величину A_0 , так как она зависит от состояния адсорбированных молекул на поверхности материала. Для воды A_0 примерно составляет 10^{-19} м², что согласуется с данными ряда авторов.

Методом логических рассуждений по известному количеству молекул в монослое и площади, занимаемой одной молекулой, значение $F_{\text{пор}}$ для отдельных волокон для условий сорбции и десорбции можно определить из выражения

$$F_{\text{пор}}^{(c)(d)} = \frac{U_m^{(c)(d)} \cdot N \cdot A_0}{M} \quad (11)$$

Справедливость данных рассуждений подтверждается путём сравнения величины $F_{\text{пор}}$ с данными, полученными другими методами. Учитывая направленность процесса, характеризуемую в данном уравнении величиной U_m , можно предположить, что $F_{\text{пор}}$ при десорбции будет больше, чем при сорбции. Это объясняется тем, что после

набухания волокна не успевают вернуться в первоначальное линейное состояние и поэтому такое остаточное явление вызывает увеличение $F_{\text{пор}}$.

Удельную поверхность всей смеси, участвующую в массообменном процессе, для условий сорбции и десорбции уместно определить как средневзвешенную величину по выявленным значениям $F_{\text{пор}}$ для отдельных волокон из выражения

$$\bar{F}_{\text{пор}}^{(c)(d)} = P_1 \cdot F_{\text{пор}(1)}^{(c)(d)} + P_2 \cdot F_{\text{пор}(2)}^{(c)(d)} + \dots + P_n \cdot F_{\text{пор}(n)}^{(c)(d)} = \sum_1^n P \cdot F_{\text{пор}}^{(c)(d)} \quad (12)$$

То же с учётом обраты – из уравнения

$$\bar{F}_{\text{пор}(0)}^{(c)(d)} = \bar{F}_{\text{пор}}^{(c)(d)} \cdot (P_0 + 1) \quad (13)$$

Полученные результаты исследований можно рассматривать как основу для оптимизации значений t , °C, ϕ , %, и, как следствие, режима работы систем технологического кондиционирования воздуха на всех технологических этапах переработки текстильных волокон в пряжу и ткани.

Список литературы

1. Еремкин, А.И. Технологическое кондиционирование воздуха способом вытесняющей вентиляции текстильных предприятий: моногр. / А.И.Еремкин, И.Н.Фильчакина. – Пенза: ПГУАС, 2019. – 216 с.
2. Аверкин, А.Г. Тепловлажностная обработка воздуха в системах вентиляции и кондиционирования: моногр. / А.Г. Аверкин. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 188 с.
3. 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.
4. 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. Technological air conditioning by displacing ventilation of textile enterprises: monogr. / A.I. Eremkin, I.N.Filchakina. – Penza: PGUAS, 2019. – 216 p.
2. Averkin, A.G. Heat and moisture treatment of air in ventilation and air conditioning systems: monograph / A.G. Averkin. – Penza: PGUAS, 2011. – 188 p.
3. Denisikhina, D.M. Methodology of construction of mathematical models for of ventilation and air conditioning tasks / D.M. Denisikhina // VI international conference «Air-2010». – SPb., 2010. – P. 54–56.
4. Lemanov, V.V. Experimental study of micro-jets / V.V. Lemanov, V.I. Terekhov, K.A. Sharov, A.A. Shumeyko // Bulletin of Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky. – 2011. – No. 4 (5). – P. 2305–2307.

УДК 628.3

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

Андреев Сергей Юрьевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

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

Князев Александр Анатольевич,
старший преподаватель кафедры
«Инженерная экология»

ООО «Экотех»

Россия, 440068, г. Пенза,
ул. Терешковой, д. 7а

Кузнецова Алена Олеговна,
генеральный директор

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

Andreev Sergey Yuryevich,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Water supply, sewerage
and hydraulic engineering»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

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

Knyazev Alexander Anatolyevich,
Senior Lecturer of the department
«Engineering Ecology»

LLC "Ecotech»

Russia, 440068, Penza,
7a, Tereshkova St.

Kuznetsova Alena Olegovna,
General Director

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ВЕЛИЧИНЫ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ МЕМБРАННОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ОБРАБАТЫВАЕМОГО РАСТВОРА ГИДРОКСИДА НАТРИЯ И ЕГО ТЕМПЕРАТУРЫ

С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, А.А. Князев, А.О. Кузнецова

Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости величины удельной электропроводности электрохимической ячейки мембранного электролизера от концентрации обрабатываемого раствора гидроксида натрия и его температуры.

Показано, что увеличение концентрации гидроксида натрия в электролите с $C_p=250$ г/л до $C_p=750$ г/л приводит к снижению величины удельной электропроводности электрохимической ячейки с $\kappa = 0,20 - 0,57(\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ до $\kappa = 0,04 - 0,30(\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$, а повышение температуры электролита с $T=20$ °С до $T=60$ °С приводит к увеличению величины удельной электропроводности электрохимической ячейки с $\kappa = 0,04 - 0,20(\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ до $\kappa = 0,30 - 0,57(\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$. Получены математические зависимости, описывающие изменения величины удельной электропроводности электрохимической ячейки при изменении концентрации и температуры электролита. Использование предложенной методики расчета позволит оптимизировать процесс электрохимической генерации феррата натрия в мембранном электролизере с растворимыми железными анодами.

Ключевые слова: удельная электропроводность, электрохимическая ячейка, феррат натрия, геометрический коэффициент, электролит, неселективная мембрана, анолит-катодит

EXPERIMENTAL STUDIES OF DEPENDENCE OF THE VALUE OF SPECIFIC ELECTRIC CONDUCTIVITY OF THE ELECTROCHEMICAL CELL OF MEMBRANE ELECTROLYZER FROM CONCENTRATION OF PROCESSED SODIUM HYDROXIDE AND ITS TEMPERATURE

S.Yu. Andreev, I.A. Garkina, A.A. Knyazev, A.O. Kuznetsova

The results of experimental studies of the dependence of the electrical conductivity of the electrochemical cell of a membrane electrolyzer on the concentration of the treated sodium hydroxide solution and its temperature are presented.

It was shown that an increase in the concentration of sodium hydroxide in the electrolyte with $C_p = 250$ g/l to $C_p = 750$ g/l leads to a decrease in the specific conductivity of the electrochemical cell from $\kappa = 0.20-0.57 (\text{Ohm} \cdot \text{cm})^{-1}$ to $\kappa = 0.04-0.30 (\text{Ohm} \cdot \text{cm})^{-1}$, and an increase in the electrolyte temperature from $T = 20$ °C to $T = 60$ °C leads to an increase in the electrical conductivity electrochemical cell with $\kappa = 0.04-0.20 (\text{Ohm} \cdot \text{cm})^{-1}$ to $\kappa = 0.30-0.57 (\text{Ohm} \cdot \text{cm})^{-1}$. Mathematical dependences are obtained that describe changes in the value of the electrical conductivity of an electrochemical cell with a change in the concentration and temperature of the electrolyte. Using the proposed calculation method optimizes the process of electrochemical generation of sodium ferrate in a membrane electrolyzer with soluble iron anodes.

Keywords: electrical conductivity, electrochemical cell, sodium ferrate, geometric coefficient, electrolyte, non-selective membrane, anolyte-catholyte

В настоящее время широкое распространение в процессах очистки и доочистки производственных сточных вод получили технологии химического окисления загрязняющих компонентов методами реагентной химической деструкции.

Методы реагентной химической деструкции имеют следующие преимущества:

- возможность достижения высокого эффекта очистки при обработке сточных вод, имеющих широкий спектр загрязняющих веществ, различающихся как по химическому, так и по фазово-дисперсному составу;
- быстрота и простота вывода процесса деструктивной очистки сточных вод на заданные технологические параметры;
- устойчивость процесса очистки сточных вод как в непрерывном, так и в периодическом режимах работы химических реакторов;
- возможность оперативного регулирования процесса очистки сточных вод при изменении состава и концентрации загрязняющих компонентов.

Сущность процессов реагентного химического окисления загрязнений сточных вод заключается в протекании ряда окислительно-восстановительных реакций, в результате которых реагент окислитель отнимает электрон от атомов или ионов загрязняющих веществ. В практике очистки производственных сточных вод методами реагентной химической деструкции нашли широкое использование реагенты-окислители, представляющие собой кислородосодержащие соединения хлора (гипохлорид натрия, хлорная известь, диоксид хлора), а также пероксид водорода, перманганат калия и озон. Одним из сильнейших в ряде реагентов окислителей является феррат натрия. Его окислительный потенциал ($E^0=+2,2\text{В}$) не только превосходит окислительный потенциал кислородосодержащих соединений хлора, но и превышает окислительный потенциал озона.

В работе [1] описывается технологический процесс электрохимического синтеза феррата натрия методом окисления материала железного анода в мембранном электролизере.

Сотрудниками кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника» ПГУАС и ООО «Экотех» была разработана лабораторная установка для получения окислителя феррата натрия в процессе электроактивационной обработки 40 % раствора гидроксида натрия [2].

Общий вид лабораторной установки для получения окислителя феррата натрия представлен на рис. 1.

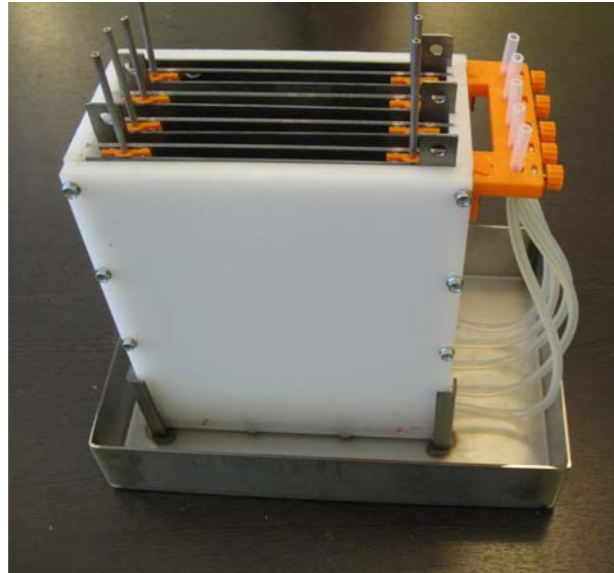


Рис. 1. Общий вид лабораторной установки для получения окислителя феррата натрия

Лабораторная установка для получения окислителя феррата натрия представляет собой многокамерный электролизер периодического действия, состоящий из двух анодных и трех катодных камер, разделенных между собой неселективными мембранами, выполненными из пластиковых листов с отверстиями диаметром 0,8 мм, на поверхности которых закреплена охлаждающая система в виде змеевика, изготовленного из нержавеющей стали, по которому пропускается охлаждающая электролит вода. По конструктивному оформлению блока электродной системы лабораторная установка представляет собой электролизер с электродной системой пазового типа, имеющей пластинчатые вертикально расположенные плоскопараллельные электроды, параллельно подключенные к источнику стабилизированного постоянного тока.

Электрохимическая ячейка лабораторной установки для получения феррата натрия представляет собой пару пластинчатых параллельно расположенных железных электродов (анод-катод), между которыми залит раствор гидроксида натрия и установлена неселективная мембрана, гидравлически разделяющая прианодные области электролита (аналит) и прикатодные области электролита (католит).

Омическое сопротивление электрохимической ячейки может быть определено аналогично сопротивлению металлического проводника

$$R_{я} = \rho_{я} \frac{l_{я}}{S_{я}}, \text{ Ом}, \quad (1)$$

где $\rho_{я}$ – удельное сопротивление электрохимической ячейки, Ом·см; $l_{я}$ – расстояние между электродами (длина прохождения тока в растворе), см; $S_{я}$ – площадь поверхности электродов, см².

Основной технологической характеристикой лабораторной установки является величина удельной электропроводности электрохимической ячейки, определяемая по формуле

$$\kappa_{я} = \frac{1}{\rho_{я}} = \frac{1}{R_{я}} \cdot \frac{l_{я}}{S_{я}}, (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}. \quad (2)$$

Отношение величины расстояния между электродами $l_{я}$ к площади поверхности электродов (суммарной поверхности анодов) $S_{я}$ является геометрическим коэффициентом электрохимической ячейки, определяющим ее основные технологические

характеристики (величину напряжения на электродном блоке V , В, при заданном значении силы тока I , А).

$$K_{я} = \frac{l_{я}}{S_{я}}, \text{ см}^{-1}. \quad (3)$$

Оптимальный выбор величины геометрического коэффициента электрохимической ячейки $K_{я}$ позволят обеспечить минимальное значение ее омического сопротивления $R_{я}$ и сократить расходы электроэнергии на электрохимические процессы окисления и растворения металла анода.

На рис. 2 представлены графики зависимостей электрического сопротивления условной электрохимической ячейки, имеющей величину электропроводности, равную единице $\kappa_{я} = 1 (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$, от площади поверхности электродов $S_{я}$, см², и величины межэлектродного пространства $L_{я}$, см.

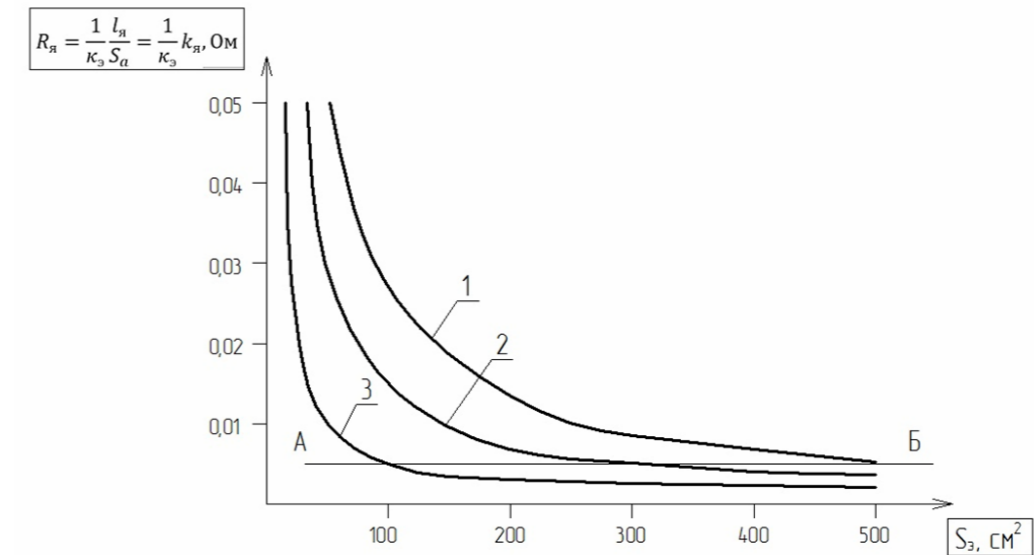


Рис. 2. Графики зависимостей электрического сопротивления условий электрохимической ячейки от площади поверхности электродов $S_{я}$ и величин межэлектродного пространства $L_{я}$:
1 – $L_{я} = 2,5$ см; 2 – $L_{я} = 1,5$ см; 3 – $L_{я} = 0,5$ см

Как следует из рис. 2, при увеличении геометрического коэффициента электрохимической ячейки $K_{я}$ её электрическое сопротивление резко падает.

Электрическое сопротивление электрохимической ячейки будет минимально при величине геометрического коэффициента оптимальной электрохимической ячейки совершенного типа, имеющей конструктивные особенности, обеспечивающие максимально возможное снижение её омического сопротивления

$$K_{я0} \leq \frac{S_{я}}{200l_{я}} = 0,005 \frac{S_{я}}{L_{я}}, \text{ см}^{-1}. \quad (4)$$

Лабораторная установка для получения окислителя феррата натрия состоит из четырех электрохимических ячеек ($N_{я}$), имеющих аноды с площадью поверхности $S_{а} = 400$ см². Расстояние между электродами электрохимической ячейки $L_{я} = 2,5$ см. Ячейки параллельно подключены к источнику тока и имеют величину геометрического коэффициента

$$k_{я} = \frac{L_{я}}{N_{я} S_{а}} = \frac{2,5}{4 \cdot 400} = 0,0016 \text{ см}^{-1}. \quad (5)$$

Поскольку величина геометрического коэффициента электрохимической ячейки установки $k_y = 0,0016 \text{ см}^{-1}$ меньше значения геометрического коэффициента оптимальной ячейки $k_{yo} = 0,005 \text{ см}^{-1}$, разрабатываемая конструкция лабораторной установки для получения окислителя феррата натрия включает в себя электрохимические ячейки совершенного типа.

Величина удельной электропроводности электрохимической ячейки лабораторной установки κ_y в значительной степени зависит от величины удельной электропроводности гидроксида натрия.

На рис. 3 представлены графики удельной электропроводности водного раствора гидроксида натрия в зависимости от его концентрации и температуры [3].

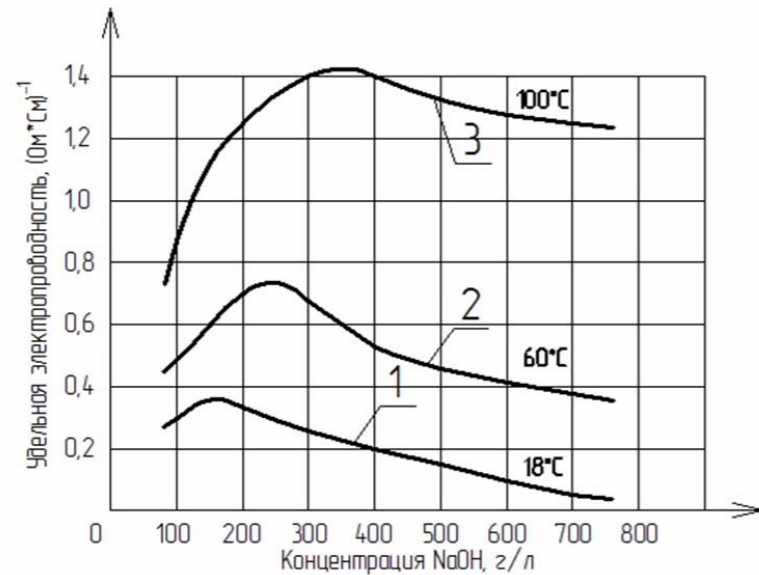


Рис. 3. Графики удельной электропроводности водного раствора гидроксида натрия в зависимости от его температуры и концентрации:

$$1 - t_3 = 18^{\circ}\text{C}; 2 - t_3 = 60^{\circ}\text{C}; 3 - t_3 = 100^{\circ}\text{C}$$

С повышением температуры величина удельной электропроводности раствора гидроксида натрия увеличивается. Как видно из рис. 3, зависимость величины удельной электропроводности раствора гидроксида натрия от его концентрации имеет ярко выраженный максимум, что может быть объяснено увеличением межмолекулярного взаимодействия в растворе электролита, происходящего при повышении концентрации раствора.

Реальная величина удельной электропроводности электрохимической ячейки определяется ее вольт-амперной характеристикой, которая устанавливается в ходе проведения лабораторных исследований.

Лабораторные исследования зависимости значения основной технологической характеристики лабораторной установки – величины удельной электропроводности электрохимической ячейки κ ($\text{Ом}\cdot\text{см}^{-1}$) – от концентрации раствора гидроксида натрия C_p (г/л) и его температуры T ($^{\circ}\text{C}$) проводились на установке, схема которой представлена на рис. 4.

Электрохимическая ячейка, моделирующая электрохимическую ячейку лабораторной установки, имела следующие расчетные размеры: ширина ячейки $B_{\text{мя}}=8$ см; высота ячейки $H_{\text{мя}}=4$ см; расстояние между электродами $L_{\text{мя}}=2,2$ см.

Расстояние между электродами модельной ячейки $l_{\text{мя}}$ равно расстоянию между электродами лабораторной ячейки.

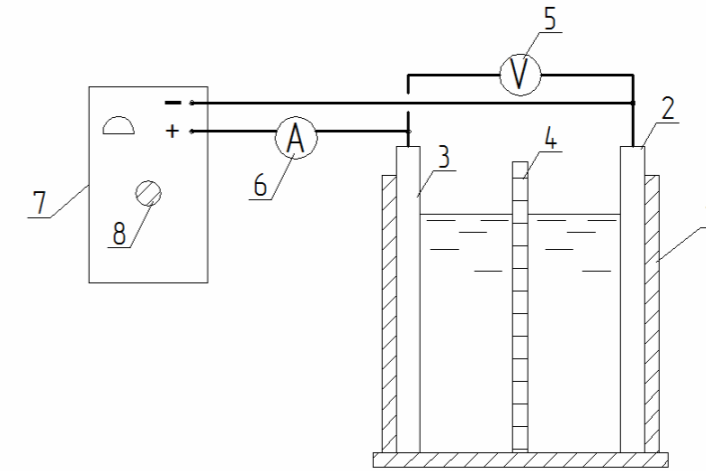


Рис. 4. Схема лабораторной установки для исследования зависимости значения величины удельной электропроводности электрохимической ячейки κ ($\text{Ом}\cdot\text{см}^{-1}$) от концентрации раствора гидроксида натрия C_p (г/л) и его температуры T ($^{\circ}\text{C}$):

1 – электрохимическая ячейка, моделирующая электрохимическую ячейку лабораторной установки; 2 – пластинчатый катод; 3 – пластинчатый анод; 4 – неселективная мембрана; 5 – вольтметр; 6 – амперметр; 7 – источник постоянного тока; 8 – регулятор напряжения

Величину удельной электропроводности модельной ячейки определяли по формуле

$$\kappa_{\text{мя}} = \frac{J}{V} \frac{l_{\text{мя}}}{B_{\text{мя}} \cdot H_{\text{мя}}} = \frac{J}{V} \cdot \frac{2,2}{4 \cdot 8} = 0,0688 \frac{J}{V}, (\text{Ом}\cdot\text{см}^{-1}). \quad (6)$$

Определение зависимости значения основной технологической характеристики лабораторной установки – величины удельной электропроводности электрохимической ячейки κ ($\text{Ом}\cdot\text{см}^{-1}$) – от концентрации раствора гидроксида натрия C_p (г/л) и его температуры T ($^{\circ}\text{C}$) проводили по следующей методике: в электрохимическую ячейку, моделирующую электрохимическую ячейку лабораторной установки 1 (см. рис. 4), заливали водный раствор гидроксида натрия заданной концентрации и температуры, включали источник постоянного тока 7 и снимали показания вольтметра 5 и амперметра 6.

По формуле (5) определяли величину удельной электропроводности модельной ячейки κ ($\text{Ом}\cdot\text{см}^{-1}$).

Результаты экспериментальных исследований зависимости величины удельной электропроводности электрохимической ячейки $\kappa_{\text{мя}}$ ($\text{Ом}\cdot\text{см}^{-1}$) от концентрации раствора гидроксида натрия C_p (г/л) при температуре раствора $T=20^{\circ}\text{C}$ представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Результаты экспериментальных исследований зависимости величины удельной электропроводности электрохимической ячейки $\kappa_{\text{мя}}$ ($\text{Ом}\cdot\text{см}^{-1}$) от концентрации раствора гидроксида натрия C_p (г/л) при его температуре раствора $T=20^{\circ}\text{C}$

Концентрация раствора гидроксида натрия C_p (г/л)	250	375	500	625	750
Величина удельной электропроводности электрохимической ячейки $\kappa_{\text{мя}}$ ($\text{Ом}\cdot\text{см}^{-1}$)	0,20	0,11	0,072	0,05	0,04

Результаты экспериментальных исследований зависимости величины удельной электропроводности электрохимической ячейки $\kappa_{\text{мя}}$ ($\text{Ом}\cdot\text{см}^{-1}$) от концентрации

раствора гидроксида натрия C_p (г/л) при температуре раствора $T=60^\circ\text{C}$ представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Результаты экспериментальных исследований зависимости величины удельной электропроводности электрохимической ячейки $\kappa_{\text{мя}}$ ($\text{Ом}\cdot\text{см}$)⁻¹ от концентрации раствора гидроксида натрия C_p (г/л) при его температуре раствора $T=60^\circ\text{C}$

Концентрация раствора гидроксида натрия C_p (г/л)	250	375	500	625	750
Величина удельной электропроводности электрохимической ячейки $\kappa_{\text{мя}}$ ($\text{Ом}\cdot\text{см}$) ⁻¹	0,57	0,45	0,38	0,33	0,30

Обработка экспериментальных данных, представленных в табл. 1 и 2 методом наименьших квадратов позволяет получить следующие математические зависимости:

1) математическую зависимость величины удельной электропроводности электрохимической ячейки $\kappa_{\text{мя}}$ ($\text{Ом}\cdot\text{см}$)⁻¹ от концентрации раствора гидроксида натрия C_p (г/л) при его температуре $T=20^\circ\text{C}$

$$\kappa_{\text{мя}} = 648C_p^{-1,464}, (\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}; \quad (7)$$

2) математическую зависимость величины удельной электропроводности электрохимической ячейки $\kappa_{\text{мя}}$ ($\text{Ом}\cdot\text{см}$)⁻¹ от концентрации раствора гидроксида натрия C_p (г/л) при его температуре $T=60^\circ\text{C}$

$$\kappa_{\text{мя}} = 14,331C_p^{-0,584}, (\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}; \quad (8)$$

3) математическую зависимость величины удельной электропроводности электрохимической ячейки $\kappa_{\text{мя}}$ ($\text{Ом}\cdot\text{см}$)⁻¹ от концентрации раствора гидроксида натрия C_p (г/л) при его температуре раствора $T(^\circ\text{C})$

$$\kappa_{\text{мя}} = 21,3 \cdot 10^6 \cdot T^{-3,472} C_p^{-17,968T^{-0,837}}, (\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}. \quad (9)$$

Проведенные лабораторные исследования зависимости значения основной технологической характеристики лабораторной установки – величины удельной электропроводности электрохимической ячейки κ ($\text{Ом}\cdot\text{см}$)⁻¹ – от концентрации раствора гидроксида натрия C_p (г/л) и его температуры $T(^\circ\text{C})$ позволяют сделать следующие выводы:

1) С увеличением концентрации гидроксида натрия в электролите с $C_p=250$ г/л до $C_p=750$ г/л величина удельной электропроводности электрохимической ячейки уменьшается с $\kappa = 0,20 - 0,57$ ($\text{Ом}\cdot\text{см}$)⁻¹ до $\kappa = 0,04 - 0,30$ ($\text{Ом}\cdot\text{см}$)⁻¹.

2) Снижение величины удельной электропроводности электрохимической ячейки κ при повышении концентрации гидроксида натрия в электролите может быть объяснено увеличением межмолекулярного взаимодействия в растворе электролита, происходящего при повышении концентрации раствора.

3) С повышением температуры электролита с $T=20^\circ\text{C}$ до $T=60^\circ\text{C}$ величина удельной электропроводности электрохимической ячейки увеличивается с $\kappa = 0,04 - 0,20$ ($\text{Ом}\cdot\text{см}$)⁻¹ до $\kappa = 0,30 - 0,57$ ($\text{Ом}\cdot\text{см}$)⁻¹.

4) Повышение удельной электропроводности электрохимической ячейки при увеличении температуры электролита может быть объяснено увеличением степени диссоциации образующихся в электролите аквакомплексов.

5) Величина удельной электропроводности электрохимической ячейки κ при изменении концентрации раствора гидроксида натрия в электролите с $C_p=250$ г/л до $C_p=750$ г/л и его температуры с $T=20^\circ\text{C}$ до $T=60^\circ\text{C}$ может быть определена с помощью математической зависимости

$$\kappa_{\text{мя}} = 21,3 \cdot 10^6 \cdot T^{-3,472} C_p^{-17,968T^{-0,837}}, (\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}.$$

Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Использование технологии электрохимической активации щелочных реагентов для интенсификации работы локальных очистных сооружений / С.Ю. Андреев, И.А. Яхкинд, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №1. – С. 120–124.

2. Отчет НИОКТР «Разработка, изготовление и испытание лабораторных установок для получения окислителя щелочного раствора феррата натрия в процессе электроактивационной обработки щелочных растворов, используемых на локальных сооружениях промышленного предприятия». Номер государственного учета «НИОКТР» АААА-19-119041690012-0. Дата постановки НИОКТР на учет 09.06.2019 г.

References

1. Andreev, S.Yu. Use of technology of electrochemical activation of alkaline reagents for intensification of work of local treatment facilities / S.Yu. Andreev, I.A. Yakhkind, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2015. – No. 1. – P. 120–124.

2. R & d report "Development, manufacture and testing of laboratory facilities for the production of oxidizer-alkaline solution of sodium ferrate in the process of electroactivation treatment of alkaline solutions used in local facilities of an industrial enterprise". The number of state accounting "R & d" АААА-19-119041690012-0. Date of registration of R & d 09.06.2019.

УДК 728.37

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

Васин Леонид Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент,
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

СОВРЕМЕННАЯ ПАРАДИГМА УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМИ СЕТЯМИ: ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ ЖИЛОГО ДОМА

Л.А. Васин

Показан один из вариантов организации системы управления процессом терморегуляции в смарт-доме. Определены базовые принципы и функции, реализуемые системой управления, и основные системные требования.

Показаны варианты построения системы регулировки температуры и ее необходимые функциональные компоненты, а также сформулированы их системные требования. Разработана структурная схема системы терморегулирования в смарт-доме, и показана ее интеграция с системой интеллектуального управления. Проведен выбор необходимых компонентов для использования в управлении инженерными системами смарт-дома.

Сформулированы принципы управления процессом отопления в жилых помещениях для обеспечения оптимальных климатических условий и энергоэффективности. Показан вариант использования системы управления терморегуляции на основе многотарифных вариантов учета потребления электроэнергии.

Ключевые слова: смарт-дом, система отопления, открытая платформа системы управления, строительство, инженерные системы, сценарии работы, температурные датчики, электрическое водонагревательное устройство

MODERN PARADIGM OF MANAGEMENT OF ENGINEERING NETWORKS: INTELLECTUAL SYSTEM OF THERMAL REGULATION OF A RESIDENTIAL HOUSE

L.A. Vasin

One of the options for organizing the creation of a thermal management process control system in a smart house is shown. The basic principles are defined and the functions implemented by the control system and the basic system requirements are defined.

The options for constructing a temperature control system are shown and the necessary functional components are identified, as well as their system requirements are formulated. The block diagram of the thermal control system in the smart house is developed and integration with the intelligent control system is shown. The selection of the necessary components for their use in the management of engineering systems of a smart home has been carried out.

The principles of controlling the heating process in residential premises are formulated to ensure optimal climatic conditions and energy efficiency. The option of using a thermoregulation control system based on multi-tariff options for metering electricity consumption is shown.

Keywords: smart house, heating system, open platform control system, construction, engineering systems, operation scenarios, temperature sensors, electric water heating device

Введение

Комфортные условия пребывания людей в жилом помещении обеспечиваются созданием и поддержанием оптимальных микроклиматических показателей. Оптимальные параметры не должны вызывать дискомфорт, сказываться на трудоспособности и самочувствии особенно в неблагоприятные времена года. Допустимые нормы микроклиматических параметров регламентированы в СанПиН 2.1.2.2645-10 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях» и ГОСТ 30494–2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях». Согласно им основными параметрами, подлежащими регулированию с помощью инженерных систем, являются значения температуры и влажности. Для этого используют системы климат-контроля, которые выполняют комплексный мониторинг и регулирование параметров отопления, кондиционирования, ионизирования и самопоглощения [1, 2].

Современные решения по обеспечению климат-контроля являются мультисистемными, в которые входят следующие функциональные системы: кондиционирования, вентиляции и отопления. Система кондиционирования обеспечивает автоматическое поддержание постоянной температуры и влажности с отдельной регулировкой по каждому помещению или в целом по зданию. Система отопления необходима для поддержания оптимальной температуры внутри помещений с помощью установленных в них нагревательных приборов. К ним относятся: теплый пол, водяные и электрические радиаторы, а также масляные радиаторы. Выбор необходимых элементов обусловлен особенностями выбора энергообеспечения и реализации инженерных систем. Система вентиляции обеспечивает контроль за влажностью и температурой воздуха и обеспечивает их регулирование за счет движения воздушных потоков в зависимости от временных, климатических и других параметров.

Создание микроклиматических условий является сложным процессом, который напрямую зависит от количества анализируемых и регулируемых параметров, а также датчиков, проводящих анализ параметров. Чем сложнее климатическая система, тем сложнее адекватно оценивать микроклимат и осуществлять качественную регулировку в ручном режиме. Для этого используют автоматизированные системы климат-контроля, часто интегрированные в общую схему управления умным домом. Это наиболее оптимальное решение, так как оно позволяет взаимодействовать с другими элементами инженерных систем, осуществлять дистанционный способ управления и применять сложные сценарии управления. Единая система управления, в отличие от локальной, позволяет не только фиксировать параметры и управлять климатическими приборами, но и проводить анализ и на его основе решать проблему обеспечения климатических условий для проживающих. Для этого используются центры управления, обеспечивающие интеграцию анализирующего оборудования, и исполнительные механизмы для управления компонентами инженерных систем. Интеграция климат-контроля является основной, или базовой, частью построения системы «Умный дом», так как создание оптимальных микроклиматических условий очень важно для проживания людей в жилых помещениях.

Первоочередной системой, с которой начинается реализация системы умного дома, является система отопления. От ее функционирования зависит температура в помещениях и комфортные условия нахождения в них людей. В её состав входят следующие компоненты [3]:

1. Котел.
2. Радиаторы отопления.
3. Теплый пол.
4. Система трубопроводов.
5. Циркуляционный насос (в системах с принудительной циркуляцией).
6. Элементы температурной регулировки.

Котел осуществляет нагрев теплоносителя, который циркулирует по системе трубопроводов и отопительным приборам, тем самым осуществляя обогрев жилых поме-

щений. В такой схеме базовым элементом является котел. Существуют следующие типы котлов:

- электрический;
- газовый;
- дровяной;
- жидкотопливный.

Каждый из них обеспечивает выполнение функции нагрева теплоносителя до необходимой температуры, различия только в типе используемого топлива. Выбор необходимого котла производится исходя из местных условий обеспечения топливом. При отсутствии системы газоснабжения широкое применение получили электрические котлы.

Радиаторы отопления монтируются в жилых комнатах и осуществляют обогрев помещения. Радиаторы подключаются к системе трубопроводов и оснащаются регулировочными элементами для управления циркуляцией теплоносителя. Регулировочные элементы могут функционировать как автономно, так и под управлением системы управления умного дома.

Теплый пол представляет собой систему нагревательных элементов, расположенных внутри пола, который является отопительным прибором. Он предназначен для повышения эффективности функционирования радиаторного отопления или полной замены старой системы. Существует два типа теплого пола: водяной и электрический. Выбор типа теплого пола производится в зависимости от места применения (все помещения или локальная установка), этажности дома и типа напольного покрытия.

В водяном варианте исполнения теплого пола используется жидкий теплоноситель, при этом возможен вариант совместного использования единого нагревательного котла с отопительными радиаторами. В этом случае они могут выступать в качестве дополнительных нагревательных элементов. Основную задачу нагрева помещения осуществляет система теплого пола.

В электрическом варианте исполнения нагревательный элемент представляет собой электрический кабель или пленку. Кабельный вариант необходимо монтировать внутри пола, пленочный допустимо укладывать под напольное покрытие, что делает возможным создание локальных зон нагрева пола.

Создание эффективной системы отопления базируется на принципе регулирования величины нагрева каждого жилого помещения с помощью основной и вспомогательной отопительных систем. Для этого в ее состав включают контрольно-измерительные устройства и элементы управления теплоносителем или подачей электрического тока. Такие элементы функционируют под управлением как локальных систем, так и единой системы управления умным домом. Последний вариант является предпочтительным, так как позволяет использовать более сложные сценарии управления системой отопления.

Важным аспектом построения системы отопления с использованием автоматизированной системы управления является экономическая эффективность. Такая система должна обеспечивать экономичное потребление энергии, необходимой для поддержания климатических параметров в жилых помещениях. Она позволяет поддерживать заданную температуру с минимальными пороговыми изменениями, что обеспечивает оптимальное расходование энергоносителей. Программирование сценариев позволяет не только использовать в создании управляющих сценариев температурные параметры, но и анализировать поведение проживающих, например поднимать температуру перед приходом проживающих, а также автоматически снижать её в пустых помещениях. Такие процессы происходят полностью в автоматическом режиме. Наличие различных сценариев работы, а также дистанционное ручное управление системой с помощью мобильных устройств позволяют сделать систему отопления энергоэффективной.

Основная часть

Основными критерием эффективной работы системы отопления является достижение комфортных климатических параметров в помещениях дома при минимальной возможной температуре теплоносителя и с минимальным расходом энергии для его нагрева. При этом максимальная энергоэффективность обеспечивается при обработке системой управления различных параметров, например данных с погодной станции, датчиков комнатной температуры, времени суток, а также возможности гибкой регулировки контуров отопительных элементов.

Наиболее эффективной системой отопления в индивидуальном доме является комбинированное использование теплого пола с дополнительными радиаторами отопления. Теплый пол выступает как основная система отопления, но, обладая некоторой инертностью, не позволяет быстро поднимать температуру воздуха. Он состоит из системы уложенных в полу труб, подключенных к нагревательному котлу. В них циркулирует теплоноситель, нагретый до необходимой температуры, обогревающий не только поверхность пола, но и воздух в помещении. Вспомогательной частью служит система радиаторов, обычно устанавливаемых под оконными проемами. Это позволяет организовать быстрый локальный нагрев в помещениях. При такой схеме организуется отдельный отопительный контур, к которому подключаются радиаторы отопления, установленные в комнатах. Это возможно при использовании распределительных устройств, подключенных к нагревательному котлу [3].

В качестве нагревательного котла, интегрированного в системы управления умного дома, целесообразнее применять электрокотел, в котором нагрев теплоносителя может осуществляться с минимальных величин. Это невозможно при использовании газовых котлов, у которых температура нагрева теплоносителя зависит от интенсивности горения газовой горелки. В системе с электрическим котлом с помощью нагревательных элементов можно регулировать значение температуры теплоносителя в более широком диапазоне температур. Кроме этого, электрический тип отопления является более безопасным для потребителя, при его использовании отсутствует необходимость контроля утечек газа и оборудования системы дымоходов. Главным недостатком использования электрического отопительного котла является более высокая стоимость электроэнергии по сравнению с газом. Отчасти это компенсируется более низкой стоимостью электрического котла и монтажных работ по его установке.

Основным способом экономии является использование интеллектуального управления процессом терморегулирования в зависимости от временных и ситуационных сценариев, реализуемых автоматизированной системой умного дома [3, 5, 6]. Для обеспечения процесса поддержания пороговой температуры (терморегуляции) в каждом из помещений устанавливают датчики температуры и влажности и локальные термостаты. Наибольшей эффективности можно достичь при подключении климатических датчиков к основной управляющей системе, которая управляет подачей теплоносителя в каждую комнату по основному и дополнительным контурам отопительных приборов (теплый пол и настенные радиаторы).

Управляющие сценарии учитывают множество факторов: климатические условия, временные интервалы, поведение проживающих. Для эффективного управления системой отопления предложены следующие управляющие алгоритмы:

1. Дневной режим с присутствием жильцов.
2. Дневной режим с отсутствием жильцов.
3. Ночной режим с присутствием жильцов.
4. Ночной режим с отсутствием жильцов.
5. Пробуждение.
6. Сон.
7. Быстрый нагрев.
8. Гости.

Каждый из алгоритмов индивидуально учитывает наличие людей в помещении, время суток и температуру воздуха. На основании полученных данных и по заложенному сценарию происходит подача управляющего сигнала на включение или

выключение нагревательного элемента. В табл. 1 приведены алгоритмы управления отоплением индивидуального жилого дома.

Т а б л и ц а 1

Параметры управляющих алгоритмов

Название режима	Работа основного контура	Работа вспомогательного контура	Параметры регулировки температуры	Временные интервалы
Дневной режим с присутствием жильцов	Отключен	Включен	Поддержание в заданных пределах	Дневное время
Дневной режим с отсутствием жильцов	Отключен	Отключен	Поддержание в заданных пределах	Дневное время
Ночной режим с присутствием жильцов	Включен	Отключен	Нагрев до температуры 21-23 градуса	Ночное время
Ночной режим с отсутствием жильцов	Включен	Отключен	Поддержание в заданных пределах	Ночное время
Пробуждение	Отключен	Включен	Нагрев до температуры 23 градуса	С 6 до 7 часов утра
Гости	Отключен	Включен	Нагрев до температуры 23 градуса	За 30 минут до прихода людей
Быстрый нагрев	Включен	Включен	Нагрев до температуры 23 градуса	Любое время суток

При использовании набора сценариев управления системой отопления становится возможным оптимизировать управление температурой в жилых помещениях в зависимости от времени суток и поведения жильцов, гораздо более эффективно организовывать поддержание температуры в рамках необходимых температур и максимально использовать возможности теплого пола как системы с большой инертностью. В этом случае дополнительный контур отопления играет роль оперативного (быстрого) нагрева помещения.

Сейчас доступны тарифы на электроэнергию, дифференцированные в зависимости от времени суток. Эксплуатация отопительных элементов основного контура в ночное время позволяет использовать более дешевую электроэнергию. В табл. 2 представлены тарифы на электроэнергию, действующие на территории г. Пензы при условии наличия электроплиты.

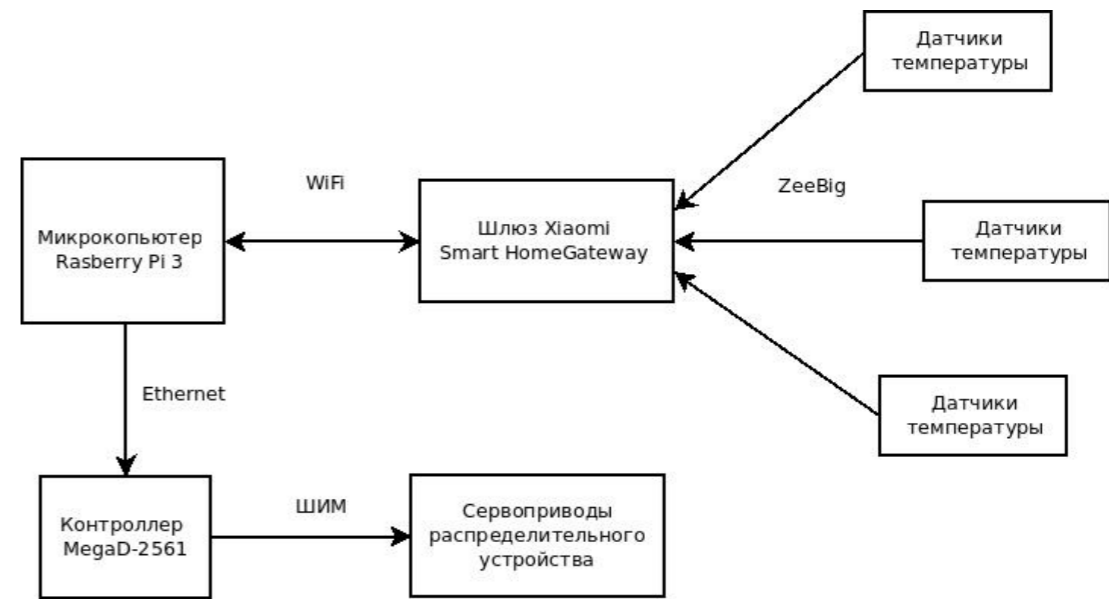
Т а б л и ц а 2

Тарифы на электроэнергию в г. Пензе для населения, использующего электрические плиты

Показатель (группы потребителей с разбивкой по ставкам и дифференциацией по зонам суток)	Цена в рублях за кВт·ч	
	с 01.01.2019 по 30.06.2019	с 01.07.2019 по 31.12.2019
Одноставочный тариф	2,41	2,46
Одноставочный тариф, дифференцированный по двум зонам суток		
Дневная зона с 7:00 до 23:00	2,77	2,83
Ночная зона с 23:00 до 7:00	1,73	1,77

При использовании электрической плиты ночной тариф отличается от дневного на 1,06 рубля за 1 кВт электроэнергии. Поэтому использование основного контура системы отопления гораздо целесообразнее в ночное время, так как на нагрев теплоносителя будет использоваться электроэнергия по более низкой цене.

Для интеллектуального управления отоплением предлагается решение, интегрированное в общую систему управления. Она состоит из следующих компонентов: климатические датчики, регулирующий механизм и центр автоматизированного управления. На рисунке показана структурная схема системы управления отоплением.



Структурная схема системы управления отоплением

В качестве климатических датчиков использованы решения фирмы Xiaomi Aqara temperature humidity sensor. Это многофункциональный комплекс, состоящий из датчиков температуры, влажности и атмосферного давления. Он предназначен для совместной работы с компонентами для автоматизации жилого дома Xiaomi. Датчик умеет измерять температуру, влажность и атмосферное давление в помещениях дома, где он установлен. Используя специализированный протокол ZeeBig, датчики подключаются к многофункциональному шлюзу Xiaomi Smart Home Gateway 2. Это устройство предназначено для объединения устройств (датчики, исполнительные механизмы, розетки), работающих по энергоэффективному протоколу ZigBee, в единую сеть с управлением через мобильные устройства, управляющие сценарии или центры автоматизации, например проект MajorDomo.

Для изменения температуры теплоносителя в контурах использованы электрические сервоприводы, установленные на распределительном устройстве. Сервоприводы подключены к управляющему контроллеру, в качестве которого может использоваться, например, MegaD-2561 [7]. Контроллер взаимодействует с центральным управляющим компьютером, на котором установлено программное обеспечение MajorDomo. Подключение управляющего контроллера к нему осуществляется посредством беспроводного Wi-Fi или проводного Ethernet-подключения.

Управление сервоприводами, расположенными на распределительной гребенке, осуществляется посредством ШИМ каналов управления контроллера. Сервоприводы осуществляют регулировку запорного клапана для изменения скорости циркуляции теплоносителя в контурах.

Для взаимодействия с исполнительными устройствами используется открытый проект MajorDomo. На его основе разрабатываются сценарии управления системой отопления, а также организуется интеграция с шлюзом климатических датчиков через беспроводной протокол Wi-Fi. Центр управления анализирует показания (значения температуры и влажности) подключенных через ZeeBig-шлюз климатических

датчиков и на основе используемого в данное время сценария производит управление сервоприводами контуров отопления. Таким образом, происходит поддержание комнатных температур в необходимых пределах.

В качестве основной системной информационной платформы используется микрокомпьютер Raspberry Pi 3 со следующими системными характеристиками: 64-битный 4-ядерный ARM Cortex-A53 процессор с тактовой частотой 1,2 ГГц на однокристалльном чипе Broadcom BCM2837. Данный микрокомпьютер имеет открытую архитектуру, это позволяет подключать к нему любые устройства по проводному и беспроводному подключениям. В качестве базовой операционной системы используется специальная версия Linux. Преимуществом создания главного управляющего центра на открытой программной платформе является потенциальное расширение программных возможностей системы управления умным домом, например взаимодействие различного оборудования отопительной системы и горячего водоснабжения при использовании двухконтурных нагревательных котлов.

Реализация системы отопления на основе интеллектуальной системы управления позволяет реализовать поддержку необходимых климатических характеристик окружающей среды в помещениях дома на основе временных и ситуационных сценариев. Такая система отопления является энергоэффективной, так как использует оптимальное количество электроэнергии. Использование дневного и ночного тарифов на оплату электроэнергии позволяет снизить денежные затраты на отопление жилого дома, что делает его более энергоэффективным и экономически привлекательным для проживающих.

Выводы:

1. Разработана структурная организация системы управления теплоснабжением жилого дома, управляемого интеллектуальной системой.
2. Определены необходимые климатическое оборудование, системная аппаратная платформа и программное обеспечение.
3. Дается принцип управления тепловым контролем на основе анализа климатических датчиков внутри помещений с учетом ситуационных условий.
4. Приведен прогноз использования оборудования Xiaomi совместно с открытым проектом MiHome для реализации автоматизированной системы управления теплоснабжением умного дома.

Список литературы

1. Устинов, В.В. Микроклимат и качество воздуха в офисных зданиях / В.В. Устинов // Здания высоких технологий. – 2015. – № 1. – С. 6–13.
2. Крийт, В.Е. Основные проблемы гигиенического нормирования микроклимата жилых и общественных зданий / В.Е. Крийт, Ю.Н. Сладкова // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2018. – № 2, т. 13. – С. 843–853.
3. Назарова, В.И. Современные системы отопления / В.И. Назарова. – М.: РИПОЛ классик, 2011. – 320 с.
4. Гололобов, В.Н. Умный дом своими руками / В.Н. Гололобов. – М.: НТ-Пресс, 2007. – 416 с.
5. Сопер, М.Э. Практические советы и решения по созданию «Умного дома» / М.Э. Сопер. – М.: НТ Пресс, 2007. – 432 с.
6. Борисов, С.А. Автоматизированные системы отопления частного дома / С.А. Борисов // Красная линия. – 2008.
7. Жучков, А.С. Автоматизация тепловых пунктов и систем отопления / А.С. Жучков // Энергетика региона. – 2004.

Referances

1. Ustinov, V.V. Microclimate and air quality in office buildings / V.V. Ustinov // Buildings of high technologies. – 2015. – No. 1. – P. 6–13.
2. Kriit, V.E. Main problems of hygienic regulation of microclimate of residential and public buildings / V.E. Kriit, Yu.N. Sladkova // Health-the basis of human potential: problems and solutions. – 2018. – № 2, vol. 13. – P. 843–853.
3. Nazarova, V.I. Modern heating systems / V.I. Nazarova. – M.: RIPOL classic, 2011. – 320 p.
4. Gololobov, V.N. Do a smart house yourself / V.N. Gololobov. – M.: NT Press, 2007. – 416 pp.
5. Soper, M.E. Practical tips and solutions for creating a smart house / M.E. Soper. – M.: NT Press, 2007. – 432 p.
6. Borisov, S.A. Automated heating systems of a private house / S.A. Borisov // Krasnaya Liniya. – 2008.
7. Zhuchkov, A.S. Automation of calorific points and heating systems / A.S. Zhuchkov // Power engineering of the region. – 2004.

УДК 621.6.036

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Россия, 410054, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77,
тел.: (8452) 51-50-18**Усачев Александр Прокофьевич**,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Теплогасоснабжение,
вентиляция, водообеспечение и прикладная
газодинамика»
E-mail: usachev-ap@mail.ru

АО «Гипрониигаз».

Россия, 410012, 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.ruАО «Ревизия Контроллинг Консалтинг»
Россия, г. Саратов, тел. (8452) 74-94-74**Пикалов Александр Анатольевич**,
аспирант, эксперт по надзору
E-mail: pikalov-181978@yandex.ruSaratov State Technical University
named after Gagarin Yu.A.Russia, 410054, 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

Giproniigas PLC

Russia, 410012, Saratov,
54, Kirov Avenue,
tel.: (845-2) 74-94-95**Shurayts Alexander Lazarevich**,
Doctor of Sciences, General Director of
Giproniigas PLC
E-mail: Shurait@niigaz.ru**Biryukov Alexander Valeryevich**,
Candidate of Sciences, Director of the
research center of Giproniigas PLC
E-mail: Biryukov@niigaz.ruAudit, Controlling, Consulting PLC
Russia, Saratov, tel. (8452) 74-94-74**Homutov Anton Olegovich**,
Postgraduate, Expert on supervision
E-mail: pikalov-181978@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НА ФИЛЬТРУЮЩИХ КАРТРИДЖАХ ГРУБОЙ И ТОНКОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВОГО ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ФИЛЬТРА

А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, А.В. Бирюков, А.А. Пикалов

Приводится математическая модель по оптимизации газодинамических потерь на фильтрующих картриджах грубой и тонкой очистки газового двухступенчатого фильтра. Математическая модель позволяет минимизировать затраты в операции по удалению твердых частиц из фильтрующих картриджах грубой и тонкой очистки газового фильтра.

Ключевые слова: природный газ, математическая модель, оптимизация, газодинамические потери, фильтрующие картриджи, грубая и тонкая очистка, двухступенчатый фильтр

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL FOR OPTIMIZATION OF GAS-DYNAMIC LOSSES ON THE FILTER CARTRIDGE COARSE AND FINE GAS CLEANING OF TWO-STAGE FILTER

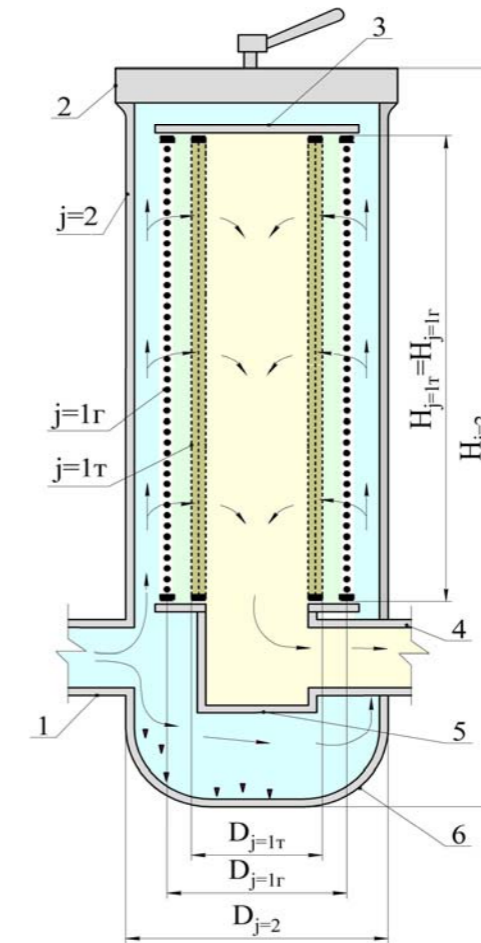
A.P. Usachev, A.L. Shurait, A.V. Biryukov, A.A. Pikalov

The article presents a mathematical model for the optimization of gas dynamic losses on the filter cartridges of coarse and fine gas two-stage filter. The mathematical model allows to minimize the cost of the operation to remove particles from the filter cartridges and fine cleaning of the gas filter.

Keywords: natural gas, mathematical model, optimization, gas dynamic losses, filter cartridges, coarse and fine cleaning, two-stage filter

1. Актуальность задачи обоснования величины газодинамических потерь на фильтрующих картриджах грубой и тонкой очистки

В настоящее время в головных пунктах редуцирования газа (ПРГ) получила распространение двухступенчатая очистка газа с применением цилиндрических фильтрующих картриджей (ЦФК) грубой и тонкой очистки, которые являются наиболее экономичными для выполнения этих целей до значения их пропускной способности, равной 100,0–130,0 тыс. м³/ч [1]. Расчетная схема газового фильтра большой пропускной способности приведена на рисунке. В применяемых конструкциях газовых фильтров удаление твердых частиц с поверхности фильтрующего картриджа грубой очистки или его замена для ступени тонкой очистки осуществляется при достижении газодинамических потерь на нем до максимально допустимых значений ΔZ_{τ} [2]. В настоящее время с появлением на отечественном рынке большого количества газовых фильтров отдельные производители и эксплуатационные организации без должного обоснования устанавливают различные значения ΔZ_{τ} , с тенденцией в сторону их увеличения, что приводит к возникновению аварийных ситуаций и инцидентов, сопровождающихся повреждением фильтрующих картриджей. В связи с этим задача технико-экономического обоснования значения максимально допустимых газодинамических потерь ΔZ_{τ} на ЦФК грубой и тонкой очистки является весьма актуальной.



Структурная схема устройства с ЦФК грубой и тонкой очистки, установленными в объеме одного корпуса:

1, 4 – патрубki на входе и выходе газа; 2 – крышка быстросъемная; 3 – крышка для ЦФК грубой и тонкой очистки; 5 – стакан; 6 – эллиптическое днище для сбора механических примесей;
 $j=1r$ – ЦФК грубой очистки; $j=1t$ – ЦФК тонкой очистки; $j=2$ – корпус фильтра

2. Обоснование управляющего параметра, оказывающего существенное влияние на эксплуатационные затраты и капитальные вложения в фильтрующие картриджи грубой и тонкой очистки

Проведенный анализ показывает, что величина газодинамических потерь ΔZ_τ на ЦФК оказывает существенное влияние, с одной стороны, на значения эксплуатационных затрат, связанных с удалением твердых частиц в ступени грубой или тонкой очистки в течение года, а с другой стороны, на величину капитальных вложений в фильтр, необходимых для обеспечения пропускания максимального расхода газа в любой момент эксплуатации, включая и момент максимального засорения поверхностей ЦФК твердыми частицами.

Действительно, с одной стороны, увеличение газодинамических потерь до значения ΔZ_τ на ЦФК приводит к уменьшению эксплуатационных затрат $I(\Delta Z_\tau)$ вследствие сокращения количества операций по удалению из фильтра твердых частиц в течение года $n_{уд}$ и увеличения продолжительности работы фильтра τ между двумя соседними операциями по удалению частиц. Количество операций по удалению частиц, проводимых в течение года, определяется как отношение числа дней в году $\tau_{год}$ к продолжительности периода τ между двумя очередными операциями по удалению твердых частиц из фильтра для ступени грубой очистки или замене ЦФК на новый для ступени тонкой очистки, то есть $n_{уд} = \tau_{год} / \tau$. С другой стороны, увеличение газодинамических потерь до значения ΔZ_τ на ЦФК свидетельствует об увеличении степени засорения ЦФК. При росте степени засорения ЦФК сокращается его пропускная способность, то есть расход газа, проходящий через фильтрующий картридж. Пропуск максимального расхода газа в любой момент эксплуатации с целью сохранения объема его поставок является основным условием нормальной работы фильтра. В этом случае для обеспечения максимального расхода газа через ЦФК в момент времени τ , непосредственно предшествующий удалению из него механических примесей, необходимо увеличить его фильтрующую площадь, то есть диаметр $D_{j=1}$ и объем фильтра для вмещения этой увеличенной площади. В результате для обеспечения максимального расхода необходимо увеличить капвложения в ЦФК и корпус фильтра. Таким образом, прирост капвложений ΔK_j для обеспечения максимального расхода становятся функцией газодинамических потерь ΔZ_τ в момент времени $\tau_{уд}$ вследствие увеличения степени засорения сетки, то есть $\Delta K_j(\Delta Z_\tau)$.

Приведенный выше анализ показал, что при увеличении газодинамических потерь ΔZ_τ вследствие более продолжительного периода засорения ЦФК эксплуатационные затраты $I(\Delta Z_\tau)$ уменьшаются, а капитальные вложения $\Delta K_j(\Delta Z_\tau)$, связанные с необходимостью увеличения размеров $D_{j=1}$ и $H_{j=1}$ для обеспечения пропускной способности фильтра, увеличиваются, и наоборот. Таким образом, имеется два противоборствующих параметра $I_j(\Delta Z_\tau)$ и $\Delta K_j(\Delta Z_\tau)$, которые противоположно зависят от изменения газодинамических потерь ΔZ_τ на ЦФК вследствие его засорения. Комплексный учет влияния эксплуатационных затрат $I(\Delta Z_\tau)$ и капитальных вложений $\Delta K_j(\Delta Z_\tau)$ на интегральные затраты в фильтр требует создания достоверных методов по оптимизации газодинамических потерь на ЦФК, базирующихся на положениях системного подхода, основным из которых является разработка математической модели.

3. Разработка математической модели по оптимизации газодинамических потерь на фильтрующих картриджах грубой и тонкой очистки

3.1. Проведенный анализ показывает, что изменение газодинамических потерь на ЦФК грубой очистки не оказывает влияния на изменение затрат в ЦФК тонкой очистки, и наоборот, изменение газодинамических потерь на ЦФК тонкой очистки не влияет на изменение затрат в ЦФК грубой очистки. В связи с этим общую задачу оптимизации согласно методу декомпозиции можно разделить на две независимые задачи: 1) оптимизация газодинамических потерь на ЦФК грубой очистки; 2) оптимизация газодинамических потерь на ЦФК тонкой очистки.

На расчетной структурной схеме, справедливой для каждой из этих двух задач, фильтр показан как система, состоящая из двух основных элементов: 1) ЦФК грубой (Γ) или тонкой (τ) очистки ($j=1\Gamma(\tau)$); 2) корпус фильтра ($j=2$). Оптимизация газодинамических потерь на ЦФК грубой и тонкой очистки осуществляется отдельно согласно предлагаемой математической модели.

3.2. Математическая модель определения оптимальной величины газодинамических потерь ΔZ_τ на ЦФК включает структурную схему (см. рисунок), целевую функцию интегральных затрат (1), (2) и (5)–(9), систему ограничений управляющих параметров (3), балансовое уравнение (4).

В качестве критерия оптимальности целевой функции принят минимум интегральных затрат в фильтр [3]:

$$Z_i = \sum_j (1 + \varphi_d) \Delta K_j(\Delta Z_\tau) + \sum_{t=1}^T a_t \left[\sum_{m=1}^{m=3} \varphi_{m,3} (1 + \varphi_d) \sum_j \Delta K_j(\Delta Z_\tau) + \sum_{m=4}^M I_m(\Delta Z_\tau) \right] = \min; \quad (1)$$

$$a_t = (1 + E)^{-t}; j = \overline{1, J}; m = \overline{1, M}; t = \overline{1, T}, \quad (2)$$

где t – расчетный год эксплуатации фильтра, год; T – срок службы фильтра, год, принимается равным сроку службы ПРГ, $T=40$ лет; a – коэффициент дисконтирования, год; j – количество элементов капитальных вложений в газовый фильтр; E – норма дисконта, принимаемая равной средней кредитной ставке банка в условиях устойчивой рыночной экономики, $E=0,12$ год⁻¹; φ_d – доля отчислений от $\Delta K_j(\Delta Z_\tau)$ на монтаж j -го элемента газового фильтра, д.е; ΔZ_τ – газодинамические потери на ЦФК в момент времени τ вследствие засорения сетки твердыми частицами, кПа; $\Delta K_j(\Delta Z_\tau)$ – прирост капвложений в изготовление j -го элемента фильтра в момент достижения газодинамических потерь ΔZ_τ , руб.; m – количество элементов эксплуатационных затрат для газового фильтра; $\varphi_{m,3}$ – доля годовых отчислений от $K_j(\Delta Z_\tau)$ на эксплуатацию j -го элемента газового фильтра, связанная с его обслуживанием, текущим и капитальным ремонтом, 1/год; $I_m(\Delta Z_\tau)$ – m -й вид эксплуатационных затрат, связанный с количеством удалений твердых частиц из фильтра в течение года, которые осуществляются в момент времени τ , при значении газодинамических потерь ΔZ_τ , руб./год.

3.3. Система ограничений управляющего параметра целевой функции (1):

$$\Delta Z_{\tau, \min} \leq \Delta Z_\tau \leq \Delta Z_{\tau, \max}, \quad (3)$$

$\Delta Z_{\tau, \min}$, $\Delta Z_{\tau, \max}$ – минимальное и максимальное значения интервала изменения параметра ΔZ_τ исходя из режима засорения ЦФК твердыми частицами соответственно, кПа. Здесь $\Delta Z_{\tau, \min}, \dots, \Delta Z_{\tau=0}, \dots, \Delta Z_\tau, \dots, \Delta Z_{\tau, \max}$ – значения газодинамических потерь на ЦФК в интервале $\Delta Z_{\tau, \min} \leq \Delta Z_\tau \leq \Delta Z_{\tau, \max}$. Поскольку минимальные значения газодинамических потерь $\Delta Z_{\tau, \min}$ имеют место на фильтрующем чистом картридже, еще не засоренном твердыми частицами, в момент времени $\tau=0$, то можно принять $\Delta Z_{\tau, \min} = \Delta Z_{\tau=0}$. В качестве максимального значения $\Delta Z_{\tau, \max}$ приняты предельные газодинамические потери $\Delta Z_{\tau, \text{пр}}$, после достижения которых начинается деформация и разрушение ЦФК. В качестве предельной согласно [4] принята величина $\Delta Z_{\tau, \max} = \Delta Z_{\tau, \text{пр}} = 20$ кПа.

3.4. Уравнение баланса предлагаемой математической модели формулируется следующим образом. Пропускная способность фильтра $V_{\Delta Z_\tau}$ при достижении степени засорения ЦФК соответствующей максимально допустимому значению газодинамических потерь ΔZ_τ должна быть не менее расчетного расхода природного газа, установленного исходя из запланированных поставок V_τ в период времени от $\tau=0$ до $\tau_{\text{пр}}$:

$$V_{\Delta Z_\tau} = \sum_{\tau=0}^{\tau=\tau_{\text{пр}}} V_\tau, \quad (4)$$

где $V_{\Delta Z_\tau}$ – пропускная способность фильтра при достижении степени засорения ЦФК, соответствующей максимально допустимому значению газодинамических потерь ΔZ_τ , м³/ч; $\tau=0$ – момент времени, соответствующий началу эксплуатации после очередного

удаления твердых частиц с поверхностью ЦФК, ч; τ – момент времени, соответствующий концу эксплуатации перед очередным удалением твердых частиц с поверхностью ЦФК, ч; V_τ – максимальный расчетный расход газа, установленный для периода времени τ при его изменении от $\tau=0$ до $\tau_{пр}$, исходя из запланированных поставок газа, м³/ч.

3.5. Прирост капитальных вложений в фильтрующий картридж $J=1\Gamma(\tau)$ в момент времени τ , непосредственно предшествующий удалению из него механических примесей, необходимый для пропуска через него максимального часового расхода газа, определяются следующим образом:

$$\Delta K_{j=1\Gamma(\tau)}(\Delta Z_\tau) = \kappa_{j=1\Gamma(\tau)} [F_{j=1\Gamma(\tau)}(\Delta Z_\tau) - F_{j=1\Gamma(\tau)}(\Delta Z_{\tau=0})]; \quad (5)$$

$$F_{j=1\Gamma(\tau)}(\Delta Z_\tau) = \pi \cdot D_{j=1\Gamma(\tau)}(\Delta Z_\tau) \cdot H_{j=1\Gamma(\tau)}(\Delta Z_\tau);$$

$$F_{j=1\Gamma(\tau)}(\Delta Z_{\tau=0}) = \pi \cdot D_{j=1\Gamma(\tau)}(\Delta Z_{\tau=0}) \cdot H_{j=1\Gamma(\tau)}(\Delta Z_{\tau=0}), \quad (6)$$

$\kappa_{j=1\Gamma(\tau)}$ – удельные капитальные вложения в изготовление ЦФК грубой (Γ) или тонкой (τ) очистки, руб/м²; $D_{j=1\Gamma(\tau)}(\Delta Z_\tau)$, $H_{j=1\Gamma(\tau)}(\Delta Z_\tau)$ – соответственно диаметр и высота ЦФК, необходимые для пропуска через него максимального расхода газа, применительно к ЦФК, засоренному твердыми частицами, до значения газодинамических потерь ΔZ_τ в момент времени τ , непосредственно предшествующий удалению из него механических примесей, м; $D_{j=1\Gamma(\tau)}(\Delta Z_{\tau=0})$, $H_{j=1\Gamma(\tau)}(\Delta Z_{\tau=0})$ – соответственно диаметр и высота ЦФК, необходимые для пропуска максимального расхода газа, применительно к ЦФК, вообще не засоренному твердыми частицами, при значении газодинамических потерь $\Delta Z_{\tau=0}$ в момент времени $\tau=0$, то есть сразу после очередного их удаления, м; $F_{j=1\Gamma(\tau)}(\Delta Z_\tau)$, $F_{j=1\Gamma(\tau)}(\Delta Z_{\tau=0})$ – соответственно полная поверхность ЦФК грубой (Γ) или тонкой (τ), необходимая для пропуска через него максимального расхода газа, применительно к ЦФК, засоренному твердыми частицами и чистому фильтрующему картриджу до значения газодинамических потерь на нем ΔZ_τ и $\Delta Z_{\tau=0}$, м².

3.6. Прирост капитальных вложений в корпус фильтра $J=2$, необходимый для пропуска через него максимального расхода газа, определяются следующим образом:

$$\Delta K_{j=2}(\Delta Z_\tau) = K_{j=2}(\Delta Z_\tau) - K_{j=2}(\Delta Z_{\tau=0}), \quad (7)$$

$K_{j=2}(\Delta Z_\tau)$, $K_{j=2}(\Delta Z_{\tau=0})$ – соответственно капитальные вложения в корпус фильтра, необходимые для пропуска через него максимального расхода газа, применительно к ЦФК, засоренному твердыми частицами, и чистому ЦФК до значений газодинамических потерь ΔZ_τ и $\Delta Z_{\tau=0}$, руб.

3.7. Эксплуатационные затраты, связанные с капитальным ($m=1$), текущим ($m=2$) ремонтами и обслуживанием ($m=3$), определяются с учетом (1) как доля годовых отчислений на эксплуатацию от $K_j(\Delta Z_\tau)$ по формуле

$$\left[\sum_{m=1}^{m=3} \varphi_{m,3} (1 + \varphi_d) \sum_j \Delta K_j(\Delta Z_\tau) + \sum_{m=4}^M I_m(\Delta Z_\tau) \right]. \quad (8)$$

3.8. Эксплуатационные затраты, связанные с регенерацией ЦФК, то есть с его очисткой от твердых частиц, определяются по формуле

$$\sum_{m=4}^{m=9} I_m(\Delta Z_\tau) = \frac{\tau_{год}}{\tau(\Delta Z_\tau)} \cdot (I_4 + I_5 + I_6 + I_7 + I_8 + I_9), \quad (9)$$

где $\tau_{год}$ – число суток в году; τ – продолжительность работы фильтра между двумя соседними операциями по удалению из него твердых частиц, сут; I_4 , I_5 , I_6 , I_7 , I_8 , I_9 – затраты на удаление механических примесей, включающие в себя соответственно затраты по переключению на резервную линию редуцирования, на сброс давления и продувку узла очистки инертным газом, установку и демонтаж поворотных заглушек, демонтаж болтовых соединений и крышки фильтра, демонтаж

ЦФК, очистку фильтрующих сеток ЦФК от твердых частиц, их промывку и просушку, руб./год.

3.9. Совместный анализ уравнений (1)–(9) показывает, что исходная целевая функция задачи для фильтра заданного геометрического объема представляет собой выражение следующего вида:

$$Z = f(\Delta Z_\tau). \quad (10)$$

Характерной особенностью целевой функции (1)–(9) является наличие дробных степеней. В связи с этим последующее применение аналитических методов исследования функции на экстремум приводит к необходимости решения сложного трансцендентного уравнения вида

$$\frac{dZ}{d(\Delta Z_\tau)} = 0, \quad (11)$$

что представляет собой трудоемкий процесс последовательных итераций. Поэтому для определения оптимального значения газодинамических потерь на ЦФК представляется целесообразным применение численного метода решения задачи [4]. Задаваясь рядом значений параметра $\Delta Z_{\tau, \min}, \dots, \Delta Z_{\tau=0}, \dots, \Delta Z_{\tau}, \dots, \Delta Z_{\tau, \max}$ при известных геометрических параметрах фильтра определяем интегральные затраты $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$.

Варианту с минимальными затратами Z_{\min} соответствует оптимальные газодинамические потери на фильтрующем картридже $(\Delta Z_\tau)_{\text{opt}}$.

Выводы

1. Разработана математическая модель по определению оптимальной величины газодинамических потерь на ЦФК грубой и тонкой очистки.

2. Предложенная математическая модель позволяет минимизировать расходы в операции по удалению твердых частиц из ЦФК грубой и тонкой очистки при обеспечении пропуска через него максимального расхода газа.

Список литературы

1. Усачев, А.П. Теоретические и прикладные основы повышения эффективности и безопасности эксплуатации установок грубой очистки природного газа от твердых частиц в системах газораспределения / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, С.В. Густов. – Саратов: СГТУ, 2013. – 172 с.
2. Промышленное газовое оборудование. – 6-е изд., перераб. и доп. – Саратов: Газовик, 2013. – 1280 с.
3. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов / Утверждены Минэкономки РФ, Минфином РФ, Госстроем РФ 21.06.1999 № ВК 477. – М., 1999. – 201 с.
4. Боглаев, Ю.П. Вычислительная математика и программирование / Ю.П. Боглаев. – М.: Высшая школа, 1990. – 544 с.

References

1. Usachev, A.P. Theoretical and applied bases of increase of efficiency and safety of operation of installations of rough purification of natural gas from solid particles in gas distribution systems / A.P. Usachev, A.L. Shurait, S.V. Gustov. – Saratov: Sarat. state tech. Univ., 2013. – 172 p.
2. Industrial gas equipment. – 6-e publish. – Saratov: Gazovik, 2013. – 1280 p.
3. Methodical recommendations for assessment of efficiency of investment projects / Approved by the Ministry of economy of the Russian Federation, the Ministry of Finance of the Russian Federation, Gosstroy of the Russian Federation 21.06.1999 № VK 477. – M.: 1999. – 201 p.
4. Boglaev, Yu.P. Computational mathematics and programming / Yu. P. Boglaev. – M.: Higher school, 1990. – 544 p.

УДК 621.6.036

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Россия, 410054, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77,
тел.: (8452) 51-50-18

Усачев Александр Прокофьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Теплогасоснабжение,
вентиляция, водообеспечение и прикладная
гидрогазодинамика»
E-mail: usachev-ap@mail.ru

АО "Гипрониигаз".

Россия, 410012, г. Саратов,
проспект им. Кирова С.М., д. 54,
тел.: (845-2) 74-94-95

Шурайш 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

Нижегородский филиал АО «Гипрониигаз»
Россия, г. Нижний Новгород,
тел.: (831) 430-00-05

Соловьев Владимир Александрович,
аспирант, главный инженер
E-mail: nfnigaz@mts-nn.ru

Saratov State Technical University named
after Gagarin Yu.A.

Russia, 410054, 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

Giproniigas PLC

Russia, 410012, Saratov,
54, Kirov Avenue,
tel.: (845-2) 74-94-95

Shurayts Alexander Lazarevich,
Doctor of Sciences, General Director of
Gipronigas PLC
E-mail: Shurait@niigaz.ru

Biryukov Alexander Valeryevich,
Candidate of Sciences, Director of the
research center of Giproniigas PLC
E-mail: Biryukov@niigaz.ru

Nizhny Novgorod branch of Giproniigas PLC
Russian Federation, Nizhny Novgorod,
tel.: (831) 430-00-05

Soloviev Vladimir Aleksandrovich,
Postgraduate, Chief Engineer
E-mail: nfnigaz@mts-nn.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПЛОСКИХ ФИЛЬТРУЮЩИХ КАРТРИДЖЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА, ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ В ОДНОМ КОРПУСЕ ГАЗОВОГО ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ФИЛЬТРА

А.П. Усачев, А.Л. Шурайш, А.В. Бирюков, В.А. Соловьев

Предложена конструкция и разработаны методические положения по предотвращению деформации и разрушения фильтрующих картриджей, параллельно соединенных в одном корпусе, с присоединением входного и выходного патрубков с разных сторон газового двухступенчатого фильтра.

Ключевые слова: двухступенчатый фильтр, параллельные фильтрующие картриджи, патрубки, разностороннее присоединение

DESIGN AND CALCULATION METHODS IMPROVING OF FLAT FILTER CARTRIDGE OF NATURAL GAS, CONNECTED IN PARALLEL IN A SINGLE PACKAGE OF TWO STAGE GAS FILTER

A.P.Usachev, A.L.Shurait, A.V. Biryukov, V.A. Soloviev

The paper proposes a design and methodological provisions to prevent deformation and destruction of filter cartridges in parallel connected in a single package, with the connection of the inlet and outlet pipes on different sides of the two-stage gas filter.

Keywords: two-stage filter, parallel filter cartridges, pipe, versatile connection

1. Актуальность и принципы разработки параллельного соединения плоских фильтрующих картриджей в одном корпусе газового двухступенчатого фильтра с присоединением входного и выходного патрубков с разных сторон его корпуса

Обеспечение надежной эксплуатации высокоточного современного газорегулирующего оборудования в головных пунктах редуцирования газа (ПРГ), поступающего из единой системы газоснабжения, обеспечивается в существующей практике путем применения двух отдельно установленных цилиндрических фильтров грубой и тонкой очистки газа [1].

Недостаток существующих двухступенчатых цилиндрических установок очистки заключается в высокой капитало- и металлоемкости вследствие размещения цилиндрических фильтрующих картриджей (ФК) в отдельных корпусах, эксплуатируемых при высоком давлении, имеющих большие толщины соединительных фланцев и стенок цилиндрических обечаек и требующих для своего размещения дополнительную площадь напольной, стеновых и потолочной конструкций. Оптимальная пропускная способность одного фильтра составляет 100,0–130,0 тыс. м³/ч [1]. При дальнейшем увеличении единичной пропускной способности возрастает высота установки очистки и, как следствие, дополнительные капиталовложения в наружные стены помещения ПРГ, что делает применение цилиндрических фильтров малоэффективными.

Для устранения этого недостатка институт «Гипрониигаз» предложил использовать принцип размещения в одном корпусе ряда параллельно соединенных ФК плоской формы [2]. Этот принцип успешно используется в пластинчатых теплообменниках и ряде других устройств. Однако решение, описанное в [2], не удовлетворяет требованиям экономической и эксплуатационной эффективности. Входной и выходной патрубки присоединяются с одной стороны его корпуса на входной прижимной пластине 2 (рис.1) таким образом, что входной 1 и выходной 7 патрубки располагаются на разных уровнях по высоте, что приводит к увеличению высоты стеновых конструкций, необходимых для размещения линий редуцирования. Кроме того, такая компоновка установки очистки не удобна в обслуживании и ремонте. Из общего вида двухступенчатого фильтра (рис. 1,а), переоборудованного на основе пластинчатого теплообменника FP 10 фирмы Funke, следует, что для соединения выходного патрубка 7 с выходным газопроводом на высотной отметке патрубка 1 необходимо на патрубке 7 дополнительно установить один отвод 5 на 90° на его подъемном участке, один отвод 5 на 90° на его опускном участке и один отвод 5 на 90° на той же высотной отметке, на которой расположен входной патрубок 1.

Общий вид одной из плоских фильтрующих пластин двухступенчатого фильтра, переоборудованного из пластинчатого теплообменника FP 10 фирмы Funke с закрепленным на ней плоским фильтрующим картриджем из гофрированной металлической сетки с размером ячейки 0,08 мм для ступени грубой очистки, показан на рис. 1,б.

С целью дальнейшего совершенствования принципа плоских фильтрующих картриджей предлагается конструкция двухступенчатого фильтра с присоединением входного и выходного патрубков с разных сторон фильтра на одном уровне по высоте, приведенная на рис. 2. В этом случае все входные, выходные патрубки и присое-

диненное к ним оборудование располагаются на одной горизонтальной оси, находятся на одной высотной отметке, удобной для обслуживания и ремонта.

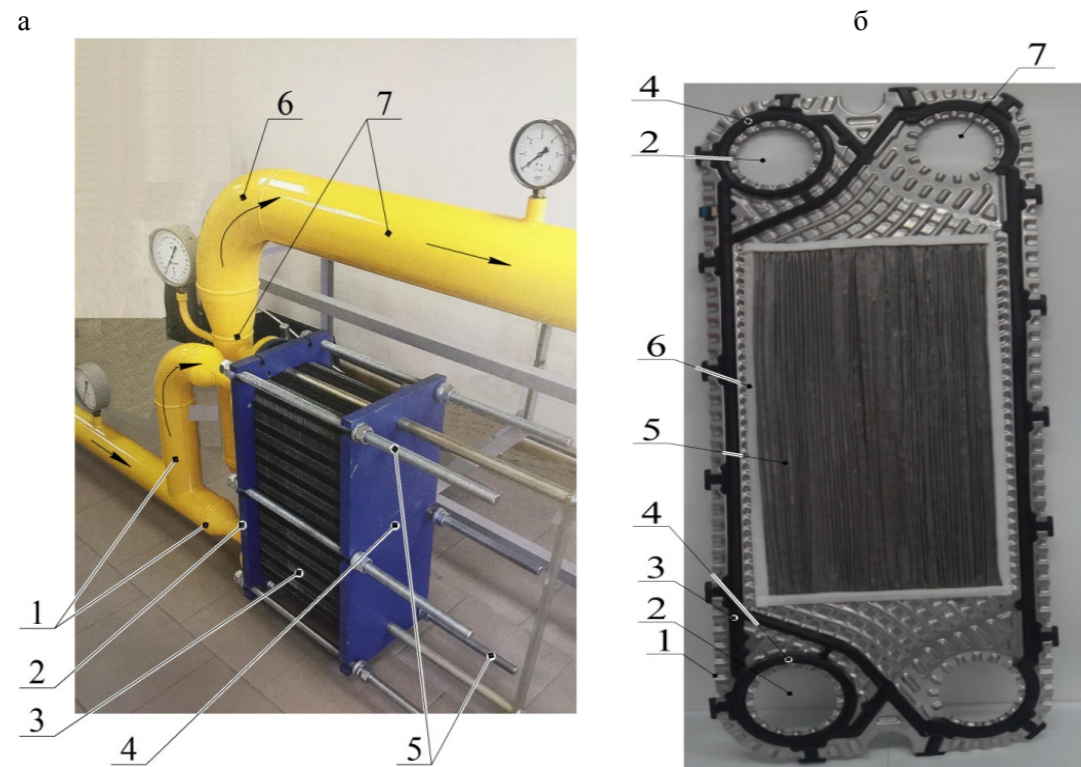


Рис. 1. Общий вид двухступенчатого фильтра, имеющего присоединение входного и выходного патрубков с одной стороны его корпуса, и плоской пластины с закрепленным на ней плоским фильтрующим картриджем:

а – общий вид двухступенчатого фильтра, имеющего присоединение входного и выходного патрубков с одной стороны его корпуса: 1, 7 – входной и выходной патрубки; 2 и 4 – первая и вторая прижимные крышки с отверстиями по границам их боковых сторон для резьбовых шпилек 5; 3 – ряд плоских фильтрующих пластин; 6 – отвод на 90° на патрубке 7; б – общий вид одной из плоских фильтрующих пластин двухступенчатого фильтра, переоборудованного из пластинчатого теплообменника FP 10 фирмы Funke с закрепленным на ней плоским ФК из гофрированной металлической сетки: 1 – фильтрующая пластина; 2 – отверстия (слева) в верхней и нижней части пластины 1 для прохода очищенного газа; 3 – уплотнительная прокладка для предотвращения утечек газа в окружающий воздух; 4 – уплотнительная кольцевая прокладка для предотвращения утечек очищенного газа в объем неочищенного газа; 5 – фильтрующая сетка с продольными фильтрующими складками; 6 – уплотнительная поверхность по периметру сетки 5 для ее герметизации на стенке фильтрующей пластины; 7 – отверстия (справа) в верхней и нижней части пластины 1 для прохода неочищенного газа

Предлагаемая двухступенчатая установка газовой очистки работает следующим образом. Сначала газ поступает в первую ступень грубой очистки. Проведенный анализ и опыт газораспределительных организаций показывают, что на ФК грубой очистки оседает 70 % механических частиц от общего объема примесей [1]. Основой ФК грубой очистки является металлическая однослойная сетка с размером ячейки 0,08 мм, которая накапливает механические примеси, находящиеся в неочищенном газе только со стороны своей наружной поверхности, поэтому сравнительно быстро засоряется и требует значительного количества операций по их удалению [1]. Неочищенный газ на рис. 2 обозначен линиями, отмеченными красным цветом, а грубоочищенный – зеленым цветом.

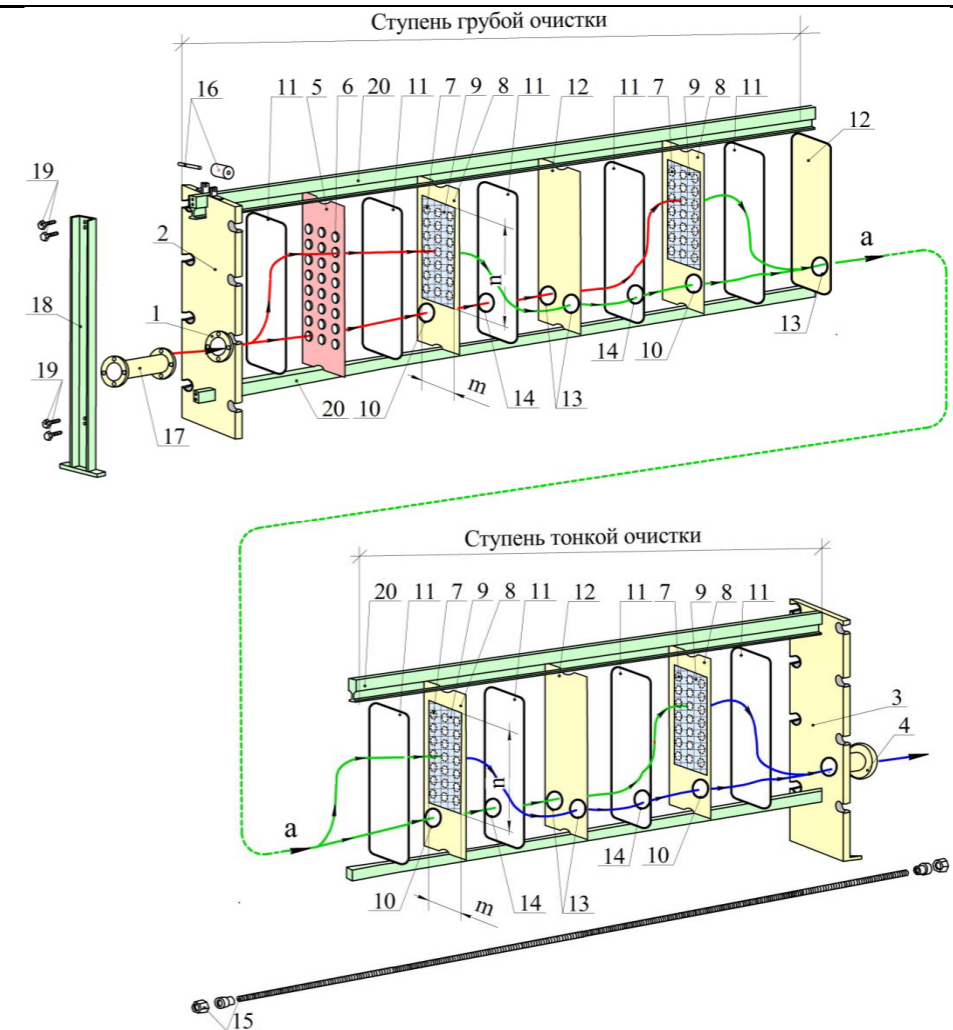


Рис. 2. Двухступенчатая установка газовой очистки, содержащая ряд ФК плоской формы, параллельно соединенных между собой в одном корпусе с присоединением входного и выходного патрубков с разных сторон фильтра на одном уровне по высоте: 1, 4 – входной и выходной патрубки для присоединения к распределительным газопроводам на входе и выходе двухступенчатой установки газовой очистки; 2 и 3 – первая и вторая прижимные крышки с отверстиями по границам их боковых сторон для резьбовых шпилек 15; 5 – отбойная перфорированная пластина; 6 – ряд круглых отверстий в отбойной перфорированной пластине 5; 7 – ряд круглых отверстий в пластинах 8 ступеней грубой и тонкой очистки; 8 – одна из ряда фильтрующих пластин ступеней грубой и тонкой очистки; 9 – плоский фильтрующий картридж из гофрированной металлической сетки для ступени грубой очистки или из гофрированного фильтрующего полотна для ступени тонкой очистки; 10 – входное отверстие в каждой из фильтрующих пластин 8 ступеней грубой и тонкой очистки; 11 – уплотнительная прокладка между пластинами 8 и 12, а также между крышкой 2 и пластиной 5, а также крышкой 3 и пластиной 8; 12 – сплошная пластина ступеней грубой и тонкой очистки; 13 – входные отверстия в каждой пластине 12 для грубоочищенного и неочищенного газа для ступени грубой очистки и для грубоочищенного и тонкоочищенного газа для ступени тонкой очистки; 14 – кольцо уплотнительное между отверстиями 10 и 13; 15 – резьбовые шпильки с шайбами и гайками; 16 – втулка и шпилька для перемещения вдоль верхней штанги 20 крышки 2; 17 – трубная вставка, демонтируемая для раздвижки между собой крышки 2, пластин 5, 8 и 12; 18 и 19 – стойка опорная и болты для присоединения к ним верхней и нижней направляющих штанг 20; 20 – верхняя и нижняя направляющие штанги для перемещения и фиксации крышки 2 и пластин 5, 8 и 12; m, n – ширина и высота прямоугольного гофрированного фильтрующего картриджа 9 для ступеней грубой и тонкой очистки, мм

Сначала газ проходит через отверстия 6 в защитной отбойной пластине 5, предназначенной для задержания самых крупных включений, например шлака, остатков сварки, предметов, оставленных в процессе монтажа. Диаметр отверстий 6 исключает попадание этих крупных твердых включений, способных повредить или разрушить сетку 9 со стороны ее наружной поверхности. Затем неочищенный газ, но уже без крупных твердых включений, проходит через первую по направлению течения газа фильтрующую сетку 9, закрепленную на фильтрующей пластине 8, с размером ячейки 0,08 мм, которая задерживает механические примеси, находящиеся в неочищенном газе ступени грубой очистки. Последовательность очистки газа в ступени грубой очистки показана на рис. 2 и детально описана в [2]. На конечном участке ступени грубой очистки газ через отверстия 13 в средних сплошных пластинах 12, уплотнительные прокладки 14 и отверстия 10 в средних фильтрующих пластинах 8 проходит в последнюю по ходу течения газа камеру, образованную фильтрующей пластиной 8, уплотнительной прокладкой 11 и крышкой 3, где он смешивается с частью газа, очищенного в последней по ходу течения газа фильтрующей сетке 9 ступени грубой очистки. Далее поток грубоочищенного газа поступает во вторую ступень тонкой очистки через отверстие 13 в последней сплошной пластине 12. В ступень тонкой очистки попадает 30 % от всего объема механических примесей, которые имеют размеры менее 0,08 мм. Основой ФК тонкой очистки являются нетканые фильтрующие полотна типа фетры с минимальным размером ячейки 0,005 мм [3]. Фильтрующее полотно тонкой очистки, особенно его средняя по толщине часть, практически не поддается удалению примесей и поэтому после достижения расчетной степени засорения ФК тонкой очистки заменяется на новое [3]. Последовательность очистки газа от механических примесей в ступени тонкой очистки показана на рис. 2 и детально описана в [2]. В конечной части ступени тонкой очистки весь поток тонко очищенного газа (на рис. 2 обозначен синими линиями) проходит в выходной штуцер 4 и в присоединенный к нему распределительный газопровод.

Применение предлагаемых устройств очистки газа позволяет повысить экономическую эффективность и удобство в обслуживании и ремонте по сравнению с аналогом [2] путем расположения всех входных и выходных патрубков и присоединенного к ним оборудования на одной горизонтальной оси и на одной высотной отметке.

2. Постановка задачи и разработка методических положений по предотвращению разрушения фильтрующих картриджей, параллельно соединенных в одном корпусе, при увеличении на них перепада давления до предельной величины

Одной из самых важных задач, связанных с возможностью применения плоских фильтрующих картриджей грубой и тонкой очистки, параллельно соединенных в одном корпусе двухступенчатого фильтра, является обеспечение их прочности и устойчивости при повышении перепада давления с их наружной стороны до предельного значения, выше которого происходит разрушение. Опыт конструирования и эксплуатации, а также проведенный анализ показывают, что для фильтрующих пластин 8 (см. рис. 1,а) наиболее целесообразной является прямоугольная форма, поскольку в этом случае достигается максимальная фильтрующая площадь сеток 9 на поверхности прямоугольных фильтрующих пластин 8. Схема прямоугольной опорной пластины 1, перфорированной круглыми отверстиями, и прижатой к ней засоренной сетки 2 приведена на рис. 2. Задача формулируется следующим образом. При эксплуатации в обычном режиме фильтрующая сетка 2, не засоренная механическими примесями, отстоит от опорной пластины на расстоянии, позволяющем выполнять очистку газа по всей фильтрующей площади сетки 9. При воздействии предельного перепада давления $\Delta P_{пр.т}$ до и после сетки 2 в момент полного засорения она оказывается плотно прижатой к опорной пластине 1. Засоренная фильтрующая сетка 2, плотно прижатая к пластине 1 шириной m и высотой n , полностью переносит на нее усилия, которые оказывает предельный перепад давления. Укрепление отверстий 3 и учет прямоугольной формы, которые заметно ослабляют прочность пластины 1 по сравнению со сплошной пластиной круглой формы, осуществляются путем принятия ее фактической

толщины $S_{п.и}$ с избытком и увеличения до значения, при котором она способна выдержать предельный перепад давления $\Delta P_{пр.т}$ до и после нее. Конечная цель заключается в определении величины максимального диаметра отверстий $d_{п.и}$ опорной пластины 1, при которой она выдерживает предельный перепад давления $\Delta P_{пр.т}$ до и после нее.

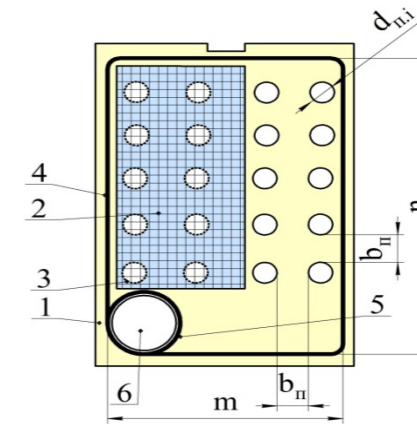


Рис. 3. Расчетная схема прямоугольной опорной перфорированной пластины с плотно прижатым к ней фильтрующим картриджем:

1 – прямоугольная опорная перфорированная пластина; 2 – фильтрующий картридж; 3 – круглые отверстия в опорной пластине 1 для прохода газа; 4 – уплотнительная прокладка; 5 – уплотнительное кольцо для отверстия 6; 6 – отверстие для прохода части очищенного газа в опорной плоской пластине 1; $b_{п.и}$ – расстояние в свету между соседними отверстиями 3, мм

С целью решения поставленной задачи выполнены исследования, результатом которых согласно требованиям [9] является уравнение (1) по определению диаметра отверстий $d_{п.и}$ в опорной пластине 1 прямоугольной формы, при котором она выдерживает предельный перепад давления $\Delta P_{пр.т}$ до и после нее. Определение диаметра отверстий $d_{п.и}$ из уравнения (1) проводится методом подбора для ряда значений фактической толщины плоской опорной пластины $S_{п.и}$, исходя из условия [4]

$$0 = \frac{S_{п.и} - C_{п.и}}{K_{п.и} \cdot Y \cdot \sqrt{1 - \sum \left(\frac{d_{п.и}}{m} \right)^3}} / \left[1 - \sum \left(\frac{d_{п.и}}{m} \right) \right] \sqrt{\frac{\Delta P_{пр.т}}{[\sigma_{п.и}]}} - m, \quad (1)$$

где $S_{п.и}$ – фактическая избыточная толщина опорной прямоугольной пластины, мм; $C_{п.и}$ – суммарная поправка к толщине опорной стальной пластины, мм; $d_{п.и}$ – значение диаметра i -го отверстия в опорной пластине, мм; m – расстояние по линиям заземления меньшей стороны прямоугольной опорной пластины (см. рис. 2), мм; $K_{п.и}$ – величина коэффициента, зависящего от конструктивных особенностей опорной пластины; Y – коэффициент, который учитывает отношение сторон опорной пластины прямоугольной формы [9]; $\Delta P_{пр.т}$ – значение предельного теоретического перепада давления, оказываемого на опорную пластину, МПа; $[\sigma_{п.и}]$ – допускаемое напряжение материала плоской опорной пластины при расчетной температуре, МПа.

Коэффициент, который учитывает отношение сторон пластины прямоугольной формы, находится по формуле согласно [4]:

$$Y = 1,41 / \sqrt{1 + (m/n)^2}. \quad (2)$$

Диаметр $d_{п.и}$ отверстий 3 в опорной пластине 1 согласно выражению (1) в зависимости от ее геометрических параметров определяется методом последовательных приближений до достижения равенства правой и левой частей формулы (1).

Выводы

1. Предложена конструкция двухступенчатого фильтра на основе параллельно соединенных плоских ФК с присоединением входного и выходного патрубков с разных сторон его корпуса.
2. Предложено уравнение по нахождению максимального диаметра отверстий в опорных пластинах, при котором предупреждается разрушение засоренных фильтрующих сеток, прижимающихся к ним при возникновении предельного перепада давления на ФК.

Список литературы

1. Усачев, А.П. Теоретические и прикладные основы повышения эффективности и безопасности эксплуатации установок грубой очистки природного газа от твердых частиц в системах газораспределения / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, С.В. Густов. – СГТУ, 2013. – 172 с.
2. Патент на полезную модель RU №131989U1. Многоблочная установка очистки природного газа от механических примесей / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, А.В. Бирюков / Опубликовано 10.09.2013. – Бюл. № 25. Дата подачи заявки 24.12.2012.
3. Промышленное газовое оборудование. – 6-е изд., перераб. и доп. – Саратов: Газовик, 2013. – 1280 с.
4. ГОСТ 14249-89. Межгосударственный стандарт. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 2003. – 69 с.

References

1. Usachev, A.P. Theoretical and applied bases of increase of efficiency and safety of operation of installations of rough purification of natural gas from solid particles in gas distribution systems / A.P. Usachev, A.L. Shuraitis, S.V. Gustov. – Saratov: Sarat. state tech. Univ., 2013. – 172 p.
2. The patent for useful model RU №131989U1. Multiblock plant for natural gas purification from mechanical impurities / A.P. Usachev, A.L. Shuraitis, A.V. Biryukov / Published 10.09.2013. – Bul. No. 25. Date of application 24.12.2012.
3. Industrial gas equipment. – 6-e publish. – Saratov: Gazovik, 2013. – 1280 p.
4. GOST 14249-89. Interstate standard. Vessels and apparatus. Norms and methods of strength calculation. – M.: IPK «Publishing house of standards», 2003. – 69 p.

УДК 621.6:62-621

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

Россия, 410054, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77,
тел.: (8452) 99-88-11; факс: (8452) 99-88-10

Осипова Наталия Николаевна,
доктор технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Теплогасоснабжение,
вентиляция, водообеспечение и прикладная
газодинамика»
E-mail: osnat75@mail.ru

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Гришин Борис Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: bgrishin@rambler.ru

Ежов Евгений Григорьевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Информационно-
вычислительные системы»

Родионов Юрий Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
директор автомобильно-дорожного института
E-mail: rodionov@pguas.ru

Saratov State Technical University
named after Yuri Gagarin

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

Osipova Natalya Nikolaevna,
Doctor of Science, Associate Professor,
Head of the department «Heat and Gas
Supply, Ventilation, Water Supply and
Applied Hydroaerodynamics»
E-mail: osnat75@mail.ru

Penza State University of Architecture
and Construction

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

Grishin Boris Mikhailovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Water supply,
sewerage and hydraulic engineering»
E-mail: bgrishin@rambler.ru

Ezhov Evgeny Grigorievich,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Information
and computing systems»

Rodionov Yuri Vladimirovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Director of Automobile Engineering Institute
E-mail: rodionov@pguas.ru

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ БУТАНА ДЛЯ ГАЗИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ

Н.Н. Осипова, Б.М. Гришин, Е.Г. Ежов, Ю.В. Родионов

Приведены результаты исследований по решению задачи обеспечения необходимого избыточного давления в подземных резервуарах с жидким техническим бутаном. При решении задачи температура сжиженного бутана принималась равной температуре грунта на оси заложения резервуара. Сделано допущение о том, что тепло, передающееся от грунта к резервуару, полностью поглощается жидкой фазой бутана, а грунт представляет собой однородную среду с постоянной величиной теплопроводности.

На основе теоретического анализа распределения температур на границе корпуса резервуара и грунтового массива найдены значения толщины изоляции, требуемой для предотвращения снижения давления паровой фазы до минимального значения, при котором газоснабжение прекращается. Обоснован состав газозвоздушной смеси на основе бутана, обеспечивающий полное её сгорание в газовых горелках.

Ключевые слова: газификация объектов, бутан, газозвоздушная смесь, резервуар сжиженного газа, распределение температур, полнота сгорания газозвоздушной смеси

JUSTIFICATION OF THE APPLICATION OF GAS AIR MIXTURE BASED ON BUTANE FOR GASIFICATION OF OBJECTS

N.N. Osipova, B.M. Grishin, E.G. Ezhov, Yu.V. Rodionov

The results of studies related to solving the problem of providing the necessary excess pressure in underground tanks with liquid technical butane are presented. In solving the problem, the temperature of liquefied butane was taken to be equal to the temperature of the soil on the axis of the reservoir. It

is assumed that the heat transferred from the soil to the tank is completely absorbed by the liquid phase of butane, and the soil is a homogeneous medium with a constant thermal conductivity.

Based on a theoretical analysis of the temperature distribution at the boundary of the tank body and the soil mass, the insulation thickness values required to prevent the vapor phase pressure from dropping to the minimum value at which gas supply ceases are found. The composition of the butane-based gas-air mixture is substantiated, which ensures its most complete combustion in gas burners.

Keywords: gasification of objects, butane, gas-air mixture, reservoir of liquefied gas, temperature distribution, completeness of air-gas mixture combustion

Обеспечение социального благополучия населения одна из приоритетных задач любой развитой страны. Наиболее просто данная задача решается в крупных агломерационных центрах с высокой плотностью населения, развитой энергетической и логистической инфраструктурой, в основном за счет газификации природным сетевым газом. В районах, отличающихся сложным рельефом местности, имеющих низкую плотность населения, при обособлении индивидуальных фермерских хозяйств и объектов промышленного производства газификация природным газом является в большинстве случаев экономически нецелесообразной [1, 2]. В этом случае рассматриваются альтернативные варианты газификации на базе углеводородных газов [3, 4]. Значительная стоимость указанных систем ограничивает их повсеместное внедрение и снижает привлекательность для потенциального потребителя. Потенциалом для снижения стоимости систем газоснабжения является применение газозвоздушных смесей на основе технического бутана.

Как показывает существующая практика, системы автономного газоснабжения в большинстве случаев не рассчитаны на применение сжиженного газа с повышенным содержанием бутановых фракций [6]. К числу наиболее значимых недостатков таких систем газоснабжения необходимо отнести:

- низкую паропроизводительность резервуарных установок;
- конденсацию паровой фазы в распределительных газопроводах;
- сложность проведения сливноналивных операций вследствие низкого избыточного давления паровой фазы в резервуарах в зимнее время.

Адаптация автономных систем газоснабжения к работе на бутановых фракциях позволит повысить эффективность систем, снизить затраты на приобретение газового топлива и исключить указанные недостатки.

Технический бутан представляет собой многокомпонентную смесь, которая согласно ГОСТ Р 52087-2003 характеризуется составом:

- метан, этан, этилен, пропан, пропилен в сумме не более 40 %;
- бутан и бутилен в сумме более 60 %.

Для такой смеси избыточное давление в резервуарах для отбора паровой фазы формируется в основном при положительных температурах (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Значения избыточного давления технического бутана

Температура, К	Давление, МПа	Температура, К	Давление, МПа
250	0,06	290	0,25
260	0,095	300	0,345
270	0,13	310	0,458
280	0,19	320	0,6

Минимальное избыточное давление, необходимое для нормальной регазификации бутана и подачи паровой фазы потребителю, составляет 0,1 МПа, что обеспечивается температурой окружающей среды минус 12,8 °С.

Наиболее простым решением для поддержания избыточного давления является установка погружных насосов в резервуарах для подачи жидкой фазы газа в установки регазификации. Однако целесообразность применения насосов обуславливается диапазоном давлений в резервуаре от 0,1 до 0,3 МПа. При давлении в резервуаре

свыше 0,3 МПа необходимость в насосах отпадает, так как избыточного давления паровой фазы хватает для перемещения газа потребителю по системе трубопроводов. Таким образом, применять принудительную подачу в установки регазификации следует только в зимний период.

Для разработки рекомендаций по обеспечению избыточного давления в подземных резервуарах с техническим бутаном необходимо провести дополнительные исследования.

Для решения поставленной задачи рассмотрим процессы теплообмена подземного резервуара технического бутана с грунтовым массивом и определим температуры на контуре резервуара, обуславливающие температуру жидкой фазы газа.

Теоретическими предпосылками для решения поставленной задачи являются следующие.

Расчетную температуру сжиженного бутана t_b при его хранении примем равной естественному значению температуры на оси заложения резервуара t_{gr} . Размеры резервуара представим в виде радиуса резервуара R и длины l .

Допущения, принятые в задаче:

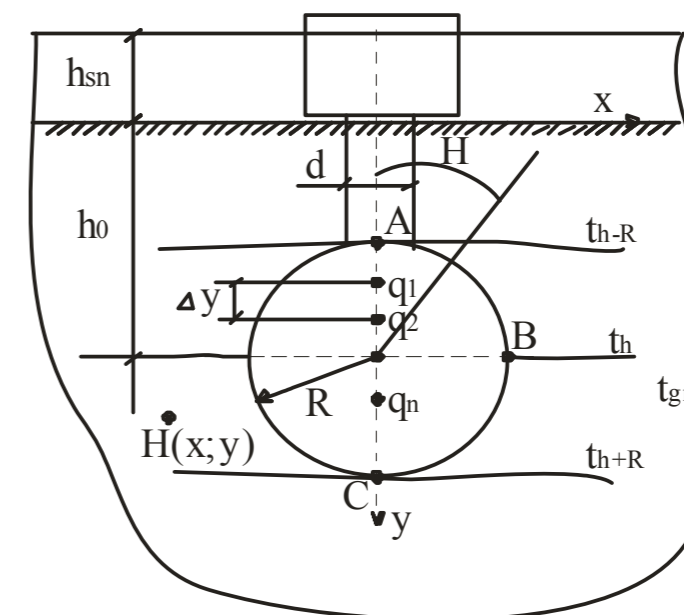
- длина резервуара превышает его диаметр;
- тепло, передающееся от грунта, полностью поглощается жидкой фазой газа (сопротивление теплообмену между стенкой резервуара и жидкостью и сопротивление теплопередаче отсутствуют);
- грунт представляет собой однородную среду теплопроводностью λ ;
- сопротивление теплопереходу на границе грунт – воздух учитывается по методу дополнительного слоя.

Тогда полная глубина заложения резервуара определится по формуле

$$h = h_0 + \lambda \left(\frac{h_{sn}}{\lambda_{sn}} + \frac{1}{\alpha_{int}} \right), \quad (1)$$

где h_0 – глубина заложения резервуара в грунте, м; h_{sn} – высота снежного покрова, м; λ_{sn} – теплопроводность снега, Вт/(м·К); α_{int} – коэффициент теплоотдачи в наружный воздух, Вт/(м²·К).

Расчетная схема задачи представлена на рисунке.



Расчетная схема задачи

Задача решается методом наложения температурных полей. Выделим собственное температурное поле грунта, которое имеет заданное распределение температур по глубине $t(y)$. При этом температура на цилиндрической поверхности резервуара будет иметь значения:

- на верхней образующей t_{h-R} ;
- на оси заложения t_h ;
- на нижней образующей t_{h+R} .

Второе температурное поле представлено источниками тепла некоторой интенсивности q_1, q_2, \dots, q_n , расположенными по оси y с некоторым шагом Δy , как на рисунке.

Согласно Форхгеймеру, температура в точке $H(x; y)$ от воздействующего на нее источника тепла i определяется следующим образом:

$$t_H = \frac{q_i}{2\pi\lambda} \ln \sqrt{\frac{x^2 + (h_i + y)^2}{x^2 + (h_i - y)^2}}. \quad (2)$$

При наличии множества источников $i=1, 2, \dots, n$ их результирующее воздействие можно описать выражением

$$t_H = t_{H1} + t_{H2} + \dots + t_{Hi} + t_{Hn}, \quad (3)$$

$$t_H = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\lambda} \ln \sqrt{\frac{x^2 + [(h-R) + i\Delta y + y]^2}{x^2 + [(h-R) + i\Delta y - y]^2}}. \quad (4)$$

Методика решения системы уравнений при выборе произвольной точки H , располагающейся на цилиндрической части контура резервуара, представлена в работах [5, 6]. При количестве уравнений $n \rightarrow \infty$ определяется наиболее точное решение распределения температур на контуре резервуара. Согласно теореме Гаусса, суммарный теплоприток к телу с изотермической поверхностью в массиве численно равен суммарной интенсивности источников тепла, заключенных внутри тела. Таким образом, результирующее значение теплового потока на контуре резервуара равняется нулю.

Суммарное действие источников тепла q_1, q_2, \dots, q_n описывается выражением

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = 0. \quad (5)$$

Выражения (1)-(5) с учетом принятых допущений формируют математическую модель распределения температур на контуре подземного резервуара технического бутана. Для реализации математической модели были приняты исходные данные:

- объем резервуара $V=5 \text{ м}^3$ с радиусом $R=0,7 \text{ м}$;
 - глубина заложения в грунте (ось резервуара) $h_0=1,3 \text{ м}$, высота снежного покрова $h_{sn}=0,1 \text{ м}$;
 - температура грунта на оси заложения резервуара (холодная климатическая зона) $t_{gr}=-3,6 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - исследование проводится на контуре резервуара от A до C (см. рисунок).
- Результаты решения задачи представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Значения температур на контуре резервуара

Угол β	0	45	90	135	180
Расчетное распределение температур, $^\circ\text{C}$	-4,97	-5,16	-4,97	-4,78	-4,97
Среднее значение температуры, $^\circ\text{C}$	-4,97				

Как видно из табл. 2, различный уровень заглубления точек на контуре резервуара обуславливает максимальное расхождение с естественной температурой грунта на оси заложения в $1,56 \text{ }^\circ\text{C}$. Это обстоятельство вызывает колебания избыточного давления на $0,005\text{-}0,006 \text{ МПа}$, что не оказывает влияния на эксплуатационные параметры резервуарных установок.

Таким образом, в подземном резервуаре технического бутана обеспечиваются устойчивая генерация паровой фазы и формирование избыточного давления во всех климатических зонах, за исключением очень холодной. В то же время при отборе паровой фазы бутана из резервуара и перемещении ее по элементам системы газоснабжения большую роль играет теплообмен горловины с окружающей средой.

В соответствии с особенностями устройства резервуаров в грунте часть горловины окружена грунтовым массивом, а часть обменивается теплом с наружным воздухом. Таким образом, общий теплообмен описывается выражениями:

– для подземной части:

$$Q_{utm} = \frac{(h_{utm} - h_{sn})(t_b - t_{min})\pi d}{\frac{h_{utm}}{\lambda} + \frac{h_{sn}}{\lambda_{sn}} + \frac{1}{\alpha_{int}}}, \quad (6)$$

– для наземной части:

$$Q_{otn} = k_{int} \left[\pi d (h_{otn} - h_{sn}) + \frac{\pi d^2}{4} \right] (t_b - t_{min}), \quad (7)$$

где h_{utm} – высота подземной части горловины резервуара, м; h_{otn} – высота наземной части горловины резервуара, м; k_{int} – коэффициент теплопередачи паров сжиженного газа в наружный воздух, Вт/(м²·К); d – диаметр горловины, м; t_{min} – температура самых холодных суток, $^\circ\text{C}$.

Для определения потерь тепла были использованы исходные данные:

- высота подземной части горловины – $0,6 \text{ м}$;
- высота наземной части – $0,1 \text{ м}$;
- диаметр горловины – $0,4 \text{ м}$;
- температура самых холодных суток минус $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Подстановка в формулы (6) и (7) и суммирование результатов определили теплопотерю через горловину в виде 240 Вт , что в соответствии с формулой (4) свидетельствует о понижении температуры на $7,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таким образом, температура в районе горловины составит:

$$t = -4,97 + (-7,1) = -12,07 \text{ }^\circ\text{C}.$$

При данной температуре снижается избыточное давление паровой фазы бутана до минимального значения, газоснабжение прекращается.

Для предотвращения снижения температуры паровой фазы предлагается покрывать горловину и крышку горловины резервуара тепловой изоляцией. Толщина изоляции подбирается в соответствии с математической моделью и принимается равной $0,15 \text{ м}$.

Одним из важных критериев применения бутана для газоснабжения потребителя является полнота сгорания газозвоздушной смеси в бытовых газовых горелках. При неполном сгорании топлива снижается коэффициент полезного действия бытовых газовых приборов, увеличивается образование угарного газа в газифицируемых помещениях. Адаптация газовых горелок требует конструктивных изменений сопел для подачи газа на сжигание. Наиболее просто эта задача без конструктивного вмешательства решается при применении газозвоздушных смесей «бутан – воздух».

При этом условием взаимозаменяемости горючих газов является постоянство числа Воббе.

При наличии многокомпонентного углеводородного газа число Воббе определяется по формуле

$$W = \frac{(Q_h^l)_{pr} \Psi_{pr} + (Q_h^l)_b \Psi_b}{\sqrt{\frac{\rho_{pr} \Psi_{pr} + \rho_b \Psi_b + \rho_{air} (1 - \Psi_{pr} - \Psi_b)}{\rho_b}}}, \quad (8)$$

где $(Q_h^l)_{pr}$, $(Q_h^l)_b$ – низшая теплота сгорания пропана и бутана соответственно, МДж/м³; ρ_{pr} ; ρ_b ; ρ_{air} – плотности пропана, бутана и воздуха соответственно, кг/м³; Ψ_{pr} ; Ψ_b – объемное содержание пропана и бутана в газозвушной смеси, %.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, стабильная и эффективная работа газогорелочных устройств обеспечивается при отклонении числа Воббе не более чем на 5 % от числа Воббе традиционного топлива (природного газа).

Результаты исследования представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Содержание исследуемых газов в газозвушной смеси

Марка газа	Содержание газа в газозвушной смеси, %	
	оптимальное	рекомендуемое
Пропан (ПТ)	43	40-47
Бутан (БТ)	34	31-37
Пропан-бутан (ПБТ)	38	35-42

Как видно из табл. 3, для технического бутана необходимое содержание в газозвушной смеси варьируется от 31 до 37 %. При наличии газовой смеси с воздухом указанного состава достигается нормативное отклонение числа Воббе, что позволит без изменения конструкций горелок бытовых газовых приборов обеспечить эффективное сжигание газового топлива.

Выводы

1. Для обеспечения требуемой величины избыточного давления паровой фазы бутана в резервуаре технического газа следует исключить теплообмен с окружающей средой за счет нанесения тепловой изоляции на элементы системы газоснабжения.
2. На основе предложенной математической модели рассчитана толщина изоляции, необходимая для уменьшения до требуемого значения величины теплообмена между резервуаром технического бутана и грунтовым массивом.
3. Смешение паров технического бутана с воздухом в соотношении 31-37 % бутана и 63-69 % воздуха с учетом ограничений по колебаниям числа Воббе позволяет исключить конструктивные изменения горелок бытового газоиспользующего оборудования.

Список литературы

1. Medvedeva, O.N. Comparative evaluation of the energy and economic efficiency the gas supply systems of small towns / O.N. Medvedeva // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2018. – №1 (37). – P. 29 – 41.
2. Спектор, Н.Ю. Области эффективной реализации проектов газификации / Н.Ю. Спектор // Территория нефтегаз. – 2017. – № 7–8. – С.118–123.
3. Осипова, Н.Н. Перспективы расширения использования сжиженного углеводородного газа в Российской Федерации / Н.Н. Осипова, И.М. Бычкова, Ю.С. Ряписова // Ресурсо- и энергоэффективные технологии в строительном комплексе: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов: СГТУ, 2016. – С.207–211.

4. Осипова, Н.Н. Выбор рациональной области применения централизованных и децентрализованных систем снабжения сжиженным углеводородным газом / Н.Н. Осипова // Строительство и реконструкция. – 2011. – №5(37). – С. 39–45.

5. Курицын, Б.Н. Техничко-экономическая оптимизация систем теплоснабжения / Б. Н. Курицын, О. Н. Медведева. – Саратов, 2011. – 62 с.

6. Курицын, Б.Н. Применение грунтовых теплообменников в системах регазификации сжиженных углеводородных газов / Б.Н. Курицын, Г.П. Чирчинская, М.В. Павлутин // Газ России. – 2005. – № 1. – С. 31.

References

1. Medvedeva, O.N. Comparative evaluation of the energy and economic efficiency the gas supply systems of small towns / O.N. Medvedeva // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2018. – №1 (37). – P. 29–41.
2. Spektor, N.Yu. Areas of efficient gasification project implementation / N. Yu. Spektor // Territory neftegaz. – 2017. – № 7–8. – P.118–123.
3. Osipova, N.N. Prospects for expanding the use of liquefied petroleum gas in the Russian Federation / N.N. Osipova, I.M. Bychkova, Yu. S. Ryapisova // Resource-Efficient Technologies in the Building Complex: Materials of the IV Intern. scientific-practical conf. – Saratov: SSTU, 2016. – P.207–211.
4. Osipova, N.N. The choice of a rational field of application of centralized and decentralized systems for supplying liquefied petroleum gas / N.N. Osipova // Construction and Renovation. – 2011. – №5 (37). – P. 39–45.
5. Kuritsyn, B.N. Technical and economic optimization of heat supply systems / B.N. Kuritsyn, O.N. Medvedeva. – Saratov, 2011. – 62 p.
6. Kuritsyn, B.N. The use of ground heat exchangers in the systems of regasification of liquefied hydrocarbon gases / B.N. Kuritsyn, G.P. Chirchinskaya, M.V. Pavlutin // Gas of Russia. – 2005. – № 1. – P. 31.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 725.211+711.552

Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова
Россия, 455000, г. Магнитогорск,
пр. Ленина, 38,
тел.: (3519) 20-59-05

Чикота Сергей Иванович,
кандидат технических наук, доцент
E-mail: s.chikota@magtu.ru

Magnitogorsk State Technical University
named after Nosov
455000, Magnitogorsk, 38, Lenin Ave.,
tel.: (3519) 20-59-05

Chikota Sergey Ivanovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
E-mail: s.chikota@magtu.ru

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ТОРГОВЫХ ЦЕНТРОВ В КРУПНЫХ РОССИЙСКИХ ГОРОДАХ

С.И. Чикота

Рассматриваются типологические особенности построенных крупных универсальных торговых зданий. Выявлены тенденции формирования архитектуры торговых центров по размещению в городской структуре, функциональной организации, по социальным задачам, количеству этажей и архитектурной композиции. Представлены прогнозы существования торговых центров в будущем.

Ключевые слова: торговый центр, универсальное торговое здание, многофункциональное общественное здание, архитектура торговых зданий

DESIGN DECISIONS OF SHOPPING CENTERS IN RUSSIAN CITIES

S.I. Chikota

Typological features of a large shopping centers are considered. Tendencies in building of shopping centers in city structure, their functional organization, social tasks, number of stories and architectural composition are revealed. Forecasts for the existence of shopping centers in the future are presented.

Keywords: shopping center, universal commercial building, multi-functional public building, commercial buildings architecture

Введение. В настоящее время предприятия торговли переживают период формирования новых типов зданий. Этот процесс обусловлен целым рядом социальных и экономических факторов: совершенствованием форм торговли, развитием строительных технологий, деловой и финансовой активностью, ростом населения крупных городов. Современными направлениями в формировании типов магазинов являются укрупнение, универсализация и гибкость планировки [1]. В качестве главного метода укрупнения торговых предприятий выступает их универсализация, основанная на концентрированном предложении товаров широкого ассортимента по принципу «все покупки под одной крышей», обеспечивающая покупателям экономию времени. Однако в России до сих пор не существует единого подхода к выделению различных типов крупноформатных торговых организаций [2].

Торговый центр – группа предприятий торговли, управляемых как единое целое и находящихся в одном здании или комплексе зданий. По определению Международного совета торговых центров торговым центром можно считать группу архитектурно объединённых розничных предприятий, управляемых единой компанией, обеспеченных парковкой и расположенных на специально спланированном участке [3]. Анализ практического опыта позволяет выявить особенности проектирования торговых центров в крупных российских городах в настоящее время.

Современные типы торговых зданий. Появление сетевого рынка обусловило строительство *супер-* и *гипермаркетов*, представляющих собой внушительные по размерам перекрытые торговые пространства универсального назначения. Их архитектура, соответствующая преимущественно утилитарным целям, сводится к простым объемно-пространственным композициям компактного типа в сочетании с броским цветовым решением (рис. 1).



Рис. 1. Торговый центр «Тетрис» по пр. Ленина в г. Магнитогорске

Второй разновидностью зданий для сетевого рынка стали *моллы*. Молл – пространство свободной планировки, предназначенное для объединения свободно расположенных торговых павильонов [4]. Часто моллы представляют собой магазины-склады. Они возводятся в местах узловых точек транспортных магистралей и способны превратить периферийные районы городов в привлекательные места с точки зрения шоппинга (рис. 2).



б



Рис. 2. Торговый центр «Метро»:
а – общий вид; б – интерьер

Но наиболее актуальным и востребованным типом зданий являются крупные *многофункциональные торговые центры* – объекты, включающие в себя наряду с главной торговой функцией еще целый ряд сопутствующих функций: деловую, зрелищную, развлекательную, общественного питания, бытового обслуживания и т.д. Целостность торгового центра обеспечивается посредством общественного пространства, так называемого коммуникационно-рекреационного каркаса [5].

Расположение торговых центров в городской структуре. Для строительства торгового центра требуется довольно значительная территория, на которой разместится само здание и парковка для автомобилей [6]. Подобрать такую территорию в сложившейся структуре крупного города непросто, поэтому в зарубежной и отечественной практике часто торговые центры располагают в периферийной части города. Такие торговые центры принято считать локальными [7].

Для размещения торговых центров внутри городской структуры выбираются участки в местах узловых точек транспортных магистралей [8]. При этом требуется градостроительная реконструкция участка городской территории. Наиболее частыми случаями являются:

- возведение торгового центра на месте городских парков или скверов [9];
- реконструкция с переустройством общественных зданий, имеющих большие прилегающие участки.

Такие торговые центры являются многофункциональными, имеют активные пешеходные связи с прилегающей общественной инфраструктурой и играют соподчиненную градостроительную роль.

Когда позволяют геологические условия и имеется дефицит территории, в торговых центрах могут быть устроены один или несколько подземных этажей. Обычно подземные этажи используются для размещения складов, автостоянок, подсобных и технических помещений. Однако размещение здесь торговых пространств также возможно.

При определенных градостроительных возможностях могут быть созданы торговые улицы, которые в результате перекрытия преобразуются в пассаж. Пассаж – укрупненная торговая галерея с верхним светом. Планировки пассажей единообразны: представляют собой вытянутые в плане протяженные пространства, решенные в один или несколько ярусов [10].

Планировочная организация зданий торговых центров. Основными социальными принципами проектирования внутренней структуры многофункционального торгового центра являются: безопасность функционирования, активизация общественно-торговой деятельности, повышение комфортности пребывания посетителей, экономия свободного времени, экономия территории и т.д.

В соответствии с современными представлениями о шопинге многофункциональные торговые центры крупных городов обычно включают:

- кинотеатр с несколькими залами;
- сеть общественного питания;
- игровые и досуговые зоны для детей и подростков [11];
- зоны, ориентированные на организацию выставок, показов коллекций моды, театрализованных представлений;
- атриумы для отдыха с зимними садами, фонтанами и аквариумами;
- открытые летние площадки и т.п.

Наличие многофункциональных торговых центров особенно актуально для «спальных» районов и помогает создать наиболее благоприятные условия для социального развития этих районов [12, 13].

В связи с размещением торговых центров внутри сложившихся городов сформировался тип многоярусного общественно-торгового здания с вертикальным функциональным зонированием и использованием подземного пространства. В качестве средств вертикального транспорта в торговых центрах используются лифты, эскалаторы, подъемные платформы для инвалидов, а также другие устройства для вертикального транспортирования с учетом технологии функционирования конкретного архитектурного объекта (рис. 3).



Рис. 3. Торговый центр «Континент» на пр. Ленина в г. Магнитогорске:
а – общий вид; б – интерьер

К недостаткам проектных решений одно- и двухэтажных зданий следует отнести увеличение площади застройки, что создает определенные трудности при размещении торговых центров в районах со сложившейся застройкой.

Прогнозы развития торговых центров. Торговые центры – развивающиеся структуры. Их совершенствование не всегда сводится только к изменению в организации торгового обслуживания, основанному на перераспределении существующих площадей в здании. Образование новых функциональных групп обслуживания обычно приводит к расширению здания и прилегающей территории [12]. По этой причине при разработке генерального плана должны приниматься во внимание перспективы возможного расширения.

Отечественный и зарубежный опыт проектирования и строительства торговых центров показывает, что наблюдается тенденция к сокращению их этажности. Это связано с тем, что согласно опыту эксплуатации многоэтажных зданий число покупателей на верхних этажах значительно меньше числа покупателей на нижних этажах. Как правило, торговая рентабельность обеспечивается за счет первого и второго этажей. На третьем этаже целесообразно размещать зону общественного питания, досугово-развлекательную зону, а также административно-бытовые, технические и вспомогательные помещения. Снижение этажности позволяет также сократить протяженность дорогостоящих вертикальных коммуникаций, необходимых с позиций обеспечения пожарной безопасности.

Относительно развития существующих торговых центров, точнее – их будущего существования, трудно что-либо сказать. Слишком прочно их функционирование связано с социальными и экономическими проблемами общества. Возникая на волне относительного общественного благополучия, порождающего активный покупательский спрос и тягу к необычному досугу, торговые центры могут прекратить свое функционирование в случае депрессивных социально-экономических явлений в обществе, как это наблюдается в США, где по разным оценкам в ближайшие 20 лет будут

закрываются десятки, сотни торговых центров [14]. Показателен также пример Франции, в которой строительство торговых центров набрало слишком высокие темпы, и в связи с этим был принят закон, запрещающий их возведение. В России же в настоящее время ситуация совершенно иная. Работа крупнейших торгово-развлекательных центров в Москве обеспечивает оборот, достигающий более 30 тыс. долларов с 1 м² торговой площади, что по-прежнему привлекает инвесторов к реализации подобных проектов [15].

Выводы. Таким образом, среди особенностей проектных решений торговых центров в крупных российских городах следует отметить следующие:

1. Торговые центры возводятся в местах узловых точек транспортных магистралей внутри города или в периферийной его части.
2. Торговые центры наряду с главной торговой функцией включают в себя целый ряд сопутствующих функций.
3. Основными социальными принципами проектирования торгового центра являются: безопасность функционирования, активизация общественно-торговой деятельности, повышение комфортности пребывания посетителей, экономия свободного времени, экономия территории.
4. При строительстве торговых центров целесообразно возведение подземных этажей и сокращение числа наземных этажей.
5. Архитектура торговых центров зависит от места их расположения в городе и решается простыми объемно-пространственными композициям компактного типа в сочетании с броским цветовым решением.

Список литературы

1. Гайдученя, А.А. Новые методы проектирования торговых зданий / А.А. Гайдученя, М.М. Комарова // Строительство и архитектура. – 1981. – № 7. – С. 13–15.
2. Нюренбергер, Л.Б. Современные подходы к классификации торговых центров / Л.Б. Нюренбергер, Е.Ю. Пятова // Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. – 2013. – №1 (45). – С. 93–96.
3. Шакирова, А.Ф. Особенности проектирования систем оповещения и управления эвакуацией для торгово-развлекательных комплексов / А.Ф. Шакирова // Технологии техносферной безопасности. – 2009. – №3. – URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2009-3/03-03-09.ttb.pdf> (дата обращения: 02.07.2019).
4. Самсакова, А.С. Эволюция торговых пространств / А.С. Самсакова, С.И. Чикота // Молодежь. Наука. Будущее: сб. науч. трудов. – Вып. 3. – Магнитогорск: МГТУ, 2004. – С. 222–226.
5. Воронцова, Д.С. Коммуникационно-рекреационные пространства торговых центров: научные определения / Д.С. Воронцова // Архитектон: известия вузов. – 2009. – № 1 (25). – С. 5.
6. Казаков, М.М. Анализ работы автостоянок в торговых и деловых центрах Санкт-Петербурга / М.М. Казаков // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 4 (33). – С. 220–222.
7. Гельфонд, А.Л. Архитектурное проектирование общественных зданий и сооружений / А.Л. Гельфонд. – М.: Архитектура-С, 2006. – 280 с.
8. Нечепуренко, Е.О. Возведение торговых центров по современной технологии / Е.О. Нечепуренко, Ю.В. Большаков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2012. – Т. 2, № 70. – С. 212–215.
9. Корниенко, В.Д. Проблемы современного российского градостроительства (на примере г. Магнитогорска) / В.Д. Корниенко, С.И. Чикота // Жилищное строительство. – 2014. – № 11. – С. 30–32.
10. Seal, B. Baudelaire, Benjamin and the Birth of the Flâneur / B. Seal // Psychogeographical Review. 14.11.2013. – URL: <http://psychogeographicreview.com/ baudelaire-benjamin-and-the-birth-of-the-flaneur/> (дата обращения: 02.07.2019).
11. Развлекательные центры получают бэби-паркинги вместо боулингов. – URL: <http://www.g2p.ru/publications/?opn=35798> (дата обращения: 02.07.2019).

12. Лавров, Л.П. От центров торговых – к центрам общественным / Л.П. Лавров, Ф.В. Перов // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 5 (52). – С. 46–54.
13. Адамович, В.В. Архитектурное проектирование общественных зданий и сооружений / В.В. Адамович, Б.Г. Бархин, В.А. Варезкин [и др.]. – М.: Стройиздат, 1985. – 542 с.
14. Uberti, D. The Death of the American Mall / D. Uberti // The Guardian. – June 19. 2014. – URL: <https://www.theguardian.com/cities/2014/jun/19/-sp-death-of-the-american-shopping-mall> (дата обращения: 02.07.2019).
15. Николаева, Т.И. Торговые центры: особенности развития и эффективность / Т.И. Николаева // Известия Уральского государственного экономического университета. – 2013. – № 6(50). – С. 57–61.

References

1. Gajduchenya, A.A. New methods of designing commercial buildings / A.A. Gajduchenya, M.M. Komarova // Construction and architecture. – 1981. – No. 7. – P. 13–15.
2. Nyurenberger, L.B. Modern approaches to the classification of shopping centers / L.B. Nyurenberger, E.Yu. Pyatova // Bulletin of Belgorod University of Cooperation, Economics and Law. – 2013. – No. 1 (45). – P. 93–96.
3. Shakirova, A.F. Features of design of systems of the notification and management of evacuation for shopping malls / A.F. Shakirova // Technosphere safety technologies. – 2009. – No. 3. – URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2009-3/03-03-09.ttb.pdf> (data obrashcheniya: 05.07.2018).
4. Samsakova, A.S. Evolution of trading spaces / A.S. Samsakova, S.I. Chikota // Youth. The science. Future: sat. labours. – Vol. 3. – Magnitogorsk: MSTU, 2004. – P. 222–226.
5. Voroncova, D.S. Communication and recreational spaces of shopping centers: scientific definitions / D.S. Voroncova // Architecton: Izvestiya vuzov. – 2009. – No. 1 (25). – P. 5.
6. Kazakov, M.M. Analysis of parking lots in shopping and business centers of St. Petersburg / M.M. Kazakov // Bulletin of civil engineers. – 2012. – No. 4 (33). – P. 220–222.
7. Gel'fond, A.L. Architectural design of public buildings and structures / A.L. Gel'fond. – M.: Arhitektura-S, 2006. – 280 p.
8. Nechepurenko, E.O. Construction of shopping centers on modern technology / E.O. Nechepurenko, Yu.V. Bol'shakov // Actual problems of modern science, technology and education. – 2012. – Vol. 2, No. 70. – P. 212–215.
9. Kornienko, V.D. Problems of modern Russian urban planning (on the example of Magnitogorsk) / V.D. Kornienko, S.I. Chikota // Housing construction. – 2014. – No. 11. – P. 30–32.
10. Seal, B. Baudelaire, Benjamin and the Birth of the Flâneur / B. Seal // Psychogeographical Review. 14.11.2013. – URL: <http://psychogeographicreview.com/ baudelaire-benjamin-and-the-birth-of-the-flaneur/> (data obrashcheniya: 05.07.2018).
11. Entertainment centers will receive baby Parking instead of bowling. – URL: <http://www.g2p.ru/publications/?opn=35798> (data obrashcheniya: 05.07.2018).
12. Lavrov, L.P. From shopping centers to public centers / L.P. Lavrov, F.V. Perov // Bulletin of civil engineers. – 2015. – No. 5 (52). – P. 46–54.
13. Adamovich, V.V. Architectural design of public buildings and structures / V.V. Adamovich, B. G. Barkhin, V. A. Varezkin [et al.]. – M.: Strojizdat, 1985. – 542 p.
14. Uberti, D. The Death of the American Mall / D. Uberti // The Guardian. – June 19. 2014. – URL: <https://www.theguardian.com/cities/2014/jun/19/-sp-death-of-the-american-shopping-mall> (data obrashcheniya: 05.07.2018).
15. Nikolaeva, T.I. Shopping centers: features of development and efficiency / T.I. Nikolaeva // Izvestiya Ural state University of Economics. – 2013. – No. 6 (50). – P. 57–61.

УДК 727.03:069

*Московский архитектурный институт
(государственная академия)*Россия, 107031, Москва, ул. Рождественка,
дом 11/4, корпус 1, стр. 4,
тел.: (903) 596-28-12**Хомяков Александр Иванович,**
кандидат архитектуры, профессор кафедры
«Архитектура общественных зданий»
E-mail: a.khomyakov@mail.ru
office@markhi.ru*Moscow Architectural Institute (State
Academy)*Russia, 107031, Moscow, Rozhdestvenka St.,
house 11/4, building 1, building 4,
tel. (903) 596-28-12**Khomyakov Alexander Ivanovich,**
Candidate of Architecture, Professor
of the department «Architecture of Public
Buildings»
E-mail: a.khomyakov@mail.ru
office@markhi.ru

СИМВОЛЫ ЧТИМЫХ ПРОСТРАНСТВ

А.И. Хомяков

Тема архитектурно-художественного решения памятных городских и природных территорий, отмеченных важными историческими событиями, уникальными природными явлениями и знаменательными актами культурной жизни, вызывает пристальный интерес различных гражданских сообществ, искусствоведов и представителей творческих профессий. В статье рассматриваются вопросы создания памятников и мемориальных пространств, эволюция их образного языка и его вероятные трансформации в будущем.

Ключевые слова: памятники, мемориалы, культура, архитектура, скульптура, пластика, символизм, реализм, абстракционизм

SYMBOLS OF ESTEEMED SPACES

A.I. Khomyakov

The theme of the architectural and artistic decision of memorable urban and natural territories marked by important historical events, unique natural phenomena and significant acts of cultural life, attracts keen interest of various civil communities, art historians and representatives of creative professions. The article deals with the creation of monuments and memorial spaces, the evolution of their imaginative language and its likely transformations in the future.

Keywords: monument, memorial, culture, architecture, sculpture, plastic, symbolism, realism, abstractionism

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы восприятия памятного сооружения-мемориала выражаются главным образом в решении вопросов выбора архитектурного образного языка, художественного лексикона, всем понятного и доступного. Недавняя практика создания интересных, нетривиальных по своему дизайнерскому и смысловому решению мемориально-музейных комплексов наглядно демонстрирует часто неоднозначное их понимание. Например, Мемориал жертвам холокоста в Берлине (арх. П. Айзенманн), решённый в подчёркнуто минималистических трактовках образа древнего еврейского некрополя праведников, стал предметом широких дискуссий. «Не всем нравятся эти «камни преткновения» в центре Берлина. Но их невозможно не заметить. И каждый спрашивает себя: для чего они? Что символизирует это море камней?» [1]. Это показывает рискованность выбранной автором проекта радикальной формы повествования, часто приводящей к непониманию посетителями комплекса его пространственного и сюжетного замысла.

С другой стороны, опросы участников ряда туристических экскурсий по историческим памятным комплексам Крыма, в которых принимал участие автор этого исследования (Малахов курган и Исторический бульвар в Севастополе), часто демонстрировали непонимание нарратива орнаментальных и скульптурных компонентов

мемориалов XIX века (за исключением военной арматуры). Экскурсанты в целом правильно оценивали смысл общей композиции памятника и организацию пространства, но было заметно, что это был результат не считывания закодированных пластических посланий, а заслуга предварительной работы гида. Бесспорна потребность в памятных пространствах, с одной стороны, но неопределённость, невнятность их артикуляции, слабая доходчивость до общественного адресата умягает благородные мотивации их создания.

Проблематикой эволюции архитектурно-художественных средств мемориальной архитектуры занимались отечественные исследователи А. Габричский, В. Маркузон, П. Максимов, Е. Кириченко, которые обстоятельно раскрыли исторические этапы этой эволюции, в основном аспекты традиционного направления, исповедующего реалистическую манеру изложения средствами скульптуры, портретными изображениями и текстами [2, 3]. Из зарубежных исследователей в этой области наиболее авторитетен С. Михальский, давший анализ истории общественного памятника как культурного, политического и социального явления [4].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

История мемориальной архитектуры XIX–XX вв. (памятников, монументов, мемориалов, мемориально-музейных комплексов) показывает, что её послания излагаются каждый раз особыми средствами, аутентичными художественными языками [5]. Несовпадение языка с духом времени, несоответствие общественным настроениям и ожиданиям крайне опасны для памятной архитектуры. Мемориальные объекты, выполненные сегодня духе эклектики, или наоборот, появление новаторских решений во времена жестких диктатур были и остаются рискованными и конфликтными. Для того чтобы объяснить, почему это происходит, следует понять лексикон архитектурно-художественного языка этой архитектуры «особого рода» – архитектуры памяти.

Исследования, проводившиеся упомянутыми выше аналитиками, дают основание автору выделить два принципиальных вектора выразительности мемориальной архитектуры: «реалистический» и «абстрактный». Первый подразумевает под собой реалистичное, часто натуралистичное изложение заявленной комплексом темы. Второй – послание, закодированное в отвлечённые и беспредметные формы.

Хотя в обоих виден явный имманентный и технический дуализм, эти направления не часто встречаются в чистом виде, в каждом из них в различных соотношениях присутствуют фрагменты другого. Однако доминирующая направленность, как правило, устанавливается достаточно объективно. Реалистические памятники фигуративны, многословны и «говорливы». Абстрактные – «немногословны», загадочны и многозначны.

Неумолимая смена одного культурного вектора другим, как правило, является результатом целого ряда исторических предпосылок: трансформаций мироустройства, миропонимания, технических возможностей. Эти тенденции проявляют себя и в данной области: «маятник» культуры под действием глобализма и мультикультурализма, снижение возможностей чувственного и художественного восприятия, резкое оскудение ремесленных возможностей и средств, с одной стороны, индустриализация и типизация искусства – с другой, в последние десятилетия XX века делают абстрактный язык в архитектуре более востребованным, в отличие от реалистического.

Тем не менее реалистическое направление в мемориальном строительстве продолжает своё движение. Его главные средства выражения, такие, как скульптура (круглая и плоская), декоративный орнамент, и технические приёмы (детализация, иллюстративность, перечисление) постепенно уступают место текстовым и фотокомпозиционным включениям. Это нашло широкое отражение, например, в мемориальном оформлении улиц и площадей Санкт-Петербурга на праздновании 75-летия снятия блокады Ленинграда в январе 2019 года, когда черно-белые фотографии в натуральном масштабе декорировали фасады домов, передавая атмосферу тех драматических событий.

«Бегущая строка» по конструкциям памятных сооружений, встроенные в историческое дорожное мощение металлические панели с текстами и датами знаменательных событий сегодня являются наиболее распространёнными новыми проявлениями

реалистического повествования в мемориальной архитектуре [6]. Но и скульптурные средства продолжают применяться в новых памятниках, монументах и мемориалах. К таким проявлениям с полным основанием можно отнести объекты, в которых памятники и монументы выполнены предельно натуралистично, с объемом деталей и утрированным декором. Это направление пользуется специфическим спросом при создании мемориалов-деклараций, мемориалов – политических заявлений, адресованных массовому сознанию. Применяемый в этих случаях язык «детализации» позволяет отнести эти работы к особой разновидности реализма – гиперреализму, т.е. языку скульптур-муляжей. Но нельзя не согласиться с Н.В. Вороновым, который справедливо утверждает, что «если скульптура будет недостаточно обобщена, излишне натуралистична, она превратится в муляж, не будет восприниматься как произведение искусства, а тем более как памятник» [7]. Подобные решения, ставшие причудливым символом местной традиции и продуктов «популярной» культуры (поп-культуры), в настоящее время получили распространение в странах Азии и Дальнего Востока (например, мемориально-музейный комплекс древнему богу Гуань Юю в Цзинчжоу, 2016, Китай).

Совсем по-другому вопросы смыслового выражения решаются в «абстрактном» направлении проектирования памятных объектов, там, где в основном работает обращение к знаковому коду, частичному или полному отказу от художественной пластики, использованию геометрических, плоскостных и линейных мотивов.

С точки зрения приемов композиции (объемно-пространственного построения мемориала), подходов к применению тех или иных сочетаний архитектурных форм, художественно-изобразительных средств, а также его взаимоотношений с внешним пространством можно говорить о трех жанрах «абстрактного» направления мемориальной архитектуры.

Авангардизм

Такое определение периода дается по преобладанию в нем произведений исключительно новаторских архитектурно-художественных школ 20–30-х годов XX века (футуризм, конструктивизм, кубизм, супрематизм и др.).

В определении, приводящемся во многих сетевых ресурсах, дается трактовка авангардистской архитектуры как формы архитектуры, выраженной эстетикой антиисторизма, т.е. длинными динамическими линиями, предполагающими скорость и динамику [8].

Несмотря на то, что это движение обладало большим энергетическим потенциалом (подпитываемым от радикальных революционных настроений ряда европейских стран), отставало передовые увлечения наукой и техникой, творческий результат авангардизма не оправдал своих ожиданий. В области мемориального зодчества он остался практически на визионерском уровне, в котором можно выделить наиболее яркие проекты: Башня III интернационала Татлина, памятник Колумбу Мельникова, фантазийные проекты Сент-Элиа и некоторые другие. К авангардистскому этапу можно отнести также наиболее выразительные мемориальные памятники, монументы и мемориалы эпохи конструктивизма, такие, как Монумент К. Либкнехту и Р. Люксембург архитектора Миса ван дер Роэ (1926 г., Берлин, Германия).

Синтетизм

Позже повсеместно на смену увлечению «авангардом» пришел новый жанр «абстрактных» мемориалов, который условно предлагается назвать «синтетическим». Это явление можно охарактеризовать как симбиоз архитектурного и художественного языков в выражении идеалистических представлений, главным образом, идеологических воззрений. Его появление отмечено во всех странах в 30–50-х годах прошлого века. Мемориальной и монументальной архитектуре присущи воспитательные и прославляющие смыслы. Но особенно это актуально для авторитарных идеологий. СССР, Италия, Германия и Испания лидировали в этой категории. Именно в них синтаксису символизма были приданы главенствующие функции пропаганды, народного воспитания и идеологического назидания [9].

Всё содержание в «синтетических» памятных комплексах передается архитектурными компонентами (подпорными стенками, лестничными маршами, пилонами, стелами и др.), контрастными монументальными пропорциями, но главная центральная композиционная и смысловая роль остается за скульптурным памятником. Такое сочетание, в котором архитектурное начало имеет преобладающее и главенствующее значение, а скульптура присутствует лишь в качестве пространственной и смысловой «доминанты», можно считать сохранившимся в отдельных областях отечественной и зарубежной практики вплоть до настоящего времени (Мемориал на Поклонной горе в Москве). В зарубежной практике применение этой схемы характерно больше для конца 50-х годов XX века.

Как правило, емкость скульптурных композиций в «синтетических» мемориалах варьируется в ограниченном виде: от единичного памятника до групповой скульптурной композиции. Таким комплексам свойственно включение «фрагментарных» скульптурных памятников и монументов, т.е. утрированно выраженных отдельно взятых голов, рук, ладоней и др. Эти скульптурные объекты выполнялись в условной обобщенной трактовке и являлись смысловой и композиционной доминантой мемориального пространства. Скульптура могла заменяться или совмещаться с рельефными изображениями, размещенными на стелах или блоках, её окружающих или фланкирующих. К объектам, представляющим это направление, можно отнести советское монументальное произведение В. Мухиной «Рабочий и колхозница», «Ардеатинские пещеры» в Италии, Мемориал мучеников в Чанаккале (1954 г., Турция), Национальный мемориал свободы и Первой мировой войны в Канзасе (1926 г., США).

Геометризм

К третьей группе «абстрактного» направления можно отнести комплексы, которые в своем пространственном и образном построении полностью обходятся без художественно-изобразительной составляющей, ограничиваются только архитектурной формой. Они оперируют исключительно лишь категориями абстрактными и символическими и их средствами выражения – плоскостями, формами и объемами, заимствованными из лексикона геометрии, беспредметного искусства или архитектуры модернизма, поэтому данный жанр предлагается именовать «геометризмом».

Как и ранее рассмотренный «авангардизм», этот жанр в своем постижении пространственных кодов и понимании образного смыслового языка вызывает большие проблемы по сравнению с каноническими фигуративными архитектурными произведениями. Поэтому мемориальные ансамбли жанра «геометризм» в 1960–70-е годы строились нечасто. Наиболее яркие его представители: Мемориал Егерн – памятник геноциду армян в Османской империи 1915 года, появившийся в 1965 году, и многочисленные мемориальные комплексы 1960-х годов сербского архитектора Б. Богдановича. «Большое мастерство его сказалось в том, что он сумел сочетать геометрические формы подпорных стен с живописной природой, используя контрасты зелени, камня и бронзы» [10].

В последние десятилетия в мировой практике появились еще несколько произведений этой категории: Мемориал Шоа в Болонье (Италия, арх. С. Босси), мемориал в Ривальте (Италия, 2018 г., арх. Р. Ричетти). Первый посвящен жертвам холокоста в Италии, установлен на главной вокзальной площади и представляет собой две массивные симметричные металлические вертикально стоящие плиты, между которыми оставлено полутораметровое пространство. Таким образом, «тот, кто пройдет между двумя плитами, испытает страх и дискомфорт. Совсем как узники концлагерей, которым приходилось пробираться вот такими узкими тропками между барakov» [11]. Второе сооружение представляет собой утопленный в землю протяженный прямоугольный объем музея, символизирующий лагерьный барак, интерьер которого освещается геометрическими пятнами световых фонарей различной конфигурации, расположенных на плоской плите кровли в напряженном ритме.

Наглядно иллюстрируют жанр «геометризма» также два произведения израильского мастера-монументалиста архитектора Д. Каравана – Мемориал в пустыне Негев (1968 г.) и Мемориал «Белая площадь» в Тель-Авиве (1988 г.). Оба сооружения

композиционно решены из геометрических объемов, по-разному деформированных и усечённых: куба, пирамиды, шара, плиты и др. В первом случае они расставлены в свободном порядке, во-втором – в регулярном.

Несмотря на то, что это явление по-прежнему остается мало распространенным, оно представляется перспективным в силу его эпатажных свойств и экономической целесообразности показателей (в связи с отсутствием художественно-изобразительной составляющей).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предельно точно и результативно донести мемориальные сообщения до адресата – главная задача как «реалистического», так и «абстрактного» направления мемориальной архитектуры. Оба направления сохранили свою востребованность в новом веке благодаря последовательному стремлению к максимальной радикализации, обострению своих архитектурных и художественных выражений.

«Реалистическое» направление в ММК обретает новые очертания, которые главным образом интерпретируются мотивами гиперреализма, передаваемого формами фигуративных, детально и подробно выполненных в натуральном масштабе фигур героев, оружия и сопутствующих атрибутов. Так, по замыслам его апологетов, достигается максимально достоверное и документальное отображение знаменательного исторического события. Выбор этого средства и ожидание соответствующего художественного результата в основном присуще программам, нацеленным на создание простых обращений к общим историческим ценностям, к сообществам со средним и выше среднего уровнем образного воображения и мысленной интуиции. К подобным жанрам обращаются в случаях создания произведений патриотического характера, назидательного и поучительного содержания, рассчитанных на быстрое считывание без аналитических усилий. Также всё большее распространение приобретают фото-аудио-видео-повествования и применение текстовых настенных и дорожных включений.

«Абстракционизм» в мемориальной архитектуре также имеет тенденцию к радикализации. Она выражается главным образом в демонстративном отказе от языка семиотики и знаков, демонстрирует переход к чисто пространственным средствам, таким, как: расстояние, преграда, пустота, бесконечность, повторяемость и, главное, обращение к природным ландшафтам и вообще к природе (мемориал «Катынь», Смоленская обл., арх. М. Хазанов).

Список литературы

1. Володина, Э. Памяти жертв Холокоста / Э. Володина. – URL: <https://www.dw.com/ru/памяти-жертв-холокоста/a-5553145> (8.07.2019)
2. Габричевский, А. Введение к монографии «Мемориальная архитектура» / А. Габричевский // Память и время. Из художественного архива Великой Отечественной войны 1941–1945 гг.: материалы, документы, статьи, комментарии; авт.-сост. Т.Г. Малинина, Е.В. Огаркова; РАХ, НИИ теории и истории изобразит. искусств. – М.: Галарт, 2011. – 455 с.
3. Кириченко, Е.И. Запечатленная история России. Монумены XVIII – начала XX века. Кн. 2: Архитектурные ансамбли и скульптурный памятник / Е.И. Кириченко. – М.: Жираф, 2001. – 736 с.
4. Michalski, S. Public Monuments. Art in Political Djangage 1870-1997 / S. Michalski. – London: Reaktion Books Ltd, 1998. – 236 p.
5. Артамонов, В.А. Город и монумент / В.А. Артамонов. – М.: Стройиздат, 1974. – 224 с.
6. Cordes, M. Landschaft-Erinnern: Uber das Gedachtnis im Erinnern von Orten / M. Cordes. – Hamburg: Junius, 2010. – 230 p.
7. Воронов, Н.В. Советская монументальная скульптура 1960-1980 / Н.В. Воронов. – М.: Искусство, 1984. – С.45.

8. Авангард в архитектуре. – URL: <https://www.archidizain.ru/2014/08/blog-post.html> (8.06.2017)
9. Голомшток, И.Н. Тоталитарное искусство / И.Н. Голомшток. – М.: Галарт, 1994. – 296 с.
10. Белоусов, В.Н. Современная архитектура Югославии / В.Н. Белоусов. – М.: Стройиздат, 1986. – С. 180.
11. Shoah Memorial от SET architects, Bologna, Italy. – URL: <https://okultureno.ru/news/17241-shoah-memorial-ot-set-architects-bologna-italiya/> (8.07.2019)

References

1. Volodina, E. The memory of the victims of the Holocaust / E. Volodina. – URL: <https://www.dw.com/ru/памяти-victims-Holocaust/a-5553145> (8.07.2019)
2. Gabrichevskij, A. Introduction to the monograph «Memorial architecture» / A. Gabrichevskij // Memory and time. From the art archive of the great Patriotic war of 1941-1945: materials, documents, articles, comments; ed.comp. T.G. Malinina, E.V. Ogar-kova; RAH, research Institute of theory and history will portray. arts'. – М.: Galart, 2011. – 455 p.
3. Kirichenko, E. I. Imprinted history of Russia. Monuments of the XVIII – beginning of XX century. Book 2: Architectural ensembles and sculptural monument / E. I. Kirichenko. – М.: Giraffe, 2001. – 736 p.
4. Michalski, S. Public Monuments. Art in Political Djangage 1870-1997 / S. Michalski. – London: Reaktion Books Ltd, 1998. – 236 p.
5. Artamonov, V.A. City and monument / V.A. Artamonov. – М.: Stroizdat, 1974. – 224 p.
6. Cordes, M. Landschaft-Erinnern: Uber das Gedachtnis im Erinnern von Orten / M. Cordes. – Hamburg: Junius, 2010. – 230 p.
7. Voronov, N.V. Soviet monumental sculpture 1960-1980 / N.V. Voronov. – М.: Art, 1984. – P. 45.
8. Avant-garde in architecture. – URL: <https://www.archidizain.ru/2014/08/blog-post.html> (8.06.2017)
9. Golomstock, I.N. Totalitarian art / I. N. Golomstock. – М.: Galart, 1994. – 296 p.
10. Belousov, V.N. Modern architecture of Yugoslavia / V.N. Belousov. – М.: Stroizdat, 1986. – P. 180.
11. Shoah Memorial от SET architects, Bolon'ya, Italiya. <https://okultureno.ru/news/17241-shoah-memorial-ot-set-architects-bolonya-italiya/> (8.07.2019)

УДК 27–523:721.01:94(470.345)

*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева*Россия, 430005, Саранск,
ул. Большевикская, д. 68**Марьёнкин Алексей Валерьевич,**
магистрант кафедры «Строительные материалы и технологии»
E-mail: alexeymaryonkin@gmail.com**Романова Софья Александровна,**
магистрант кафедры «Строительные материалы и технологии»
E-mail: stemmili420@gmail.com**Родин Александр Иванович,**
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные материалы и технологии»
E-mail: AL_Rodin@mail.ru*Mordovian State University
named after N.P. Ogarev*Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.**Maryonkin Alexey Valer'evich,**
Undergraduate of the department «Building materials and technologies»
E-mail: alexeymaryonkin@gmail.com**Romanova Sofia Aleksandovna,**
Undergraduate of the department «Building materials and technologies»
E-mail: stemmili420@gmail.com**Rodin Aleksandr Ivanovich,**
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Building materials and technologies»
E-mail: AL_Rodin@mail.ru

АРХИТЕКТУРА ЦЕРКВИ В ЧЕСТЬ ИКОНЫ «ВСЕХ СКОРБЯЩИХ РАДОСТИ» В С. ЕНГАЛЫЧЕВО РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ

А.В. Марьёнкин, С.А. Романова, А.И. Родин

Дан анализ архитектуры приходской церкви в честь иконы «Всех скорбящих радости», построенной в 1820 г. в с. Енгальчево (ныне Дубёнский район Республики Мордовия). Приведена история строительства церкви, описаны композиция здания, убранство его интерьеров. Представлены авторские фотографии фасадов и фрагментов сохранившихся фресок. Предложен вариант восстановления объекта культурного наследия регионального значения.

Ключевые слова: архитектура, церковь, классицизм, история, современное состояние, восстановление

ARCHITECTURE OF CHURCH IN HONOR OF ICON «JOY OF ALL WHO SORROW» IN ENGALYCHEVO, REPUBLIC OF MORDOVIA

A.V. Maryonkin, S.A. Romanova, A.I. Rodin

The article is devoted to the analysis of the architecture of the parish church in honor of the icon «Joy of All Who Sorrow», built in 1820 in the village of Engalychevo (now Dubensky District of the Republic of Mordovia). The article describes the history of construction and composition of the building, the decoration of its interiors. Author's photos of facades and fragments of preserved frescoes are presented. The desing of restoring the cultural heritage facility of regional significance is proposed.

Keywords: architecture, church, classicism, history, current state, restoration

На протяжении долгого времени самыми величественными и красивыми зданиями российской провинции были православные храмы. Почти каждый из них стал архитектурным символом города или села. Сельские приходские церкви стали особым типом архитектурного наследия, зачастую это единственное каменное здание, до сих пор являющееся доминантой поселения. К сожалению, вследствие событий, произошедших после Октябрьской революции 1917 года, и проводимой государством антирелигиозной политики большинство храмов были закрыты, а многие утрачены

навсегда. Об архитектурном облике большинства сельских церквей сегодня можно судить только по сохранившимся фотографиям и чертежам. Так, если в начале XX века на территории современной Мордовии действовало около 640 храмов, то сегодня их насчитывается порядка 260, более четверти из них находится в аварийном состоянии.

История церковного зодчества в мордовском крае начинается в середине XVII в., когда повсеместно возводились деревянные клетские церкви. С середины XVIII в. начинается перевод церквей в камень и строительство церквей в классических стилях – барокко, классицизм. Остановимся подробно на описании классицистической церкви, построенной в с. Енгальчево Симбирской губернии (ныне Дубёнский район Республики Мордовия).

Центральную часть с. Енгальчево занимает прихрамовая территория церкви, ограниченная улицей Гагарина и речкой Лаша. Сформировавшаяся к концу XIX в. как целостный ансамбль территория стала ярким примером искусного сочетания классических черт и местной строительной традиции многофункционального центра села. Прилегающие к площади улицы представляют собой достаточно сформированный ансамбль жилых и сельскохозяйственных построек. Схема расположения церкви показана на рис. 1.

Как пишет С.Б. Бахмутов, первая деревянная церковь в с. Енгальчево была построена помещиками Жилиными в начале XVIII века [1]. Она располагалась в центре села на месте находящегося ныне мемориала на пересечении улиц Гагарина и Лесная. В 1820 году менее чем в ста метрах северо-западнее от старой церкви по указанию штабс-капитана Александра Сергеевича Жилина было построено каменное здание церкви во имя иконы Божией Матери «Всех скорбящих радости» с приделами во имя Архангела Михаила и Николая Чудотворца [2–4]. Церковь построена в стиле русского классицизма, автор проекта неизвестен. Возможно, автором являлся один из работавших в те годы епархиальных архитекторов Симбирска. Также возможно, что за основу проекта был взят альбом образцовых проектов или атлас чертежей, издававшийся Святейшим синодом и строительными ведомствами и широко распространенные в первой половине XIX века.

Согласно свидетельствам енгальчевцев сырье для производства основных строительных материалов добывалось в непосредственной близости от места строительства церкви. Глину для керамического кирпича добывали из Кукандина яика и Феденькина оврага, о чем свидетельствуют сохранившиеся в них до нашего времени объемные полукруглые ямы [2]. Мел для производства извести, вероятнее всего, использовали тоже из местных меловых пород, залегающих на окраине села. Изготовление керамического кирпича и извести осуществлялось в непосредственной близости с местом добычи.

Согласно паспорту объекта культурного наследия [5] до второй половины XIX века церковь состояла из двух объемов: собственно церкви (с алтарем, объемным куполом и трапезной) и отдельно стоящей колокольни. В этот период церковь имела один престол во имя Архистратига Божия Михаила Архангела (главным престольным праздником в Енгальчеве всегда считался Михайлов день). Новая Архангельская церковь не отапливалась, а богослужение зимой совершалось, очевидно, в старой отапливаемой церкви.

По данным Г.В. Илюшина [2], в 1880-х годах наследниками А.С. Жилина был сооружен переход от колокольни к трапезной, а окна второго света четверика были заложены. В это же время у северного и южного фасадов четверика строятся четырехколонные портики, заново оштукатуриваются фасады, деревянные наличники проемов меняются на штукатурные тяги [5]. После окончания строительства церковь имела уже три престола (иконостаса): главный (холодный) – во имя иконы Божией Матери «Всех скорбящих радости» и в приделах (теплые): справа – во имя Михаила Архангела, слева – во имя Святителя и Чудотворца Николая [6]. Здание церкви было обнесено высокой железной изгородью на кирпичном фундаменте. В этот же период, вероятно, перестала существовать старая деревянная церковь. В справочной книге

Н.И. Баженова в селе числится лишь один каменный храм и 2 568 прихожан. На рис. 2 представлена схема этапов строительства церкви.



Рис. 1. Ситуационная схема расположения церкви

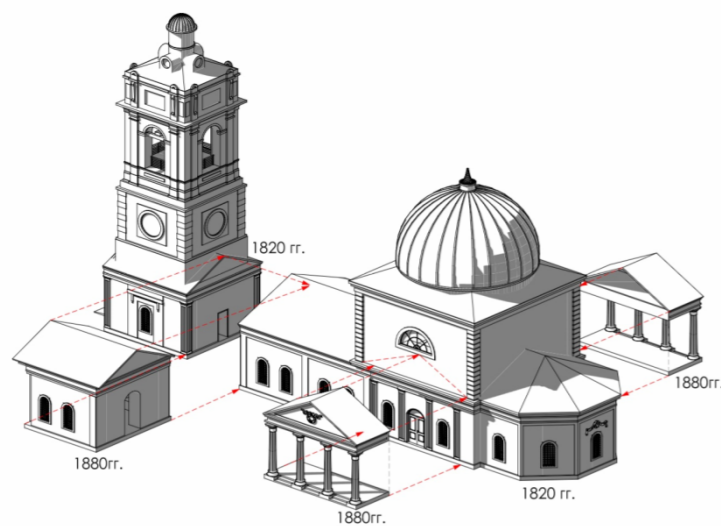
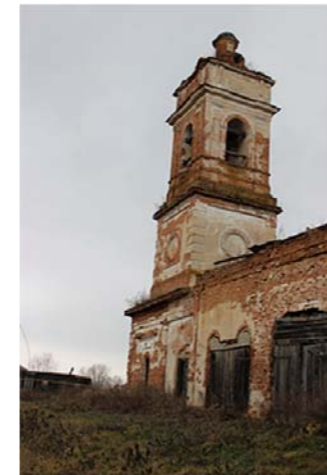


Рис. 2. Этапы строительства церкви

В 1930 году церковь в селе была закрыта, и с этого времени началось ее постепенное разрушение: был сброшен колокол из звонницы, сорваны листы железа с купола колокольни. В военные и послевоенные годы в церкви находился зерновой склад Атяшевского заготзерна. В 1960–1970-х годах трапезная и притвор церкви использовались колхозом под автогараж, в алтаре работала колхозная кузница. В этот же период был сломан портик на южном фасаде храма. В 1980-х годах крыша над притвором, трапезной и алтарем обрушилась. С конце 1990-х годов начал раскрываться и купол храма [2]. На рис. 3 представлена фотофиксация (авторские фотографии) состояния церкви на 2019 г.

Как пишет В.Б. Махаев, в конце XVIII века в архитектуру православных храмов мордовского края приходит классицизм [7]. Этот стиль более соответствовал скромным экономическим возможностям провинциальных заказчиков. По сравнению с барокко классицизм не был конструктивно сложным и декоративно богатым, он не требовал большого расхода дорогих материалов. Этим объясняется размах строительства усадебных и приходских церквей в конце XVIII – начале XIX в. Провинциальный классицизм тех лет характеризуется строгой гармонией, уравновешенностью, предельным рационализмом. Особенностью православной архитектуры стало сведение композиции к комбинации простых геометрических форм (куб, параллелепипед, цилиндр), все ее элементы были подчинены четкому метру, симметрии. Большая часть стены

оставалась гладкой, декор подчеркивал только верх и углы объемов. Одноосные планы церквей вписывались в вытянутый прямоугольник: квадратные алтарь, храм, трапезная и притвор были близки по площади. В мордовском крае, утратившем памятники древности, сохранилось два десятка культовых памятников начала XIX в.; несмотря на поздние переделки и разрушения, их историческая и художественная ценность значительна [7]. Церковь в честь иконы «Всех скорбящих радости» является замечательным примером архитектуры провинциального классицизма (ампира).



Вид с юго-востока



Вид с северо-востока



Вид с запада



Вид с юга

Рис. 3. Состояние церкви в 2019 г.

Расположенная на возвышенности, церковь выполняет роль композиционного центра села, является архитектурной доминантой окружающей среды. Своим южным фасадом церковь обращена к дороге с. Кайбичево – с. Дубёнки. В плане она представляет собой сильно вытянутый по оси восток-запад прямоугольник, включающий храм и трапезную, к которому с востока примыкает пятигранная апсида, а с запада – притвор и колокольня. Габариты церкви по плану без учета портиков – 40×10 м. Стены кирпичные оштукатуренные, кровля из листового железа. В объемно-пространственной композиции тяжелый статичный четверик храма, венчаемый полусферой купола, уравновешивается четырехъярусной колокольней. Трапезная и апсида значительно ниже храма. Стены трапезной, притвора, апсиды прорезаны высокими арочными проёмами (их двадцать один) с коваными металлическими решетками, второй ярус храма прорезан четырьмя полуциркульными проёмами (по одному на каждой стороне). Декор фасадов состоит из карниза по верху четверика храма и из рустованных углов; дверные проёмы (их три) украшены плоскими пилястрами [5]. На рис. 4 представлены план и разрезы церкви по результатам обмера.

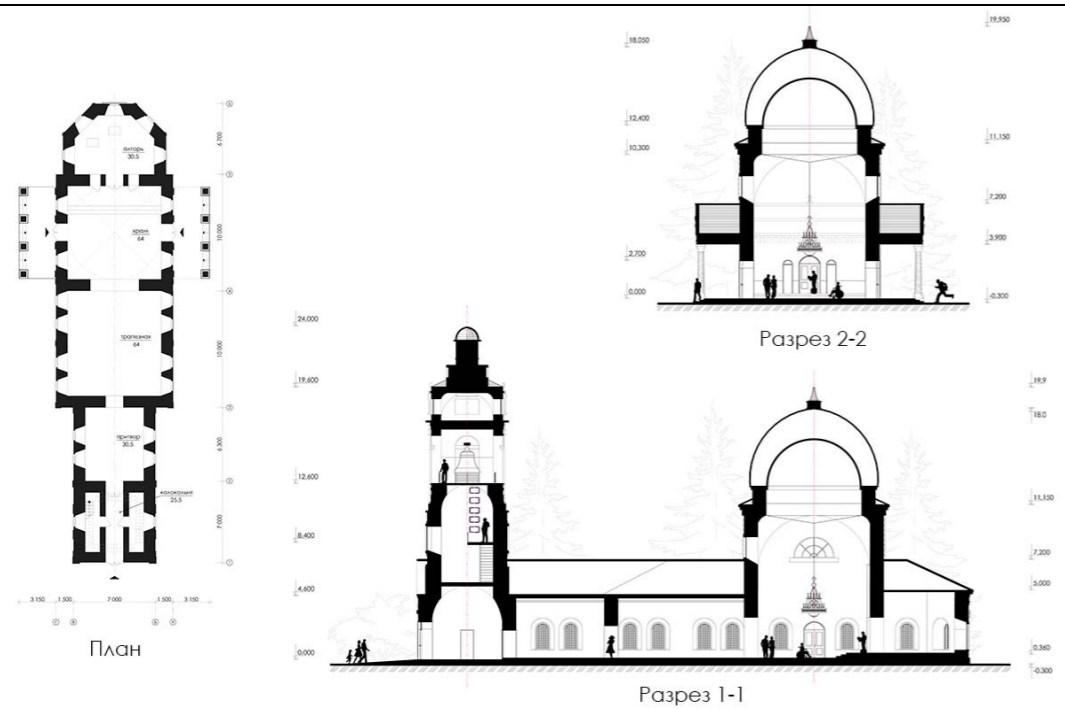


Рис. 4. План, разрезы 1-1 и 2-2 церкви по результатам обмера

Колокольня четырехъярусная, примыкает к теплым (отапливаемым) приделам. Фасадный декор выполнен в традициях провинциальной архитектуры ампира. Западная грань первого яруса, увенчанная фронтоном, имеет главный вход в церковь с прямой перемычкой, отмеченной полкой на кронштейнах. Арочные окна в южной и северной гранях первого яруса также украшены полочками. Углы нижнего и второго ярусов колокольни рустованы. Свод первого яруса колокольни коробовый. В центре граней на западном фасаде круглый оконный проем, а на северном, восточном и южном – ложные круглые окна. Третий ярус – звонница – с арочными проемами в центре украшен плоскими пилястрами, фланкирующими проемы, и горизонтальными полочками. Четвертый ярус – аттик – с выступающими на углах пилястрами увенчан полусферой небольшого купола с четырьмя декоративными люкарнами, который венчает круглый барабанчик с маленькой главкой. Все ярусы колокольни разделяются междуэтажными карнизами [5, 7]. Общая высота колокольни по результатам обмера – около 24 м.

Фасады перехода имеют два окна и карниз, расположенный в уровне карниза первого яруса колокольни. Кровля устроена на два ската.

Трапезная с северного и южного фасадов освещена четырьмя окнами, арочные перемычки и оштукатуренные наличники которых соответствуют размерам и декору окон церкви в первом свете. Карниз трапезной повторяет профили тех же объемов. Кровля, как и над переходом, устроена на два ската.

Высокий четверик храма увенчан куполом, который крыт железом «в мелкий гребень». Верхние углы четверика храма украшены мелким рустом. Стены четверика завершены невысоким аттиком и широким трехчастным карнизом. Северный и южный фасады четверика имеют два света и украшены четырехпилястровым портиком. Окна второго света полуциркульной формы расположены на центральной оси, на которой в первом свете находится дверной проем, фланкируемый двумя оконными проемами, соответствующими размерам и декору окнам церкви в первом свете. С северного и южного фасадов к храму пристроены портики из четырех колонн тосканского ордера, карниз которых расположен в уровне карниза апсиды и трапезной [5].

Апсида храма завершена невысокой впадушенной кровлей, крытой железом «в мелкий гребень», под которой проходит широкий многопрофильный карниз. Каждая грань апсиды разделена плоской прямоугольной нишей с оконными проемами в центре. Окна имеют арочные перемычки и украшены штукатурными наличниками, повторяющими форму проема.

Интерьер церкви был богат росписями на библейскую тематику. На смежных стенах храма, не закрытых иконостасом, сохранилось несколько фресок между уровнями первого и второго света. Росписи на евангельские темы были выполнены в академическом стиле, вероятно, симбирскими художниками конца XIX века. Они к настоящему времени почти полностью утрачены.

Особенностью интерьерного убранства енгальчевской церкви являлось то, что она, будучи одноапсидной, имела три иконостаса (Богородицы, Михаила Архангела и Николая Угодника). Многоярусный иконостас отделял алтарную часть от основного зала, устремляясь ввысь. Благодаря высокой алтарной преграде увеличивалось количество икон. На рис. 5 представлена фотофиксация сохранившейся росписи церкви.

Авторами предлагается эскизный проект восстановления церкви (рис. 6).



Рис. 5. Сохранившаяся роспись церкви



Рис. 6. Эскизный проект восстановления церкви

Цветовое решение фасадов храма обычно свидетельствует о его посвящении. Однако строгих правил на этот счет не существует, так что окраска может зависеть от замысла зодчего или местных условий. Для рассматриваемой церкви был выбран цвет желтой охры с белыми деталями (карниз, углы, колонны портика и пилястры), что дает прямую отсылку к известной московской церкви в честь иконы «Всех скорбящих радости».

Самым главным атрибутом интерьерного убранства церкви должен стать иконостас в деревянном исполнении. Его форму и символическое наполнение, как и настенные росписи, необходимо согласовывать с епархиальным заказчиком, но, если опираться на былые свидетельства об убранстве, можно предусмотреть также три иконостаса. В реконструируемых изображениях предусмотрена отделка стен белой интерьерной штукатуркой для дальнейшей росписи. Купольную часть церкви можно выполнить в светло-голубом цвете с изображением Воскресения Христа. Настенные росписи восстановить невозможно, но повторить былую иконографию представляется возможным.

В последнее время в Республике Мордовия уделяется большое внимание восстановлению памятников культовой архитектуры. В 2020 году церкви в честь иконы «Всех скорбящих радости», расположенной в с. Енгальчево Дубёнского района, исполняется 200 лет. Сегодня она пребывает в заброшенном и полуразрушенном состоянии, но здание еще возможно восстановить.

Список литературы

1. Бахмутов, С.Б. Храмы Мордовии / С.Б. Бахмутов. – Саранск, 2015. – 361 с.
2. Илюшин, Г.В. Вехи села Енгальчево / Г.В. Илюшин. – Саранск, 2006. – 535 с.
3. Илюшин, Г.В. Дубённое Присурье / Г.В. Илюшин. – Саранск, 2008. – 506 с.
4. Сусорева, М.М. Енгальчево // Мордовия: энциклопедия: в 2 т. – Т. 1. – Саранск: Мордовское книжное издательство, 2003. – С. 310.
5. Троскина, Н.Д. Церковь «Всех скорбящих радости». Мордовская АССР, Дубенский район, с. Енгальчево (1820 г.). Паспорт памятника истории и культуры (1977 г.). Архив Министерства культуры, национальной политики, туризма и архивного дела Республики Мордовия.
6. Баженов, Н.И. Статистическое описание соборов, монастырей, приходских и домашних церквей Симбирской епархии по данным 1900 года / Н.И. Баженов. – Симбирск, 1903. – 410 с.
7. Махаев, В.Б. Классическая архитектура православных церквей мордовского края // Актуальные вопросы строительства: материалы Международной научно-технической конференции: в 2 ч. – Ч. 1. – Саранск: Издательство Мордовского ун-та, 2007. – С. 175–180.

References

1. Bakhmustov, S.B. Churches of Mordovia / S.B. Bahmustov. – Saransk, 2015. – 361 p.
2. Ilyushin, G.V. Milestones of Engalycheva village / G.V. Ilyushin. – Saransk, 2006. – 535 p.
3. Ilyushin, G.V. Dubenskoe Prisure / G.V. Ilyushin. – Saransk, 2008. – 506 p.
4. Susoreva, M.M. Engalychevo // Mordovia: Encyclopedia: in 2 vol. – Vol. 1. – Saransk: Mordovian Book Publishing, 2003. – P. 310.
5. Troskin, N.D. Church Joy of All Who Sorrow. Mordovskaya ASSR, Dubensky district, village Engalychevo (1820). Passport of the monument of history and culture (1977). Archive of the Ministry of Culture, National Policy, Tourism and Archival Affairs of the Republic of Mordovia.
6. Bazhenov, N.I. Statistical description of cathedrals, monasteries, parish and home churches of the Simbirsk diocese according to the data of 1900 / N.I. Bazhenov. – Simbirsk, 1903. – 410 p.
7. Makhaev, V.B. Classical architecture of the Orthodox churches of the Mordovia region // Actual issues of construction: Materials of the International Scientific and Technical Conference: at 2 p. – Part 1. – Saransk: Mordovia University Press, 2007. – P. 175–180.

УДК 721.011.12

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

Герасимов Владимир Петрович,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Дизайн и художественное проектирование интерьера»,
руководитель архитектурной мастерской «ДИАЛОГ» при ПГУАС
E-mail: am_dialog@inbox.ru

Penza State University of Architecture and Construction

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

Gerasimov Vladimir Petrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the department «Interior design and artistic design», Head of the architectural workshop «DIALOG», PGUAS
E-mail: am_dialog@inbox.ru

ИЗ ОПЫТА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АРХИТЕКТУРНО-ПРОЕКТНОЙ МАСТЕРСКОЙ В СТРУКТУРЕ ВУЗА

В.П. Герасимов

Выполнен обзорный анализ деятельности архитектурно-проектной мастерской в структуре образовательного учреждения в контексте взаимного влияния проектных работ и научной деятельности. Дана характеристика условий деятельности проектной организации в структуре вуза. Определены условия для эффективного совмещения научной, проектной и учебной деятельности при выполнении *полного* комплекса проектно-изыскательских работ. Показано применение научных разработок, выполненных авторами проектов, в реальной проектной практике. Показано влияние проектной деятельности на формирование научно-исследовательской тематики.

Ключевые слова: архитектурно-проектная деятельность, образовательная деятельность, технологии строительного проектирования, строительные конструкции, дизайн среды, общественные здания

ARCHITECTURAL AND DESIGN WORKSHOP IN THE STRUCTURE OF THE UNIVERSITY

V.P. Gerasimov

An overview analysis of the work of the architectural and design workshop in the structure of an educational institution in the context of the mutual influence of design work and scientific activity was carried out. The characteristic of the conditions of the project organization in the structure of the university is given. The conditions for the effective combination of scientific, design and educational activities in the implementation of the full range of design and research work are defined. The application of scientific developments made by the authors of the project in real project practice is shown. The influence of project activities on the formation of research aspects is shown.

Keywords: architectural and design activities, educational activities, construction design technologies, building structures, environmental design, public buildings

В современных условиях архитектурно-строительное образование, строительная наука и практическая деятельность недостаточно синхронизированы [1]. Рассмотрим один из наиболее действенных инструментов решения проблемы – выполнение проектных работ на базе образовательной организации (на примере деятельности архитектурной мастерской «ДИАЛОГ» в структуре Пензенского университета архитектуры и строительства).

Основная особенность мастерской – выполнение *полного* цикла проектных работ в рамках вуза, а не отдельных разделов, что является обычной практикой.

Часть реализованных проектов представлена на рис. 1.

Рассмотрим общие характеристики организации деятельности проектной организации в составе вуза.



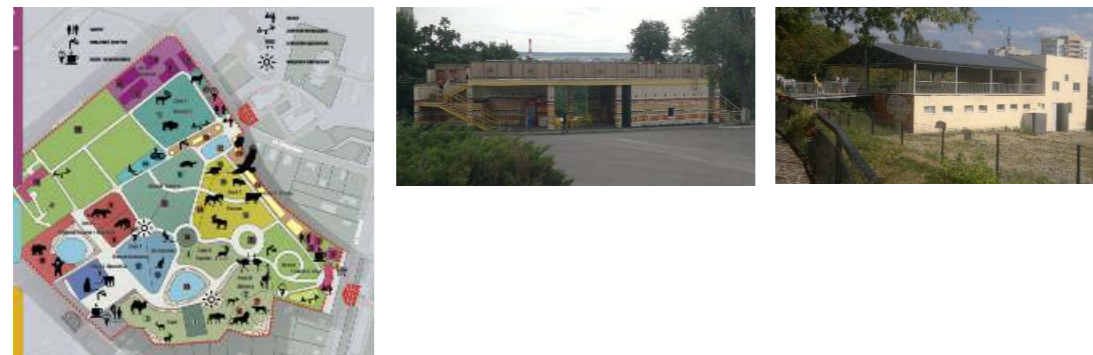
а) Многофункциональный спортивно-гимнастический комплекс «Буртасы» в г. Пензе, 2009-2010 гг. (общая площадь 41 000 м²)



б) Ледовая арена на 2 тыс. зрителей в г. Заречном Пензенской области, 2010 г. (общая площадь 14 000 м²)



в) ПКиО «Олимпийский» со строительством здания роллердрома в г. Пензе, 2012 г.



г) Реконструкция Пензенского зоопарка, 2012 г. (43 объекта строительства)



д) Общеобразовательные школы на 660 мест в г. Заречном Пензенской области и в мкр. Шуист г. Пензы, 2018 г. (общая площадь здания 12 000 м²)

Рис. 1. Основные реализованные проектные работы АМ «ДИАЛОГ» при ПГУАС

Архитектурная мастерская была организована при следующих обстоятельствах (1998 г.):

- появление частных инвестиций, увеличение доли нетипового проектирования, спрос на нестандартные и оперативные архитектурные решения, применение новых строительных технологий и материалов;

- наличие инициативной группы, имеющей научный и проектный опыт. В основе предприятия был заложен синтез архитектуры и конструирования с доминированием архитектуры, поскольку именно качество архитектурных решений определяет стиль работы, а также активнее проявляется в образовательном процессе;

- наличие специалистов смежных (проектных) специальностей, лабораторий, кадрового потенциала.

При организации проектной мастерской университет предоставляет помещения, техническое оснащение, лицензии, организационную поддержку и, как результат деятельности, получает связь с практикой, актуальные темы для прикладных научных исследований, повышение привлекательности профессии преподавателя, отчетные показатели.

Проектная мастерская получает возможность реализации научных исследований работников, возможность профессионального совершенствования, более широкие возможности работы со студентами.

Качественное совмещение таких разнородных и ответственных видов деятельности, как учебная и проектная, возможно только при грамотном планировании и самоорганизации.

Особенностью многих региональных проектных групп является широкий диапазон проектных решений – от проектирования интерьеров, благоустройства общественных пространств, индивидуальных жилых зданий до проектирования генеральных планов населенных пунктов, крупных объектов и комплексов. Большинство работ имеет бюджетное финансирование с соответствующими финансовыми и временными ограничениями. В последнем случае даже незначительные творческие решения приобретают особую ценность.

Опыт работы мастерской показывает целесообразность совмещения учебной и проектной деятельности, что отражается на повышении качества выпускаемых специалистов, а именно это является основным продуктом деятельности вуза.

С целью подтверждения взаимного влияния проектной практики и научных исследований остановимся подробнее на примерах реализованных работ, в которых использованы материалы либо предыдущих научных исследований участников проектирования, либо проектных ситуаций для постановки научных задач.

1. В ряде работ применены деревянные клееные конструкции, что является редким фактом для регионального строительства и стало возможным благодаря предшествующим научным работам проектировщиков в этой области. Именно деревянные конструкции во многом определили архитектурную привлекательность этих объектов.

В спортивном комплексе «Буртасы» применены клееные арки пролетами 48 м и 36 м (рис. 2). При их проектировании наряду с общепринятыми методами расчета использован авторский программный комплекс по автоматизированному проектированию деревянных арок, включая расчет по деформированной расчетной схеме и возможность расчета с учетом развития пластических деформаций [2] (рис. 3).

В здании роллердрома (ПКиО «Олимпийский») применены 21-метровые клееные рамы. При их проектировании также была использована работа, выполненная с участием авторов проекта, – комплекс по автоматизированному проектированию деревянных рам [3] (рис. 4).



Рис. 2. Монтаж деревянных арок при строительстве СК «Буртасы» в Пензе (2006-2008 гг.)

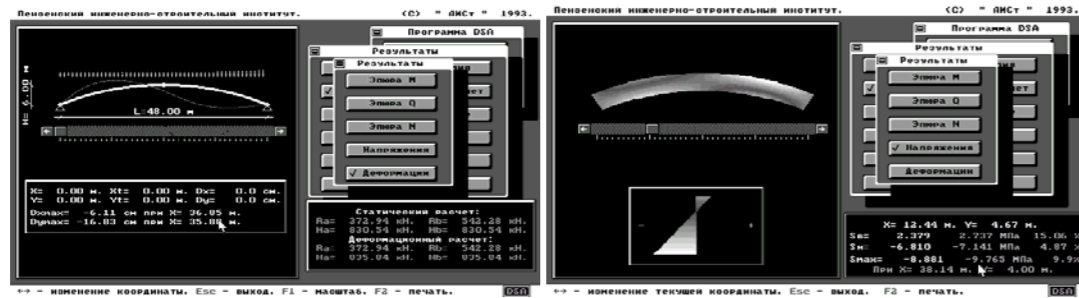


Рис. 3. Деформированная схема и распределение нормальных напряжений по оси и сечениям арки (виды экрана, программный комплекс DSA)



Рис. 4. Монтаж деревянных рам и эпюра моментов (программный комплекс PDR, вид экрана)

В мансардной надстройке здания казначейства в г. Пензе (рис.5) применены деревянные стропильные фермы на узловых пластинах (МЗП) производства LKV-System Centar (Belgrade, prof. dr. Vojislav Kujundjich, www.facebook.com/lkv.centar). Выбор и применение этой технологии стали возможными благодаря выполненной ранее научной работе по автоматизированному проектированию элементов на МЗП [4].

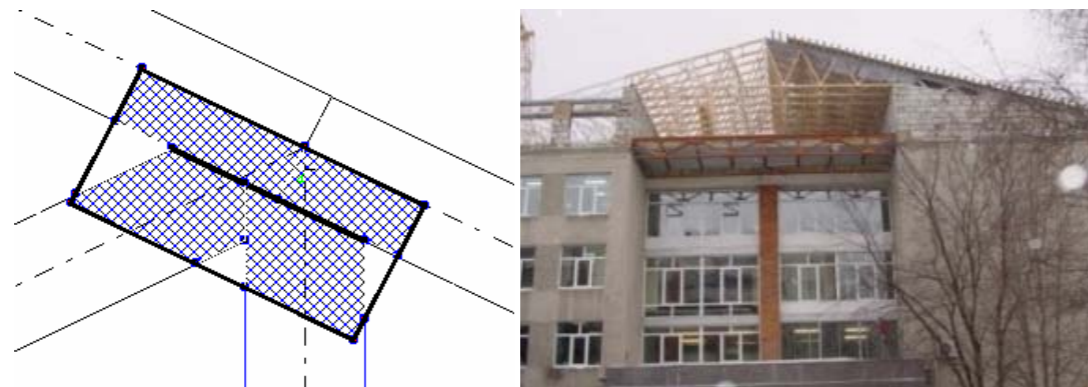


Рис. 5. Расчетная схема коннекторной пластины (МЗП) и конструкции на зубчатых пластинах в процессе монтажа

2. В конкурсных проектных работах для г. Сердобска Пензенской области (2018 г., 2019 г.) использованы материалы, сформулированные ранее в научной работе авторов проекта по формированию благоустройства малых городов Пензенской области в современных экономических условиях с учетом идентичности и исторических особенностей [5]. Реализация федеральной программы по формированию комфортной городской среды (<https://konkurs.gorodsreda.ru/>) подтвердила актуальность выбранного научного направления и предоставила возможность для применения полученных ранее научных результатов.

В основе проектных и научных предложений – обоснование восстановления городской структуры с исторически обусловленными центрами и с устройством благоустроенных выходов к реке (рис. 6).

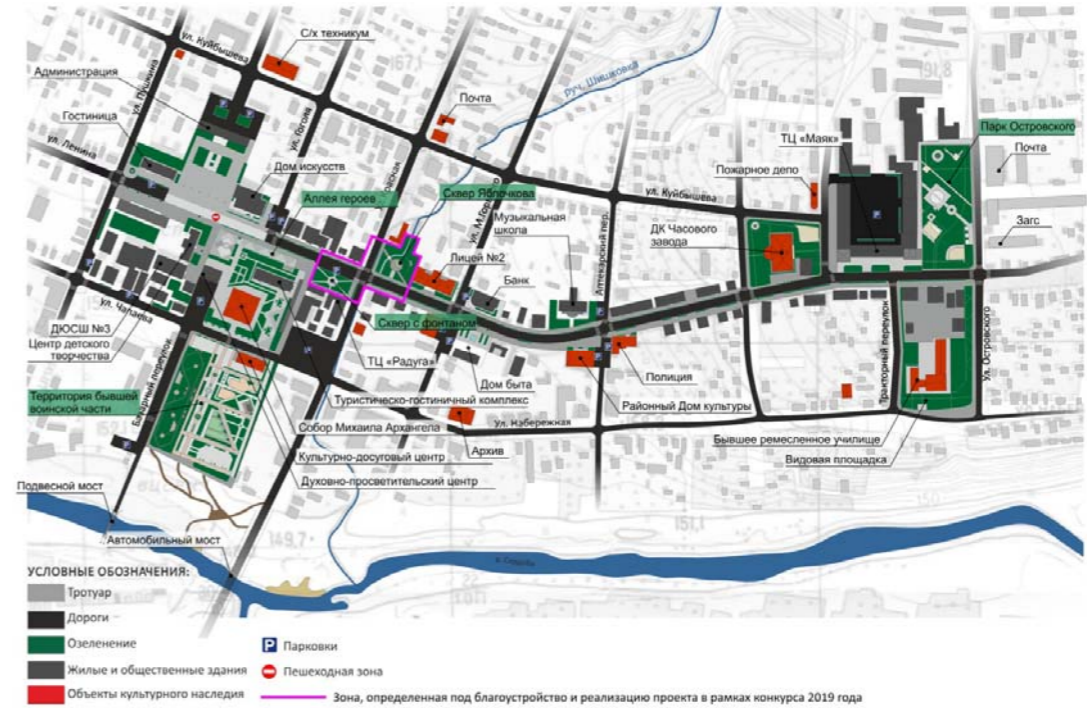


Рис. 6. Предложения по развитию исторической части г. Сердобска Пензенской области (фрагмент)

3. Реконструкция Пензенского зоопарка (10 га территории, 6000 м² общей площади зданий, см. рис. 1,г) включала 43 объекта (33 – новое строительство), в т.ч. 8 крупных общественных и производственных зданий, а также подведение полной инженерной инфраструктуры, отсутствовавшей ранее. В основе принятых архитектурных решений: формирование рельефа для создания удобных видовых точек, сохранение и развитие озеленения, максимально возможное исключение ненатуральных материалов. Проектная работа показала очевидную недостаточность нормативных и методических разработок в этой области (технологии содержания животных, вопросы генерального планирования и архитектурно-дизайнерского проектирования), что является следствием малой изученности темы, несмотря на ее актуальность. Таким образом, проектная работа стала источником для выбора направления научной работы [6, 7].

4. Проектирование генеральных планов населенных мест в каждом случае представляет не только проектную, но и научную задачу, так как связано с анализом большого количества данных, а также с выработкой обоснованных предположений-гипотез и стратегических решений, с учетом особенностей поселения. В конкретном случае (ЗАТО г. Заречный Пензенской области с населением 50 тыс. человек) проектная работа стала источником ряда научных исследований [8, 9].

5. В проектах двух школ на 660 мест (см. рис.1,д) были сделаны попытки избежать среднестатистических и типовых решений насколько это возможно в рамках дей-

ствующих норм и жестких финансовых и временных ограничений (лимиты площади и стоимости на одного обучающегося). Монолитный каркас придал вариативность планировочному решению. Применены также увеличенная высота помещений (3,6 м), светопрозрачные перегородки в классах, увеличенная площадь спортзалов с монолитными неразрезными балочными перекрытиями 21 м и 18 м, двухсветное пространство в холле с организацией «форума», трансформируемые помещения, оригинальные планировки блоков помещений для физики и химии, игровое оборудование в рекреациях.

Некоторые из приведенных выше проектных решений школ стали возможными благодаря ранее выполненной научной работе МГСУ [10] – партнера по эскизной стадии проектирования. В то же время работа над проектными решениями, анализ опыта, меняющиеся условия и технологии создают исследовательскую перспективу даже в такой сравнительно хорошо изученной теме, как «образовательные учреждения».

Рассмотренные примеры представляют собой небольшую часть от общего количества проектных решений, принятых на основе научных исследований или создающих для них основу. Это иллюстрация, подтверждающая возможность и эффективность взаимодействия научных и проектных решений в деятельности архитектурно-проектной мастерской при ее организации в структуре вуза.

Выводы

1. Показано, что многие определяющие проектные решения стали возможными только благодаря предшествующим научным исследованиям участников проектного процесса.
2. Показано на конкретных примерах, каким образом аналитическая часть проектных работ приводит к формулированию и решению научных задач прикладного характера.
3. Показано, что комплексный подход к проектированию при выполнении *полного* цикла проектных работ в рамках вуза приводит к взаимодействию специалистов разных направлений, что обогащает образовательный, проектный и научный процессы. Происходит профессиональный рост участников, постановка практически значимых и конкретных научных задач, повышается качество выпускаемых специалистов.
4. Потенциал предложенной формы научного и проектного взаимодействия используется недостаточно. Для повышения его эффективности необходима дополнительная организационная поддержка с определением юридического статуса, экономических параметров, взаимоотношений с образовательными нормативами и организацией учебного процесса.

Список литературы

1. Сагатдинова, А.М. О развитии инновационно-технической базы в зданиях высших учебных заведений / А.М. Сагатдинова // Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – №3. – С. 106–109.
2. Черячукин, В.В. Об одном способе деформационного расчета статически определимых арок с учетом физической и геометрической нелинейности / В.В. Черячукин, М.Л. Дегтев, В.П. Герасимов // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1983. – №8.
3. Черячукин, В.В. Программный комплекс по автоматизации проектирования деревянных гнутоклееных рам / В.В. Черячукин, С.А. Палювин, В.П. Герасимов // Информационный листок: Пензенский ЦНТИ. – 1994. – №314–94. – 4 с.
4. Черячукин, В.В. Автоматизированный программный комплекс для проектирования сквозных деревянных конструкций / В.В. Черячукин, А.А. Антонов, В.П. Герасимов // Информационный листок: Пензенский ЦНТИ. – 2000. – № 209-00, сер.Р. 67.03.03. – 3с.
5. Павлинова, С.Н. Методы сохранения среды исторического города средствами дизайна / С.Н. Павлинова, М.А. Ключникова, И.В. Родникова // Теория и практика

средового дизайна : сб. тр. VII межд. научн.-практич. конф. – Пенза: ПГУАС, 2015. – С.27–32.

6. Герасимов, В.П. Проектирование зоопарка в г. Пензе / В.П. Герасимов, Я.Ю. Солуданов // Теория и практика средового дизайна : сб. тр. VII межд. научн.-практич. конф. – Пенза: ПГУАС, 2015. – С.69–74.
7. Солуданов, Я.Ю. Проблемы утилизации отходов жизнедеятельности в среде зоопарков / Я.Ю. Солуданов, Т.Е. Солуданова, И.В. Родникова // Теория и практика средового дизайна: сб. тр. V межд. научн.-практич. конф. – Пенза: ПГУАС, 2015. – С.96–99.
8. Родникова, И.В. Реализация генерального плана и развитие среды города Заречного Пензенской области / И.В. Родникова // Теория и практика средового дизайна: сб. тр. III межд. научн.-практич. конф. – Пенза: ПГУАС, 2009. – С.3–6.
9. Родникова, И.В. Формирование средовых качеств городских территорий при разработке схемы регламентного зонирования / И.В. Родникова, А.Г. Семенова // Теория и практика средового дизайна: сб. тр. II межд. научн.-практич. конф. – Пенза: ПГУАС, 2008. – С.32–35.
10. Разработка требований к зданиям и помещениям общеобразовательных организаций с учетом перспективных задач развития системы общего образования: научно-технический отчет: в 4 т. / М.Е. Лейбман, А.И. Рубцов, Т.А. Пятницкая [и др.]. – М.: НИУ МГСУ, 2015.

References

1. Sagatdinova, A.M. On the development of the innovation-technical base in buildings of higher educational institutions / A.M. Sagatdinova // Academia. Architecture and construction. – 2016. – №3. – P. 106–109.
2. Cheryachukin, V.V. On a method of deformation calculation of statically definable arches taking into account physical and geometric nonlinearity / V.V. Cheryachukin, M.L. Degtev, V.P. Gerasimov // Proceedings of Universities. Construction and architecture. – 1983. – №8.
3. Cheryachukin, V.V. Software system for the automation of the design of wooden bentwood frames / V.V. Cheryachukin, S.A. Palyuvin, V.P. Gerasimov // Information leaflet: Penza CSTI. – 1994. – № 314–94. – 4 p.
4. Cheryachukin, V.V. Automated software package for designing through wooden structures / V.V. Cheryachukin, A.A. Antonov, V.P. Gerasimov // Information leaflet: Penza CSTI. – 2000. – № 209-00, ser.R. 03.03.03 – 3 p.
5. Pavlinova, S.N. Methods of preserving the environment of the historic city by means of design / S.N. Pavlinova, M.A. Klyushnikova // Theory and practice of environmental design: Sat. tr. VII Int. scientific-practical conf. – Penza: PGUAS, 2015. – P.51–56.
6. Gerasimov, V.P. Designing of a zoo in Penza / V.P. Gerasimov, I.Yu. Soludanov // Theory and practice of environmental design: Sat. tr. VII Int. scientific-practical conf. – Penza: PGUAS, 2015. – P.51–56.
7. Soludanov, I.U. Designing of a zoo in Penza / Ya. Yu. Soludanov // Theory and practice of environmental design: Sat. tr. VII Int. scientific-practical conf. – Penza: PGUAS, 2015. – P.51–56.
8. Rodnikova, I.V. The implementation of the master plan and the development of the environment of Zarechny, Penza region / I.V. Rodnikova // Theory and practice of environmental design: Sat. tr. III Int. scientific-practical conf. – Penza: PGUAS, 2009. – P.3–6.
9. Rodnikova, I.V. Formation of environmental quality of urban areas in the development of a regular zoning scheme / I.V. Rodnikova A.G. Semenova // Theory and practice of environmental design: Sat. tr. II Int. Scientific Practical Conf. – Penza: PGUAS, 2008. – P.32–35.
10. Development of requirements for buildings and premises of general educational organizations, taking into account the long-term objectives of the development of the general education system: scientific and technical report: in 4 volumes / M.E. Leibman (Ed.), A.I. Rubtsov, Pyatnitskaya T.A. and others – M.: NRU MGSU, 2015.

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

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

СВЕРХПЛОТНАЯ ГОРОДСКАЯ ЗАСТРОЙКА: ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ В ЗДАНИЯХ

А.М. Береговой

На конкретных примерах проектирования изучены три подхода к оценке энерго- и ресурсосбережения и экологии при создании сверхплотной застройки в виде высотных домов и дома-города будущего. Первый подход, который основывается на принципе блокирования отдельно стоящих зданий, позволяет повысить энерго- и ресурсосбережение за счет уменьшения площади наружных ограждений, протяженности наружных стен и фундаментов под них. В следующем подходе исследована возможность применения гелиоприемников по типу плоских солнечных коллекторов для подогрева помещений многоэтажных и высотных зданий. Показана целесообразность использования таких гелиоприемников для узкокорпусных зданий.

Результаты проведенных натурных исследований микроклимата многоэтажных зданий, рассмотренные в последнем подходе, указали на слабый воздухообмен помещений квартир и на необходимость установки мощных систем механической вытяжной вентиляции и специальных приточных устройств в домах высокой этажности.

Ключевые слова: сверхплотная городская застройка, энерго- и ресурсосбережение, экология, блокирование зданий, энергоактивные участки ограждений, воздухообмен помещений

SUPER DENSE CITY BUILDING. QUESTIONS OF ENERGY AND RESOURCE SAVINGS AND ECOLOGY IN BUILDINGS

А.М. Beregovoy

Using specific design examples, three approaches to assessing energy and resource conservation and the ecology are studied while creating super-dense buildings in the form of high-rise buildings and a city-house of the future. The first approach, which is based on the principle of blocking detached buildings, allows to increase energy and resource saving by reducing the area of outer enclosures, as well as the length of the external walls and foundations under them. The following approach explores the possibility of using solar collectors for heating multi-story and high-rise buildings has been investigated. There was shown the expediency of using such solar receivers for narrow-body buildings.

The results of full-scale studies of the microclimate of multi-storey buildings, considered in the latter approach, established a weak air exchange of the living spaces, and indicated the need to install powerful mechanical exhaust ventilation systems and special supply devices in high-rise buildings.

Keywords: super dense city building, energy and resource savings, ecology, blocking buildings, energy active enclosures areas, indoor air exchange

Идея создания сверхплотной застройки как важного звена города будущего находит все больше сторонников в зарубежном и отечественном градостроительстве [1, 2, 3]. Основными преимуществами такой застройки считаются сохранение и улучшение экологии окружающей среды, в том числе зеленых насаждений, уменьшение роли транспорта при высокой плотности квартир в создаваемом городе-доме. Например, в проекте «Город без машин» (Great City, Китай) от центральной жилой части такого гигантского дома общественные заведения на его периферии находятся в 10 минутах ходьбы; при этом дом потребляет электроэнергии и воды меньше соответственно на 48 и 50 %, чем город с такой же численностью населения в 80 тыс. человек [1].

Предполагается, что такому переустройству окружающей среды будут предшествовать прекращение процесса расширения городов, а также масштабная кампания по демонтажу многочисленных населенных пунктов, позволяющая природе начать процесс самовосстановления.

При проектировании сверхплотной застройки возникает ряд проблемных вопросов по оценке энергосбережения и микроклимата в помещениях многоэтажных и высотных зданий, а также в городе-доме будущего. Такие сооружения можно представить как объекты, заблокированные из отдельно стоящих небольших зданий с размерами на квартиру (рис. 1).

В проведенных нами исследованиях подтверждается существенный энерго- и ресурсосберегающий эффект при создании таких домов путем блокирования объектов, но вместе с тем отмечается ухудшение экологического состояния их внутренней среды.

Энергосберегающий эффект возникает за счет уменьшения теплоотдающей суммарной площади наружных ограждений здания, заблокированного из N числа отдельных объектов. Для здания в форме параллелепипеда и объектов кубической формы его можно определить по формулам [4]:

$$S_{\text{нп}}^{\text{бл}} = 6Nx^2 - 2nx^2 = 2x^2(3N - n), \quad (1)$$

$$i = \frac{S_{\text{нп}}^{\text{бл}}}{S_{\text{нп}}^{\text{отд}}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{нп}}^{\text{бл}}$ – площадь наружных ограждений заблокированного здания в форме параллелепипеда; N – число отдельных объектов кубической формы; i – критерий эффективности блокирования, дающий оценку энергосберегающему эффекту.

Критерий i оценивает величину снижения тепловых потерь через наружные ограждения из-за уменьшения их суммарной площади после блокирования.

Для здания, заблокированного из объектов прямоугольной формы в плане:

$$S_{\text{нп}}^{\text{бл}} = \sum S_{\text{нп}}^{\text{отд}} - \sum 2S_{\text{нп}}, \quad (3)$$

$$i = \frac{\sum S_{\text{нп}}^{\text{отд}} - \sum 2S_{\text{нп}}}{\sum S_{\text{нп}}^{\text{отд}}} = 1 - \frac{\sum 2S_{\text{нп}}}{\sum S_{\text{нп}}^{\text{отд}}}. \quad (4)$$

Для схемы блокирования, показанной на рис.1, в при $N = 8$ тепловые потери через наружные ограждения с учетом равенства значений их коэффициента теплопередачи снижаются примерно на 29 %. Еще больший энергетический эффект наблюдается при блокировании объектов по высоте в форме многоэтажного или тем более высотного здания. Например, для здания, скомпонованного из одинаковых объектов (81 шт.), имеющих квадратную форму в плане, тепловые потери могут снизиться на 74 %.

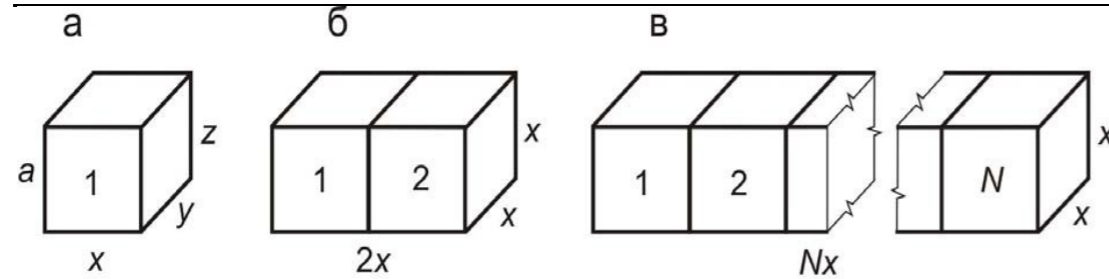


Рис. 1. Блокирование объектов

Энергосберегающий эффект в таких зданиях можно повысить путем использования тепла солнечной радиации. Проводились исследования [4] возможности ее применения для зданий различной этажности, имеющих на южных фасадах энергоактивные участки по типу плоских солнечных коллекторов. Для здания с размерами в плане 60×12 м и высотой этажа 3 м показана зависимость энергетического эффекта отношения $(S_0 - S_x)/S_n$ от этажности здания. Площадь S_x энергоактивного участка варьируется от нуля до 0,25 от общей площади наружных ограждений S_0 . При этом принято, что коэффициент теплопередачи всех наружных ограждений одинаков, а тепловые потери через энергоактивные участки ограждений равны нулю с учетом поступающего тепла солнечной радиации.

Результаты этого исследования показали, что для здания с энергоактивными участками ограждений удельные тепловые потери снижаются с увеличением площади S_x такой конструкции и ростом этажности здания.

Достаточно высокая эффективность такой энергоактивной конструкции, как плоский солнечный коллектор, в условиях II климатической зоны наблюдается в октябре и феврале-апреле, тогда как с ноября по январь из-за большой облачности эффективность коллектора в несколько раз меньше [5].

Следует, однако, отметить, что доля поглощенного тепла солнечной радиации f в общей величине тепловой нагрузки энергоактивного здания быстро уменьшается с ростом его этажности, поскольку отопительная нагрузка здания возрастает с увеличением его отапливаемого объема значительно быстрее, чем площадь инсоляции энергоактивных участков наружного ограждения. Поэтому в высотных зданиях и тем более доме-городе будущего использование таких возобновляемых источников энергии, как тепло солнечной радиации и верхних слоев земли, не даст сколько-нибудь ощутимого эффекта энергосбережения. Для увеличения доли тепла f таким зданиям следует придавать форму узкого корпуса, ширина которого при высоте этажа 3 м не превышает 12 м [6].

Величину ресурсосберегающего эффекта можно определить путем сравнения сметно-финансовых расчетов на строительство отдельно стоящих однотипных зданий и сблокированного из них дома с учетом действующих нормативных расценок стоимости материалов, эксплуатации машин и труда рабочих.

Сметно-финансовые расчеты на строительство десяти отдельно стоящих однотипных зданий с размерами в плане $4,5 \times 8$ м (высотой 6 м) и сблокированного по линейной схеме дома из бетонных блоков для фундаментов и стен подвалов, кирпичной кладки для стен и перегородок показали значительную экономию материально-технических ресурсов при блокировании зданий [7]. Экономия на 27 % и 32 % достигается за счет уменьшения длины соответственно фундаментов под наружные стены и наружных стен на 32 %.

Оценку экологического состояния внутренней среды жилых зданий повышенной этажности (рис. 2) выполнили на основе инструментальных замеров микроклимата их помещений в зимнее время при температурах наружного воздуха от минус 5°C до минус 8°C в условиях сильного ветра северного направления.



Рис. 2. Обследованные многоэтажные дома в г. Пензе

Результаты обследований показали:

- фактический воздухообмен в помещениях квартир составлял не более 30 – 46 % от нормативного значения;
- в вентиляционных каналах квартир на 3–10 этажах периодически возникала обратная тяга;
- на отдельных участках наружных стен образовывались мокрые участки и плесень.

Такой слабый механизм естественной вентиляции в помещениях многоэтажных жилых зданий, подтверждающий опубликованные результаты исследований зарубежных и отечественных специалистов, приводит к загрязнению внутренней воздушной среды и повышает вероятность появления в ней болезнетворной микрофлоры.

Очевидно, что в высотных домах и городе-доме будущего проблема экологического состояния их помещений приобретает еще более острый характер. Для ее решения могут быть использованы известные рекомендации по обеспечению притока наружного воздуха в помещения многоэтажных домов с помощью механической вытяжной системы вентиляции. Однако она должна быть достаточно мощной для эффективного удаления отработанного воздуха из многочисленных помещений высотного дома. В качестве приточных отверстий могут быть использованы стеновые или оконные клапаны, обеспечивающие постоянное поступление свежего воздуха.

Выводы

1. Проведенные исследования подтверждают значительный энерго-ресурсосберегающий эффект при создании сверхплотной застройки в виде высотных зданий или дома-города путем блокирования отдельно стоящих домов. Так, для здания, сблокированного из одинаковых объектов (81 шт.), при условии равенства значений коэффициента теплопередачи их наружных ограждений тепловые потери могут снизиться на 74 %.

2. Вместе с тем результаты проведенных натурных обследований жилых многоэтажных зданий указывают на слабый механизм естественной вентиляции их помещений по сравнению со зданиями малой и средней этажности, что ухудшает экологическое состояние внутренней воздушной среды.

3. Блокирование домов населенных пунктов в форму высотного здания или дома-города решает в определенной мере проблему экологического состояния окружающей среды, однако она приобретает особую актуальность в вопросах формирования микроклимата таких зданий. Один из путей решения этой проблемы – использование мощной механической вытяжной вентиляции для удаления загрязненного воздуха из помещений и специальных приточных устройств, например, в виде стеновых или оконных клапанов.

Список литературы

1. 10 уникальных проектов города будущего. – URL: www.adm.ru. (дата обращения: 17.09.2019).
2. Город будущего – город-дом. – URL: trend.club.ru (дата обращения: 17.09.2019).
3. Застройка повышенной плотности. – URL: [\(circulation date: 19.09. 2019\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%).
4. Береговой, А.М. Энергоэкономичные и энергоактивные здания в архитектурно-строительном проектировании / А.М. Береговой, А.В. Гречишкин, В.А. Береговой. – Пенза, 2012. – 200 с.
5. Береговой, А.М. Показатели эффективности в системном анализе теплопотерь через энергосберегающие наружные ограждения / А.М. Береговой, О.Л. Викторова, В.А. Береговой // Известия Вузов. Строительство. – 2009. – № 5. – С. 57–61.
6. Береговой, А.М. Энергосбережение в архитектурно-строительном проектировании / А.М. Береговой, А.П. Прошин, В.А. Береговой // Жилищное строительство. – 2002. – № 5. – С. 4–6.
7. Береговой, А.М. Техно-экономическая эффективность энергосберегающих решений в архитектурно-строительном проектировании / А.М. Береговой, М.А. Дерина, Л.Н.Петрянина // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №2. – С. 144–148.

References

1. 10 unique projects of the city of the future. – URL: www.adm.ru. (circulation date 09/17/2019).
2. City of the future-city-home. – URL: trend.club.ru (circulation date 09/17/2019).
3. High-density building. – URL: [\(circulation date: 09/19/2019\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%).
4. Beregovoy, A.M. Energy-efficient and energy active buildings in architecture and building engineering / A.M. Beregovoy, A.V. Grechishkin, V.A. Beregovoy. – Penza, 2012. – 200 p.
5. Beregovoy, A.M. Performance indicators in the system analysis of the heat losses through the exterior enclosure structures / A.M. Beregovoy, O.L. Viktorova, V.A. Beregovoy // News of higher educational institutions. – 2009. – No. 5. – P. 57–61.
6. Beregovoy, A.M. Energy saving in architecture and building engineering / A.M. Beregovoy, A.P. Proshin, V.A. Beregovoy // Housing construction. – 2002. – No. 5. – P. 4–6.
7. Beregovoy, A.M. Techno-economic efficiency of energy savings solutions in architecture and construction design / A.M. Beregovoy, M.A. Derina, L.N. Petryanina // Regional architecture and engineering. – 2015. – No.2. – P. 144–148.

Указатель статей,
опубликованных в 2019 г.

1. **Аверкин А.Г., Еремкин А.И., Аверкин Ю.А.** Осушение воздуха на основе твердых сорбентов. – №3(40). – С. 150–156.
2. **Акимова В.Ю., Домке Э.Р., Жесткова С.А., Капунова М.К.** Оптимизация системы доставки строительного груза автотранспортом в компании «ООО ПКФ Термодом». – №2(39). – С. 51–62.
3. **Андреев С.Ю., Гарькина И.А., Князев А.А., Кузнецова А.О.** Лабораторные исследования зависимости величины удельной электропроводности электрохимической ячейки мембранного электролизера от концентрации обрабатываемого раствора гидроксида натрия и его температуры. – №4(41). – С. 161–168.
4. **Андреев С.Ю., Яркинд М.И., Князев А.А.** Сравнительный анализ методик определения параметров турбулентного потока в напорном трубопроводе. – №2(39). – С. 174–182.
5. **Андреев С.Ю., Яркинд М.И., Князев В.А.** Уточненная методика определения осредненных местных скоростей потока жидкости в гидравлически гладких и вполне шероховатых трубах. – № 1(38). – С. 193–202.
6. **Андреев С.Ю., Яркинд М.И., Ласьков Н.Н., Князев В.А.** Новая методика расчета профиля распределения относительных осредненных местных скоростей по сечению напорного трубопровода. – №3(40). – С. 193–205.
7. **Арискин М.В., Гарькин И.Н.** Усиление железобетонных подкрановых конструкций. – № 1(38). – С. 149–153.
8. **Бакушев С.В.** Дифференциальные уравнения равновесия плоской одномерной деформации для идеально упругопластической сплошной среды при сложном напряженном состоянии. – №4(41). – С. 88–97.
9. **Бакушев С.В.** Дифференциальные уравнения равновесия сплошной среды для плоской деформации в декартовых координатах при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений (геометрически линейная модель) – № 1(38). – С. 76–85.
10. **Бакушев С.В.** Дифференциальные уравнения равновесия сплошной среды для плоской деформации в декартовых координатах при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений (геометрически нелинейная модель). – №2(39). – С. 86–99.
11. **Бакушев С.В.** Перемещения внецентренно нагруженного упругого стержня. – № 1(38). – С. 69–75.
12. **Белякова Е.А., Москвин Р.Н., Тараканов О.В., Куимова Е.И., Утюгова Е.С.** Зависимость свойств затвердевших композиционных вяжущих от соотношения цемента и золы. – №2(39). – С. 20–26.
13. **Береговой А.М.** Сверхплотная городская застройка: энерго- и ресурсосбережение и экология в зданиях. – №4(41). – С. 223–227.
14. **Береговой А.М., Береговой В.А.** Выбор конструкций наружных ограждений с учетом энергосбережения в условиях неблагоприятных воздействий окружающей среды. – № 1(38). – С. 86–90.
15. **Береговой А.М., Береговой В.А.** Система естественной вентиляции, экологические и теплоэнергетические параметры в единой энергетической системе биодома. – №3(40). – С. 214–219.
16. **Береговой А.М., Береговой В.А.** Энергосбережение в разнотипных зданиях городской застройки. – №3(40). – С. 220–225.
17. **Береговой В.А., Снадин Е.В., Волков П.В., Фокин Г.А.** Влияние разжижающих добавок на фракционный состав силицевого шликера. – №3(40). – С. 102–106.

18. **Бондаренко С.Н., Гридчин А.М., Лебедев М.С.** Влияние способа введения полимерно-минеральной композиции NICOFLOK на характеристики грунтобетона. – №4(41). – С. 42–47.

19. **Боровков Д.П., Чичиров К.О., Грейсух Г.И., Ежов Е.Г.** Мобильная аспирационная установка для погрузочных работ при демонтаже зданий. – №2(39). – С. 183–193.

20. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Композиты с системных позиций. – №2(39). – С. 5–10.

21. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Методологические принципы проектирования сложных динамических систем. – №4(41). – С. 34–41.

22. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Принципы системности и декомпозиции при разработке композитов. – №3(40). – С. 44–49.

23. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Принципы управления качеством сложных систем модульной структуры. – №4(41). – С. 74–80.

24. **Васин Л.А.** Открытая платформа управления инженерными сетями: организация видеосистемы смарт-дома. – №3(40). – С. 187–192.

25. **Васин Л.А.** Подход к организации образовательного процесса при изучении сетевых технологий в архитектурно-строительном университете с применением оборудования CISCO. – № 1(38). – С. 209–214.

26. **Васин Л.А.** Подход к созданию информационно-управляющей системы для автоматизации инженерных систем жилого индивидуального дома. – №2(39). – С. 205–210.

27. **Васин Л.А.** Современная парадигма управления инженерными сетями: интеллектуальная система терморегуляции жилого дома. – №4(41). – С. 169–176.

28. **Вдовин В.М.** Жесткий опорный узел клееной деревянной стойки. – №2(39). – С. 116–119.

29. **Вдовин В.М.** Устойчивость центрально-сжатой ребристой стеновой панели. – №3(40). – С. 135–139.

30. **Вдовин В.М., Карпов В.Н.** Выбор рациональной конструкции ребристых панелей перекрытия полноразборных деревянных домов. – №2(39). – С. 108–115.

31. **Вдовин В.М., Карпов В.Н.** Клееные крупноразмерные панели перекрытия с несущими деревянными ребрами. – № 1(38). – С. 124–131.

32. **Вдовин В.М., Мартышкин Д.О.** Коррозионно-стойкое немагнитное соединительные элементов деревянных конструкций. – №4(41). – С. 103–108.

33. **Викторова О.Л., Викторов В.В.** Методика расчета внецентренно нагруженных столбчатых фундаментов с частичным отрывом подошвы. – №4(41). – С. 136–144.

34. **Вилкова Н.Г., Мишина С.И.** Очистка сточных вод от веществ различной химической природы методом адсорбционного концентрирования. – №2(39). – С. 163–173.

35. **Вилкова Н.Г., Мишина С.И., Депутатов Е.Д.** Пены, стабилизированные оксидом титана: получение и свойства. – №3(40). – С. 206–213.

36. **Гарькина И.А., Данилов А.М.** Единая концепция системного проектирования сложных систем. – № 1(38). – С. 119–123.

37. **Гарькина И.А., Данилов А.М.** Основы системных исследований в материаловедении. – №2(39). – С. 80–85.

38. **Герасимов В.П.** Из опыта деятельности архитектурно-проектной мастерской в структуре вуза. – №4(41). – С. 216–222.

39. **Герасимов В.П., Валиахметов Р.М.** Устойчивость плоской формы изгиба деревянных криволинейных элементов в зависимости от расположения нагрузки по высоте сечения. – №4(41). – С. 131–135.

40. **Глухов В.С., Вишнякова Ю.С.** Рекомендации по определению несущей способности свай при погружении вдавливанием. – №3(40). – С. 107–112.

41. **Гречишкин А.В., Артюшин Д.В., Коновалов П.В., Праслов М.А.** Диагностика технического состояния сооружений электрических подстанций. – №2(39). – С. 135–141.

42. **Гришин Б.М., Бikuнова М.В., Шенин А.И., Осипова Н.Н.** Исследование седиментационных характеристик предварительно обработанного в электролизёре активного ила азротенка. – № 1(38). – С. 187–192.

43. **Гучкин И.С., Булавенко В.О., Ласьков Н.Н.** Усиление плит из ячеистого бетона после длительной эксплуатации в конструкции покрытия производственного здания. – № 1(38). – С. 132–137.

44. **Гучкин И.С., Ласьков Н.Н.** Усиление железобетонных пустотных плит перекрытий, получивших недопустимые повреждения при пожаре. – №4(41). – С. 81–87.

45. **Гучкин И.С., Ласьков Н.Н., Жуков А.Н.** Усиление несущей кирпичной стены, ослабленной наклонной магистральной трещиной. – №3(40). – С. 113–119.

46. **Гучкин И.С., Ласьков Н.Н., Резаева Т.А.** Устройство для строповки и крепления пустотных плит безопалубочного формования. – №2(39). – С. 120–126.

47. **Данилов А.М., Гарькина И.А.** Приближенные методы аналитического конструирования композиционных материалов. – № 1(38). – С. 24–29.

48. **Еремкин А.И., Баканова С.В.** Исследование процессов увлажнения кондиционированным воздухом текстильных полуфабрикатов на основе математического моделирования. – № 1(38). – С. 164–170.

49. **Еремкин А.И., Баканова С.В.** Расчёт общеобменной вентиляции на разбавление вредных газов в животноводческих помещениях. – №2(39). – С. 194–198.

50. **Ерёмкин А.И., Орлова Н.А.** Оценка взаимодействия текстильных волокон с кондиционированным воздухом. – №4(41). – С. 151–160.

51. **Ерёмкин А.И., Орлова Н.А., Фильчакина И.Н.** Методика определения закономерности изменения параметров потока вдоль воздухораспределителя с равномерной раздачей приточного воздуха. – № 1(38). – С. 154–163.

52. **Ерёмкин А.И., Фильчакина И.Н., Орлова Н.А.** Физико-математическое моделирование процесса увлажнения текстильного материала при взаимодействии с кондиционированным воздухом. – №3(40). – С. 157–166.

53. **Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф., Преображенская Е.М., Макаrchук М.В.** Перспективы применения новых материалов и подходов аддитивных технологий в промышленном дизайне. – №3(40). – С. 7–15.

54. **Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф., Преображенская Е.М., Макаrchук М.В.** Исследование физико-механических характеристик образцов из полилактида в аддитивной технологии. – №3(40). – С. 92–101.

55. **Ерофеев В.Т., Родин А.И., Кравчук А.С., Ермаков А.А.** Исследование фазовых превращений в шихте (трепел : Na_2CO_3) для пеностеклокерамики. – №3(40). – С. 16–23.

56. **Жегера К.В.** Применение алюмосиликатов в качестве модифицирующей добавки в цементных системах. – № 1(38). – С. 51–55.

57. **Жегера К.В., Пышкина И.С.** Оценка экономической эффективности применения гидросиликатов кальция в отделочном составе. – №2(39). – С. 27–31.

58. **Жуков А.Н., Булавина Д.А., Абрашитов В.С.** Учет конструктивных особенностей арочного ангара при определении несущей способности его оболочки. – №4(41). – С. 109–114.

59. **Зворыгина С.В., Викторова О.Л.** Определение рациональных геометрических параметров пространственных плитно-стержневых систем с применением адаптационного метода. – № 1(38). – С. 105–111.

60. **Зернов В.В., Зайцев М.Б.** Методика расчета стальных рам промышленных зданий с использованием различных форм потери устойчивости по деформированной схеме. – № 1(38). – С. 143–148.

61. **Ильина Т.Н., Гольцов А.Б., Емельянов Д.А.** Анализ аэродинамики двухфазных потоков в аспирационной системе технологического комплекса. – №3(40). – С. 181–186.

62. **Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Т.К.** Реологические особенности цементно-минеральных систем, пластифицированных поликарбоксилатным пластификатором. – №3(40). – С. 24–34.

63. **Иноземцев С.С.** Отечественный и зарубежный опыт применения эластомерного бетона для устройства зон сопряжения дорожной одежды с деформационными швами мостовых сооружений. – № 1(38). – С. 15–23.
64. **Карпова О.В.** Критерии оценки «зеленых» технологий в системах сертификации зданий. – № 1(38). – С. 99–104.
65. **Королева Т.И., Аржаева Н.В., Мельников И.Е.** Исследование влажностных полей в толще облегченной ограждающей конструкции. – № 1(38). – С. 177–186.
66. **Королева Т.И., Аржаева Н.В., Мельников И.Е., Иващенко Н.Ю.** Метод определения сопротивления теплопередаче воздушной прослойки для неоднородной ограждающей конструкции. – №3(40). – С. 173–180.
67. **Кочеткова М.В.** Трещинообразование и схемы разрушения ростверков под колонну с многорядным расположением свай. – № 1(38). – С. 112–118.
68. **Лаврова О.В.** Методика расчета прочности железобетонных коротких балок, усиленных на основе каркасно-стержневой модели. – №4(41). – С. 98–102.
69. **Логанина В.И.** О связи стоимости отделочных работ с качеством их внешнего вида. – №2(39). – С. 44–50.
70. **Логанина В.И., Аверин И.А., Карманов А.А.** Оценка структуры антиобледенительного покрытия на основе силиконовой смолы. – №3(40). – С. 73–77.
71. **Логанина В.И., Аль Саиди Бассам Шариф Денеф, Фокин Г.А.** Органическая добавка на основе глин с повышенным содержанием монтмориллонита. – №3(40). – С. 78–84.
72. **Логанина В.И., Мажитов Е.Б.** Реологические свойства золь-силикатных красок. – № 1(38). – С. 45–50.
73. **Логанина В.И., Сергеева К.А.** Оценка антиобледенительных свойств покрытий металлических конструкций. – №4(41). – С. 5–10.
74. **Логанина В.И., Фокин Г.А.** Обеспечение качества внешнего вида защитно-декоративных покрытий цементных бетонов. – №3(40). – С. 68–72.
75. **Логанина В.И., Фролов М.В.** Влияние вида наполнителей на трещиностойкость теплоизоляционных покрытий для газобетона. – № 1(38). – С. 30–35.
76. **Лола А.М., Лола У.А., Меньшикова Е.П.** Необходимость знания информационных технологиями архитекторами. – №2(39). – С. 217–223.
77. **Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Безрукова М.С.** Оценка эффективности реализации предупреждающих действий для устранения дефектов, возникающих при монтаже пластиковых окон – № 1(38). – С. 91–98.
78. **Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Безрукова М.С.** Оценка эффективности процесса реализации корректирующих и предупреждающих действий при монтаже и эксплуатации металлопластиковых оконных конструкций. – №2(39). – С. 127–134.
79. **Макридин Н.И., Максимова И.Н., Коннов Е.Д.** О коэффициентах поперечной деформации и объемного деформирования конструкционного керамзитобетона на диаграмме сжатия. – №4(41). – С. 11–19.
80. **Макридин Н.И., Максимова И.Н., Полубарова Ю.В.** Особенности механического поведения и структурных изменений конструкционного керамзитобетона. – №3(40). – С. 50–57.
81. **Макридин Н.И., Максимова И.Н., Полубарова Ю.В.** Фазовый состав и прочность дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня. – № 1(38). – С. 36–44.
82. **Марьёнкин А.В., Романова С.А., Родин А.И.** Архитектура церкви в честь иконы «всех скорбящих радости» в с. Енгальчево Республики Мордовия. – №4(41). – С. 209–215.
83. **Монаркин Н.Н., Лукин С.В., Кочкин А.А.** Исследование влияния конструктивных и режимных параметров стационарного переключающегося регенеративного теплоутилизатора на его тепловую и аэродинамическую эффективность. – №2(39). – С. 199–204.
84. **Монахов В.А., Зайцев М.Б.** Построение кинематической матрицы плоских стержневых систем. – №3(40). – С. 130–134.

85. **Нежданов К.К., Артюшин Д.В., Жуков А.Н., Курткеев Д.Х.** Гарантирование надежности и долговечности П-образных рам каркасов ТЭЦ. – № 1(38). – С. 138–142.
86. **Нежданов К.К., Гарькин И.Н.** Высокоресурсная неразрезная порталная двухстенчатая подкрановая балка. – №3(40). – С. 140–144.
87. **Нежданов К.К., Гарькин И.Н.** Исследование напряженного состояния неразрезной подкрановой балки. – №2(39). – С. 142–148.
88. **Нежданов К.К., Гарькин И.Н.** Повышение несущей способности колонн как трубобетонных стержней овального сечения. – №2(39). – С. 149–154.
89. **Нежданов К.К., Гарькин И.Н.** Подкрановые конструкции: рельсовый блок из арочных рельсов. – №4(41). – С. 127–130.
90. **Низина Т.А., Володин В.В., Балыков А.С., Ошкина Л.М., Коровкин Д.И.** Влияние добавок на основе обожжённой глины на прочность модифицированного цементного камня. – №3(40). – С. 58–67.
91. **Нугманова Г.Г.** Имперские образы в облике парадного центра Казани в XIX – начале XX века. – №2(39). – С. 211–216.
92. **Орынбеков Е.С., Селяев В.П., Нурлыбаев Р.Е., Кульдеев Е.И.** Сухие строительные смеси для штукатурных работ с тонкодисперсными минеральными активными добавками. – №2(39). – С. 72–79.
93. **Осипова Н.Н., Гришин Б.М., Ежов Е.Г., Родионов Ю.В.** Обоснование применения газозвушной смеси на основе бутана для газификации объектов. – №4(41). – С. 190–196.
94. **Осипова Н.Н., Гришин Б.М., Родионов Ю.В., Тараканов О.В.** Обеспечение условий предупреждения образования кристаллогидратов в регуляторах давления систем газоснабжения на базе резервуарных установок. – №2(39). – С. 155–162.
95. **Очкина Н.А.** Усадка, внутренние напряжения и трещиностойкость композитов с высокоплотным наполнителем. – №3(40). – С. 85–91.
96. **Перельгин Ю.П., Гришин Б.М., Титов Е.А., Осипова Н.Н.** Реагентная очистка сточных вод дрожжевого завода от фосфат-ионов и ионов аммония. – №3(40). – С. 167–172.
97. **Петровнина И.Н.** Повышение долговечности железобетона путем ингибирования коррозии стали с использованием мицелиальных масс. – №2(39). – С. 39–43.
98. **Петрянина Л.Н.** Концепция проектного решения и реальное развитие центра города: сравнительный анализ. – № 1(38). – С. 203–208.
99. **Романенко И.И.** Стойкость наполнителей в цементном камне в обеспечении долговечности сооружений. – №2(39). – С. 32–38.
100. **Саргсян А.Е., Гукова Е.Г.** Оценка локальной прочности железобетонной защитной оболочки на пробивание из бетона различных типов при соударении с самолетом. – №4(41). – С. 56–67.
101. **Селютина Л.Ф., Емельянова Н.В.** Экспериментально-теоретические исследования дощатых ферм с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах. – №3(40). – С. 120–129.
102. **Селютина Л.Ф., Малащенко А.А.** Исследование влияния инженерно-геологических условий на технические параметры фундаментов. – №4(41). – С. 115–126.
103. **Селяев В.П., Алимов М.Ф., Селяев П.В., Шабает И.Н.** Дифференцированный анализ диаграмм деформирования бетона при сжатии. – №2(39). – С. 63–71.
104. **Селяев В.П., Селяев П.В., Кечуткина Е.Л., Данилов А.М., Гарькина И.А.** Управление свойствами композиционных материалов как сложных систем. – №3(40). – С. 35–43.
105. **Селяев В.П., Селяев П.В., Кечуткина Е.Л., Киселёв Н.Н.** Анализ и определение основных параметров зернистых систем, влияющих на процесс переноса и теплозащитные свойства вакуумных панелей. – №2(39). – С. 11–19.
106. **Скачков Ю.П., Снежкина О.В., Ладин Р.А.** Зависимость прочности железобетонных балок от их геометрических характеристик в зоне действия поперечных сил. – № 1(38). – С. 56–61.

107. **Тараканов О.В., Белякова Е.А., Утюгова Е.С.** Влияние компонентов комплексных добавок на фазовый состав и микроструктуру цементного камня. – №4(41). – С. 68–73.
108. **Тюкленкова Е.П., Мейнгард С.И.** Геодезический контроль геометрических параметров строительных конструкций Крымского моста. – №4(41). – С. 145–150.
109. **Усачев А.П., Шурайц А.Л., Бирюков А.В., Пикалов А.А.** Разработка математической модели по оптимизации газодинамических потерь на фильтрующих картриджах грубой и тонкой очистки газового двухступенчатого фильтра. – №4(41). – С. 177–182.
110. **Усачев А.П., Шурайц А.Л., Бирюков А.В., Соловьев В.А.** Совершенствование конструкции и методов расчета плоских фильтрующих картриджей природного газа, параллельно соединенных в одном корпусе газового двухступенчатого фильтра. – №4(41). – С. 183–189.
111. **Усачев А.П., Шурайц А.Л., Бирюков А.В., Усуев З.М.** Разработка модели узла обеспечения герметичности быстростъемной крышки газового фильтра. – № 1(38). – С. 171–176.
112. **Фомина Е.В., Лесовик В.С., Айзенштадт А.М.** Снижение аутогенной усадки композиционного вяжущего с использованием туфа. – №4(41). – С. 48–55.
113. **Хвастунов В.Л., Хвастунов А.В., Махамбетова К.Н., Чиркина М.А.** Основы оптимизации составов карбонатно-шлаковых вяжущих. – № 1(38). – С. 5–14.
114. **Хомяков А.И.** Символы четных пространств. – №4(41). – С. 203–208.
115. **Черкасов В.Д., Авдонин В.В., Юркин Ю.В., Пильщиков В.О.** Самоклеящиеся радиационно-защитные покрытия. – №4(41). – С. 20–26.
116. **Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Емельянов А.И., Хазеев Х.И., Кротова В.С.** Разработка пенобетонов на основе пенообразователя из продуктов микробного синтеза. – №4(41). – С. 27–33.
117. **Чикота С.И.** Особенности проектных решений торговых центров в крупных российских городах. – №4(41). – С. 197–202.
118. **Шеин А.И.** Безопасность сборных железобетонных общественных зданий с несущими поперечными рамами в техподполье. – № 1(38). – С. 62–68.
119. **Шеин А.И.** Оптимизация рам с равноустойчивыми частями. – №2(39). – С. 100–107.
120. **Юрьев А.Г., Зинькова В.А.** Расчет металлических ферм на основе вариационных принципов. – №3(40). – С. 145–149.